УДК 630*36:630*52 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-131-138

Обоснование выбора харвестерных головок и захватно-срезающих устройств по таксационным характеристикам древостоев

Т.Н. Козунов[1a], О.А. Куницкая[2b], А.Ю. Жук[3c], С.И. Ревяко[4d], О.И. Григорьева[5e], О.Б. Марков[6f]

[1] Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, 1, Московская область, Мытищи, Россия
[2] Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия
[3] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[4] Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, 111, Новочеркасск, Россия
[5] Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5У, Санкт-Петербург, Россия
[6] Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Россия
[a] ktn241084@mail.ru, [b] ola.ola07@mail.ru, [c] ftslk@brstu.ru, [d] revyako77@mail.ru, [e] grigoreva_o@list.ru, [f] 79212222619@yandex.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0005-7582-7728, [b] https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,
[c] https://orcid.org/0000-0002-8307-6945, [d] https://orcid.org/ 0000-0001-7362-5042,
[e] https://orcid.org/0000-0001-5937-0813, [f] https://orcid.org/0000-0002-2467-9607.
Статья поступила 30.06.2026, принята 10.09.2026.

В современной практике лесозаготовок выбор параметров захватно-срезающих устройств и харвестерных головок регламентируется правилом: диаметр при максимальном раскрытии должен соответствовать удвоенному среднему диаметру древостоя, тем самым минимизируя число деревьев, не обработанных машиной при сплошных рубках. Однако, увеличение диаметра повышает массу технологического оборудования, что неизбежно влечёт за собой необходимость использования более тяжёлых, энергоёмких и дорогостоящих машин-носителей. При этом крупномерные деревья, параметры которых превышают технологические возможности машин, в процессе машинизированной заготовки так или иначе оставляются на лесосеке, а их последующая валка и раскряжёвка осуществляются механизированным способом с использованием бензиномоторных пил. Указанное обстоятельство ставит под сомнение технологическую целесообразность существующего правила. В статье рассматривается предположение, что соотношение диаметров может быть снижено без существенной потери общей эффективности технологического процесса заготовки. В работе используются методы имитационного моделирования. Для проведения исследования использованы экспериментальные данные – перечётная ведомость древостоя, полученная ранее в полевых условиях предыдущими исследователями. В результате обработки массива данных перечётной ведомости получены оценки параметров законов распределения диаметра деревьев по породам. Результаты позволяют уточнить имитационный подход в оценке деревьев, не обработанных при машинной заготовке. Приводится интерпретация результатов реализации предложенной имитационной модели в числах (установлено, что при среднем диаметре на высоте груди 22,78 см в сосновом древостое стандартная рекомендация по диаметру захватно-срезающего устройства и харвестерной головки составляет ориентировочно 45,6 см; при этом около 6 % деревьев останутся необработанными по причине большего диаметра у пня; при этом при снижении диаметра харвестерной головки до 41 см останутся необработанными ориентировочно 10 % деревьев).

Ключевые слова: машинная заготовка; сортиментная технология; диаметр на высоте груди; диаметр пня; имитационное моделирование; экспоненциальные распределения.

Justification for the selection of harvester heads and grab-cutting devices based on the inventory characteristics of forest stands

T.N. Kozunov[1a], O.A. Kunitskaya[2b], A.Yu. Zhuk[3c], S.I. Revyako[4d], O.I. Grigorieva[5e], O.B. Markov[6f]

[1] Mytischi Branch of Bauman Moscow State Technical University; 1, 1st Institutskaya St., Mytischi, Russia
[2] Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia
[3] Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[4] Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Branch of Don State Agrarian University; 111, Pushkinskaya St., Novocherkassk, Russia
[5] St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5U, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia
[6] Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia
[a] ktn241084@mail.ru, [b] ola.ola07@mail.ru, [c] ftslk@brstu.ru, [d] revyako77@mail.ru, [e] grigoreva_o@list.ru, [f] 79212222619@yandex.ru
[a] https://orcid.org/0009-0005-7582-7728, [b] https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,

[c] https://orcid.org/0000-0002-8307-6945, [d] https://orcid.org/0000-0001-7362-5042,
[e] https://orcid.org/0000-0001-5937-0813, [f] https://orcid.org/0000-0002-2467-9607
Received 30.06.2026, accepted 10.09.2026.

