

УДК 630*432

DOI 10.48612/ntp/8pnf-2zdf-72v2

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

С. П. КАРПАЧЕВ, С. В. ФРОЛОВ, Д. В. ФРОЛОВ, Е. Ю. ШУЛЯК

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: karpachevs@mail.ru,

Рассмотрены вопросы количественной оценки крупных лесных горючих материалов в виде лежащих на земле стволов древесины естественного отпада и их частей. Представлена математическая модель метода оценки запаса древесины отпада по промерным линиям отбора. Получены формулы для определения числа промерных линий в зависимости от запаса древесины отпада на участке и показателя точности. Предложена цифровая модель и комплекс компьютерных программ для моделирования процедуры оценки древесины отпада. Ошибка оценки запаса древесины отпада по результатам имитационного моделирования и по теоретическим формулам не превысила 1,5 %. Рекомендовано проводить оценку запаса крупных лесных горючих материалов по 70 линиям отбора.

Ключевые слова: лесные горючие материалы, древесина естественного отпада, метод линейных пересечений, цифровое моделирование.

DIGITAL MODELING FOR ASSESSING FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS

S. P. KARPACHEV, S. V. FROLOV, D. V