In modern logging practice, the selection of the parameters of grab-cutting devices and harvester heads is regulated by the rule: the diameter at maximum opening should correspond to twice the average diameter of the stand, thereby minimizing the number of trees not processed by the machine during clear cuttings. However, an increase in diameter increases the mass of the technological equipment, which inevitably necessitates the use of heavier, more energy-intensive, and expensive carrier vehicles. At the same time, large-diameter trees whose parameters exceed the technological capabilities of the machines are inadvertently left on the cutting area during mechanized harvesting, and their subsequent felling and bucking are carried out mechanically using motor-manual chainsaws. This circumstance calls into question the technological feasibility of the existing rule. The paper examines the assumption that the diameter ratio can be reduced without a significant loss in the overall efficiency of the harvesting technological process. The study employs simulation modeling methods. Experimental data, specifically a timber cruise inventory previously obtained under field conditions by prior researchers, are used for the investigation. As a result of processing the inventory dataset, estimates for the parameters of the tree diameter distribution laws by species are determined. The results allow for the refinement of the simulation approach used to evaluate trees left unprocessed during mechanized harvesting. A quantitative interpretation of the proposed simulation model implementation results is provided: it is established that for a pine stand with an average diameter at breast height of 22,78 cm, the standard recommendation for the diameter of the felling-and-bunching attachment and harvester head is approximately 45,6 cm, with about 6 % of the trees remaining unprocessed due to a larger stump diameter; conversely, reducing the harvester head diameter to 41 cm leaves approximately 10 % of the trees unprocessed.

Keywords: mechanized harvesting; cut-to-length technology; diameter at breast height; stump diameter; simulation modeling; exponential distributions.

Введение. В современной практике лесозаготовок выбор параметров захватно-срезающих устройств (ЗСУ) и харвестерных головок регламентируется правилом: диаметр при максимальном раскрытии $D_{хг}$ должен соответствовать удвоенному среднему диаметру D древостоя [1–8]. Правило основано на предположении, что в таком случае диаметр раскрытия «перекрывает» диапазон трёх среднеквадратических отклонений (σ) при нормальном распределении деревьев по диаметру, тем самым минимизируя число деревьев, не обработанных машиной при сплошных рубках. Однако, увеличение диаметра $D_{хг}$ повышает массу технологического оборудования, что неизбежно влечёт за собой необходимость использования более тяжёлых, энергоёмких и дорогостоящих машин-носителей [1–8]. При этом крупномерные деревья, параметры которых превышают технологические возможности машин, в процессе машинизированной заготовки так или иначе оставляются на лесосеке, а их последующая валка и раскряжёвка осуществляются механизированным способом с использованием бензиномоторных пил [1–8]. Указанное обстоятельство ставит под сомнение технологическую целесообразность существующего правила.

Постановка задачи. В статье рассматривается предположение, что соотношение $D_{хг}/D$ может быть снижено без существенной потери общей эффективности технологического процесса заготовки.

Методы и материалы исследования. В работе используются методы математического и, в частности, имитационного моделирования. Для проведения исследования использованы экспериментальные данные – перечётная ведомость древостоя, полученная в полевых условиях при помощи LIDAR-съёмки (эффективно реализуется в современных условиях [9–13]) в работе [14] и рассматривавшаяся также в статье [15]. Для анализа распределений диаметров деревьев по породам использованы классические методы математической статистики [16–19].

Результаты исследования

Реализация имитационной модели при распределении априори. Вначале рассмотрим «базовый» случай и примем априори, что эмпирическое распределение диаметров деревьев на высоте груди соответствует логарифмически-нормальному закону распределения случайной величины с параметрами μ_{LN}, σ_{LN}:

$$d_{13} \sim LN(\mu_{LN}; \sigma_{LN}) \quad (1)$$

Выбор логарифмически-нормального распределения связан с физическим смыслом рассматриваемой задачи: диаметр дерева является положительной величиной.

Для дальнейшего изложения нагляднее задать параметры μ, σ на основе среднего арифметического D:

$$\mu = D = \frac{1}{n}\sum d_{13}, \quad (2)$$

и выборочного стандартного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum (d_{13} - \mu)^2}, \quad (3)$$

поскольку физический смысл этих величин ясен.

При этом μ и σ связаны коэффициентом вариации по определению [16,17]:

$$\mathrm{Var} = {}^{\mu}/_{\sigma} \quad (4)$$

Тогда параметры распределения μ_{LN}, σ_{LN} [16,17]:

$$\mu_{LN} = \ln \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} = \ln \frac{\mu}{1 + \mathrm{Var}^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{LN} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)} = \sqrt{\ln(1 + \mathrm{Var}^2)} \quad (6)$$

Диаметр дерева в месте среза d_c (диаметр пня) выражается через диаметр на высоте груди d_{13} при помощи коэффициента, связанного с породой древесины, возрастом, бонитетом и иными факторами:

$$d_c = k_c d_{13} \quad (7)$$

На настоящем этапе разработки имитационной модели принимаем распределение k_c априорно как равномерное:

$$k_c \sim U(k_{\min}; k_{\max}) \quad (8)$$

После генерации модельных данных для n штук деревьев оценим процент деревьев, не обработанных машиной по причине недостаточного диаметра $D_{\text{хг}}$:

$$\delta = \frac{[d_c > D_{\text{хг}}]}{n} \cdot 100\% \quad (9)$$

В результате реализации имитационной модели получим прогноз процента деревьев, диаметр пня d_c, у которых (согласно (7) – функция диаметра на высоте груди d_{13}) превышает диаметр $D_{\text{хг}}$ при различных значениях коэффициента вариации Var для d_{13} в древостое. Приведём пример результатов на рис. 1.

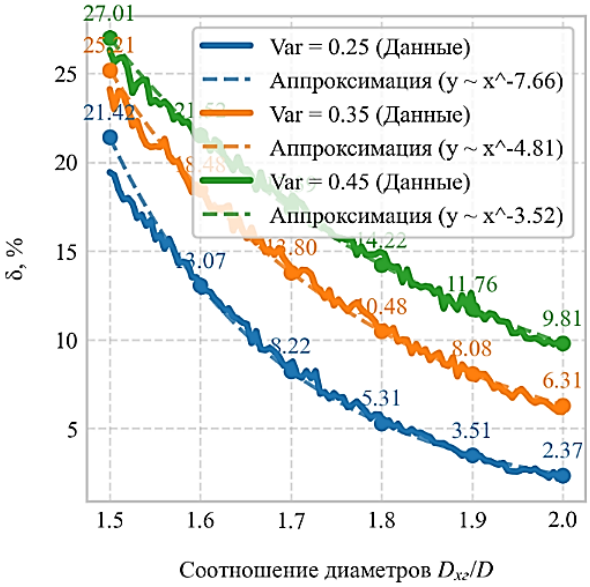


Рис. 1. Оценка процента деревьев, не обработанных харвестером при среднем диаметре древостоя на высоте груди 30 см

Результаты расчётов ожидаемо показывают, что чем выше коэффициент вариации, тем больший процент деревьев остаётся необработанным; при этом обработка модельных данных приводит к количественной оценке процента необработанных деревьев, зависящего от соотношения $D_{\text{хг}}/D$ и коэффициента вариации Var диаметра d_{13}.

Для удобства записи обозначим соотношение диаметров:

$$r = {}^{D_{\text{хг}}}/_{D} \quad (10)$$

и приблизим результаты вычислений линейной комбинацией:

$$\delta \approx g(r, \text{Var}) = \sum_{j=0}^{m} \sum_{i=0}^{m} c_{i,j} r^i v^j \quad (11)$$

где c – числовые коэффициенты, m – степень полинома-приближения.

План реализации имитационной модели указан в табл. 1.

Таблица 1. План реализации имитационной модели

№	D, см	Var	k_c	$r = {}^{D_{\text{хг}}}/_{D}$	n
1	30	0,2 … 0,5	1,2 … 1,3	1,5 … 2,0	10^4

В результате обработки расчётных данных получим функцию процента деревьев, не обработанных машиной, от коэффициента вариации Var диаметра древостоя на высоте груди d_{13} и соотношения диаметра $D_{\text{хг}}$ и среднего диаметра D в древостое. Вид функции g (степень полинома m) принимается по коэффициенту детерминации R^2. Например, при $m = 2$, функция представлена линиями уровня на рис. 2, причём коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}9920$.

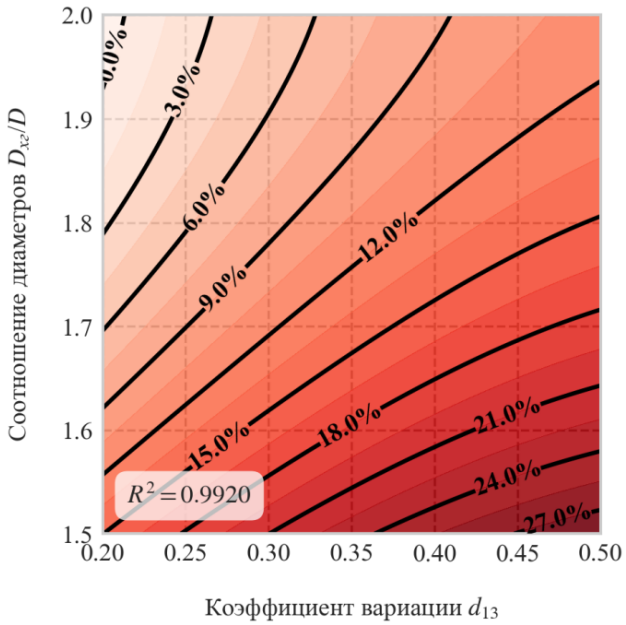


Рис. 2. Линии уровня функции процента необработанных деревьев по результатам вычислительного эксперимента для логарифмически-нормального распределения диаметров деревьев на высоте груди

Заметим, что имитационный подход позволяет получить наглядные, интерпретируемые результаты.

Определение статистических характеристик древостоя на основе данных перечётной ведомости. Далее обратимся к реальным данным о распределении D. Получим уточнённые оценки на основе анализа распределений размерных характеристик древостоя по перечётной ведомости [14, 15]. Карта древостоя, размерные характеристики которого указаны в ведомости, представлена на рис. 3.

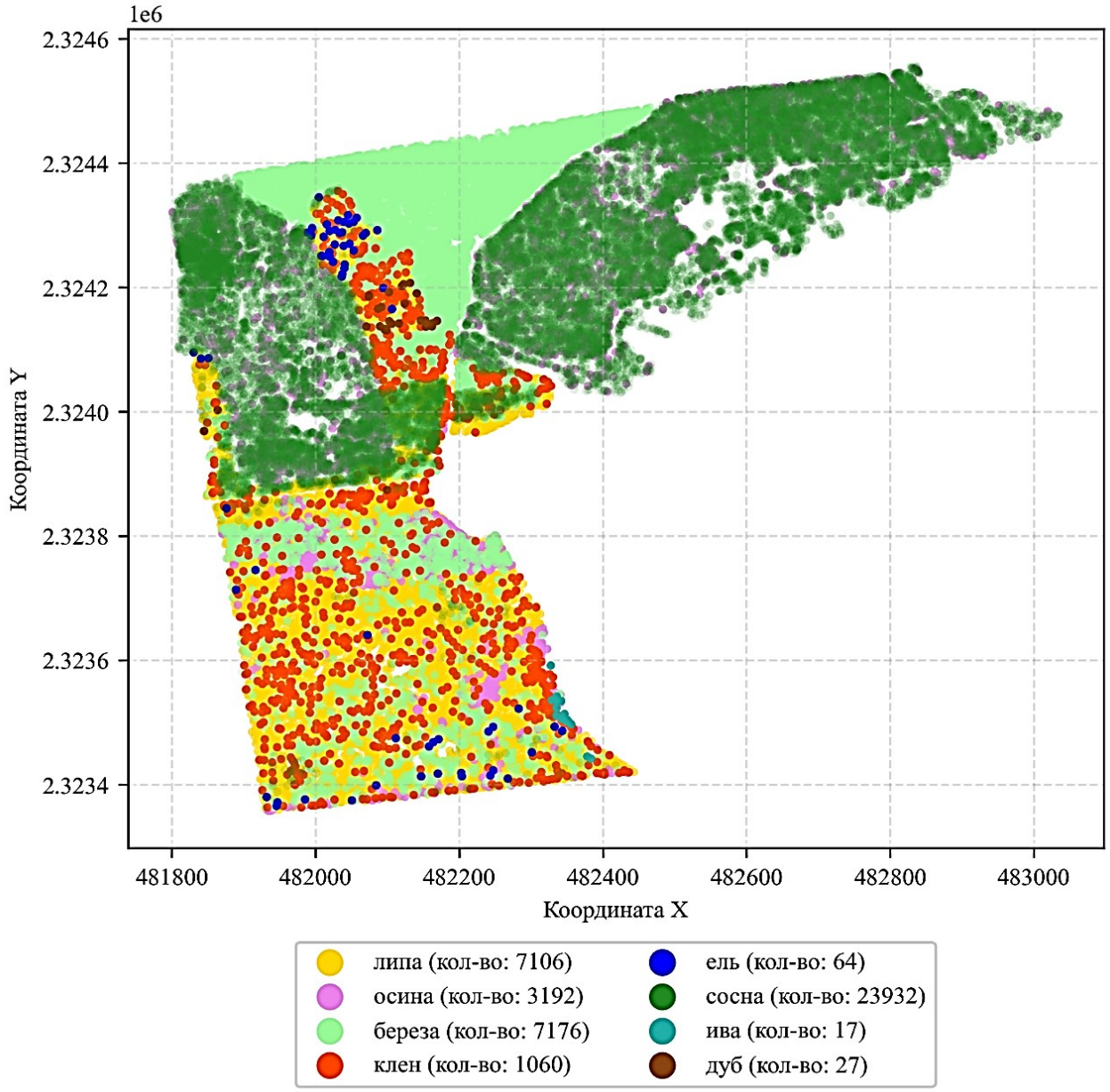


Рис. 3. Карта древостоя на основе перечётной ведомости [14, 15]

Подберём законы распределения диаметров по породам, наиболее точно передающие эмпирические распределения согласно ведомости. Для этого рассмотрим распределения из семейства экспоненциальных распределений. Для выбора лучшего среди рассматриваемых вариантов в качестве метрики близости используем расстояние Вассерштейна порядка 1 (W_1, EMD), которое в теории для пары распределений P, Q определяется по формуле [18, 19]:

$$W_1(P,Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left|F_P(x) - F_Q(x)\right| dx \qquad (12)$$

где F – кумулятивная функция плотности вероятности (CDF) исследуемой величины x.

На практике при сравнении эмпирического распределения с теоретическим EMD вычисляется приближенно [18, 19]:

$$\mathrm{EMD}\left(U, P_{\mu,\sigma}\right) = \\ = \sum_{i=1}^{n-1} |F_U(x_i) - F_P(x_i)| \cdot (x_{i+1} - x_i), \qquad (13)$$

где $F_U(x_i)$ – ступенчатая эмпирическая функция распределения (ECDF) выборки в точке x_i (подразумевается, что выборка отсортирована по возрастанию значений):

$$F_U(x_i) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \mathbb{I}\left(u_j \le u_i\right)$$

где $\mathbb{I}$ – индикаторная функция, $F_{\mu,\sigma}(x_i)$ – точное значение CDF для рассматриваемого распределения:

$$F_P(x_i) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathbb{I}\left(u_j \le u_i\right)$$

Выпишем используемые выражения для CDF относительно параметров μ, σ (соответственно, среднее арифметическое и выборочное стандартное отклонение):

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2} \tag{14}$$

Для нормального закона распределения (N) [18, 19]:

$$F_P(x) = \frac{1}{2}\cdot\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right], \tag{15}$$

где erf(…) – функция ошибок:

$$\operatorname{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^t e^{-u^2}\,du$$

Для логарифмически-нормального закона распределения (LN) [18, 19]:

$$F_P(x) = \frac{1}{2}\cdot\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \ln\frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2+\sigma^2}}}{\sqrt{2\ln\left(1+\frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)}}\right)\right] \tag{16}$$

Для распределения Вейбулла (W) [18, 19]:

$$F_P(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x\cdot\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}{\mu}\right]^k\right) \tag{17}$$

где гамма-функция:

$$\Gamma(t) = \int_0^\infty u^{t-1}e^{-u}\,du,$$

а параметр k находится численно как решение уравнения:

$$k:\quad \frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1$$

Для гамма-распределения (Gamma):

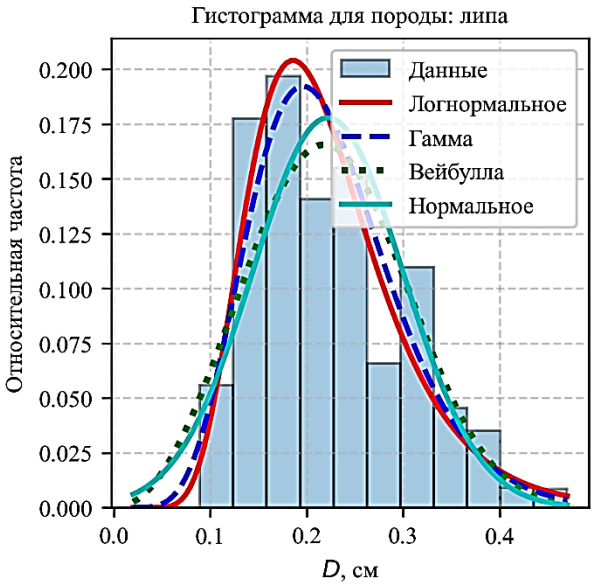
$$F_P(x) = \frac{\gamma\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}, \frac{\mu}{\sigma^2}x\right)}{\Gamma\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right)}, \tag{18}$$

где гамма-функции:

$$\Gamma\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right) = \int_0^\infty u^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}-1}e^{-u}\,du,$$

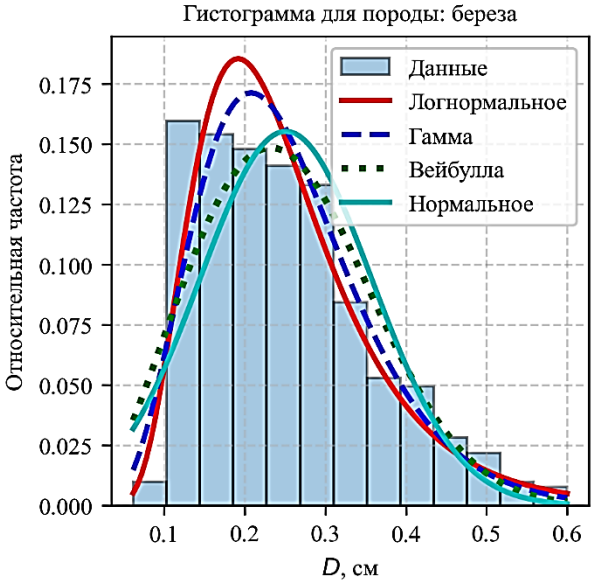
$$\gamma\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}, \frac{\mu}{\sigma^2}x\right) = \int_0^{\frac{\mu}{\sigma^2}x} u^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}-1}e^{-u}\,du$$

Приведём характерные примеры анализа распределения диаметров деревьев для некоторых пород в ведомости на рис. 4–7.



Логнормальное: μ=0.222, σ=0.078, EMD=0.0080
Гамма: μ=0.222, σ=0.076, EMD=0.0083
Вейбулла: μ=0.222, σ=0.080, EMD=0.0119
Нормальное: μ=0.222, σ=0.0777, EMD=0.0140
ЛУЧШАЯ МОДЕЛЬ: ЛОГНОРМАЛЬНОЕ

Рис. 4. Анализ распределения диаметров деревьев на высоте груди (липа)



Логнормальное: μ=0.251, σ=0.112, EMD=0.0086
Гамма: μ=0.251, σ=0.104, EMD=0.0070
Вейбулла: μ=0.252, σ=0.107, EMD=0.0115
Нормальное: μ=0.251, σ=0.1064, EMD=0.0177
ЛУЧШАЯ МОДЕЛЬ: ГАММА

Рис. 5. Анализ распределения диаметров деревьев на высоте груди (берёза)

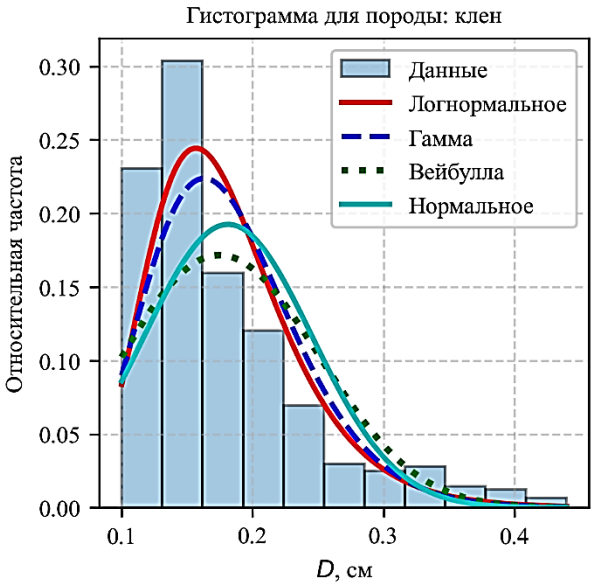


Рис. 6. Анализ распределения диаметров деревьев на высоте груди (клён)

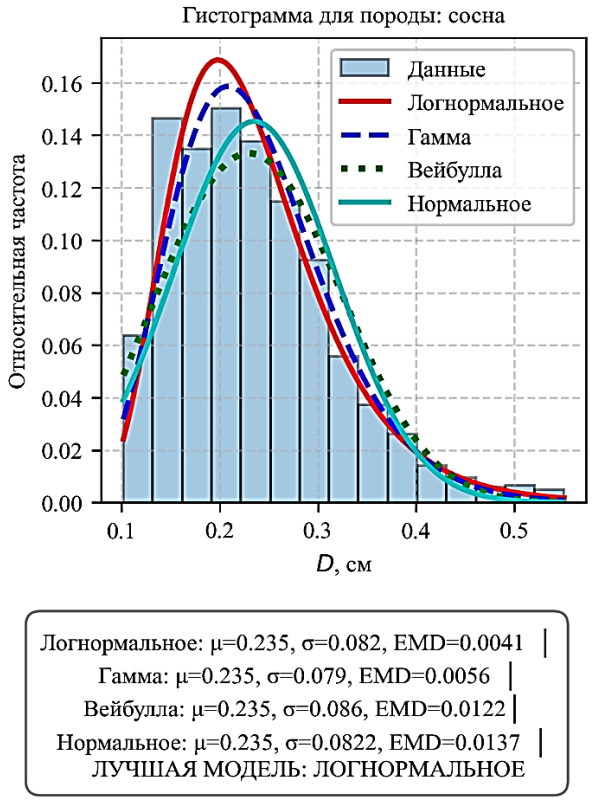


Рис. 7. Анализ распределения диаметров деревьев на высоте груди (сосна)

Результаты вычисления EMD для всех пород в перечётной ведомости с выбором наилучшего распределения среди рассматриваемых указаны в табл. 2. Курсивом в таблице отмечены те породы древесины, для которых число деревьев в ведомости недостаточно для статистически значимого заключения о распределении (приводятся для справки и должны быть уточнены в дальнейшем).

Таблица 2. Расчёт расстояния Вассерштейна для выбора закона распределения диаметров деревьев в древостое по породам

Порода	**LN**	**Gamma**	**W**	**N**
Липа	0,008023	0,008347	0,011858	0,013966
Осина	0,02091	0,022768	0,027977	0,028562
Берёза	0,008568	0,006996	0,011497	0,01767
Клён	0,010679	0,013134	0,020011	0,02004
Ель	*0,043408*	*0,039986*	*0,041125*	*0,061703*
Сосна	0,004093	0,005621	0,012218	0,013698
Ива	*0,0421*	*0,032451*	*0,02666*	*0,033363*
Дуб	*0,055283*	*0,039076*	*0,03427*	*0,039063*

Средние арифметические значения и выборочные стандартные отклонения для лучших выбранных распределений указаны в табл. 3.

Таблица 3. Средние арифметические значения и выборочные стандартные отклонения для лучших выбранных распределений по породам

Вид	**Распределение**	***μ***	***σ***	**Var**
Липа	Логнормальное	0,2218	0,0785	0,354
Осина	Логнормальное	0,1300	0,0391	0,301
Береза	Гамма	0,2511	0,1042	0,415
Клен	Логнормальное	0,1805	0,0568	0,314
Ель	*Гамма*	*0,2635*	*0,1468*	*0,557*
Сосна	Логнормальное	0,2351	0,0816	0,347
Ива	*Вейбулла*	*0,2278*	*0,0856*	*0,376*
Дуб	*Вейбулла*	*0,4821*	*0,1684*	*0,349*

Для распределения на основе перечётной ведомости покажем, как изменится процент деревьев, не обработанных при машинной заготовке, при снижении соотношения *r* на примере сосны (рис. 8).

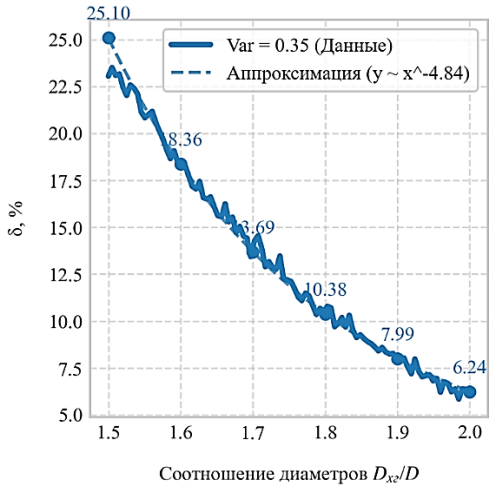


Рис. 8. Процент деревьев, не обработанных машиной

Заключение и перспективные направления дальнейших исследований. В результате обработки массива данных перечётной ведомости получены оценки параметров законов распределения диаметра деревьев по породам. Результаты позволяют уточнить имитационный подход в оценке деревьев, не обработанных при машинной заготовке. Результаты реализации предложенной имитационной модели несложно интерпретировать в числах: например, при среднем диаметре на высоте груди D = 22,78 см в сосновом древостое стандартная рекомендация по диаметру ЗСУ и харвестерной головки составляет ориентировочно $D_{\text{хг}}$ = 45,6 см; при этом около 6 % деревьев останутся необработанными по причине большего диаметра у пня (в вычислительном эксперименте коэффициент пересчёта диаметров варьируется как равномерно-распределённая случайная величина в пределах 1,2 … 1,3; впоследствии возможно уточнить параметры распределения $k_{\text{с}}$ на основе [20]). Если же снизить диаметр харвестерной головки до 41 см (соотношение r = 1,8), то останутся необработанными ориентировочно 10 % деревьев.

Важно отметить, что, поскольку чем меньше соотношение r, тем ниже расходы, связанные с машинной заготовкой, далее возникает задача оптимизации в «базовом» линейном виде:

$$L = r + C \cdot g(r, \mathrm{Var}) \to \min_{r} \qquad (19)$$

где C – коэффициент штрафа за деревья, не обработанные харвестером, который можно на начальном этапе ввести так:

$$C = \frac{C_{\text{маш}}}{C_{\text{мех}} - C_{\text{маш}}} \qquad (20)$$

где $C_{\text{маш}}$ – усреднённая себестоимость обработки одного дерева при применении машинной заготовки, $C_{\text{мех}}$ – усреднённая себестоимость обработки одного дерева при применении механизированной заготовки с использованием бензиномоторных пил.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 26-16-00047.

Литература

1. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П. Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3. С. 153–165.
2. Чайка О.Р. Методика оценки доступности деревьев для захвата при моделировании работы харвестера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2011. № 2. С. 89–91.
3. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80.
4. Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б. Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной энергоёмкости // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 4 (79). С. 69–74.
5. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжёвочных машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 108–113.
6. Lindroos O., Pettersson J., Nordfjell T. How stem size variations in forest stands influence harvester productivity and the use of productivity models // International Journal of Forest Engineering. 2024. Vol. 35, № 3. P. 389–398.
7. Hauglin M., Lindeman R., Astrup R. Assessing the Potential of Onboard LiDAR-Based Applications for Forest Harvesters // Forests. 2024. Vol. 15, № 5. P. 818.
8. Mederski P.S., Karaszewski Z., Bembenek M., Bamford P., Giefing D. F., Mederska M. The effect of tree and harvester size on productivity and costs in thinning operations // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 33, № 1. P. 45–55.
9. Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Киценко А.А., Васильева Е.А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 42–54.
10. Zhao Y., Im J., Zhen Z., Zhao Y. Towards accurate individual tree parameters estimation in dense forest: optimized coarse-to-fine algorithms for registering UAV and terrestrial LiDAR data // GIScience & Remote Sensing. 2023. Vol. 60, № 1. Art. 2197281.
11. Borghi C., Francini S., D'Amico G., Valbuena R., Chirici G. Advancements in Forest Monitoring: Applications and Perspectives of Airborne Laser Scanning and Complementarity with Satellite Optical Data // Land. 2025. Vol. 14, № 3. P. 567.
12. Rodda S.R., Nidamanuri R.R., Fararoda R. Evaluation of Height Metrics and Above-Ground Biomass Density from GEDI and ICESat-2 Over Indian Tropical Dry Forests using Airborne LiDAR Data // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2024. Vol. 52, № 4. P. 841–856.
13. Zhen Z., Du S., Cao L. Towards accurate individual tree parameters estimation in dense forest using UAV and terrestrial LiDAR data // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 18. P. 4567.
14. Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. № 2. С. 38–50.
15. Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В. [и др.] Математическая модель отбора деревьев с учетом заданной абсолютной полноты насаждения при проведении рубок ухода // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2026. № 3 (411). С. 82–94.
16. Боровков А.А. Математическая статистика, 5-е изд., стер. М. : ЛЕНАНД, 2021. 704 с.
17. Ширяев А.Н. Вероятность – 2. Математическая статистика, 7-е изд., перераб. и доп. М. : МЦНМО, 2021. 472 с.
18. Casella G., Berger R. L. Statistical Inference. 2nd ed. Australia; Pacific Grove : Cengage Learning, 2024. 688 p.
19. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. New York : Springer, 2023. 450 p
20. Малюков С.В., Поздняков Е.В., Дегтярева С.И., Шавков М.В., Малюкова М.А., Шанин И.И., Арико С.Е. Эксплуатация почвообрабатывающих орудий в условиях нераскорчеванных вырубок европейской части России: ана-

лиз препятствий в виде пней и корней // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 4. С. 96–113.

References

1. Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Vliyanie sostava drevostoya na vremennoy tsikl raboty kharvestera [Influence of stand composition on the harvester's time duty cycle]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [Russian Forestry Journal], 2024, no. 3, pp. 153–165.
2. Chayka O.R. Metodika otsenki dostupnosti derev'ev dlya zakhvata pri modelirovanii raboty kharvestera [Methodology for evaluating tree availability for felling head gripping in harvester operation modeling]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [Russian Forestry Journal], 2011, no. 2, pp. 89–91.
3. Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesiny na primere lesnogo kharvestera [Simulation modeling of the wood harvesting process on the example of a forest harvester]. Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin], 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80.
4. Savinykh T.I., Savinykh M.A., Yakimovich S.B. Comparative analysis of harvester-based timber harvesting methods based on productivity and specific energy intensity criteria // Forests of Russia and Their Management. 2021. No. 4 (79). Pp. 69–74.
5. Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. Computer simulation of felling area operations using feller-delimber-bucker machines // Systems. Methods. Technologies. 2022. No. 2 (54). Pp. 108–113.
6. Lindroos O., Pettersson J., Nordfjell T. How stem size variations in forest stands influence harvester productivity and the use of productivity models. International Journal of Forest Engineering, 2024, vol. 35, no. 3, pp. 389–398.
7. Hauglin M., Lindeman R., Astrup R. Assessing the Potential of Onboard LiDAR-Based Applications for Forest Harvesters. Forests, 2024, vol. 15, no. 5, p. 818.
8. Mederski P.S., Karaszewski Z., Bembenek M., Bamford P., Giefing D.F., Mederska M. The effect of tree and harvester size on productivity and costs in thinning operations. International Journal of Forest Engineering, 2022, vol. 33, no. 1, pp. 45–55.
9. Kovyazin V.F., Vinogradov K.P., Kitsenko A.A., Vasilyeva E.A. Airborne laser scanning for refining forest stand inventory characteristics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2020. No. 6. Pp. 42–54.
10. Zhao Y., Im J., Zhen Z., Zhao Y. Towards accurate individual tree parameters estimation in dense forest: optimized coarse-to-fine algorithms for registering UAV and terrestrial LiDAR data. GIScience & Remote Sensing, 2023, vol. 60, no. 1, art. 2197281.
11. Borghi C., Francini S., D'Amico G., Valbuena R., Chirici G. Advancements in Forest Monitoring: Applications and Perspectives of Airborne Laser Scanning and Complementarity with Satellite Optical Data. Land, 2025, vol. 14, no. 3, p. 567.
12. Rodda S.R., Nidamanuri R.R., Fararoda R. Evaluation of Height Metrics and Above-Ground Biomass Density from GEDI and ICESat-2 Over Indian Tropical Dry Forests using Airborne LiDAR Data. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2024, vol. 52, no. 4, pp. 841–856.
13. Zhen Z., Du S., Cao L. Towards accurate individual tree parameters estimation in dense forest using UAV and terrestrial LiDAR data. Remote Sensing, 2022, vol. 14, no. 18, p. 4567.
14. Rego G.E., Grigoryeva O.I., Grigoryev I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. Mathematical model of tree selection in a homogeneous stand during intermediate cuttings // Russian Forestry Journal. 2025. No. 2. P. 38–50.
15. Rego G.E., Grigoryeva O.I., Grigoryev I.V. [et al.] Mathematical model of tree selection accounting for a specified absolute stand density during intermediate cuttings // Russian Forestry Journal. 2026. No. 3 (411). P. 82–94.
16. Borovkov A.A. Matematicheskaya statistika [Mathematical Statistics]. 5th ed. Moscow, LENAND Publ., 2021. 704 p.
17. Shiryaev A.N. Veroyatnost' – 2. Matematicheskaya statistika [Probability – 2. Mathematical Statistics]. 7th ed., rev. and augm. Moscow, MCNMO Publ., 2021. 472 p.
18. Casella G., Berger R. L. Statistical Inference. 2nd ed. Australia; Pacific Grove, Cengage Learning, 2024. 688 p.
19. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. New York, Springer, 2023. 450 p.
20. Malyukov S.V., Pozdnyakov E.V., Degtyareva S.I., Shavkov M.V., Malyukova M.A., Shanin I.I., Ariko S.E. Operation of soil-tilling implements in uncleared cutover areas of the European part of Russia: analysis of obstacles in the form of stumps and roots // Forestry Engineering Journal. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 96–113.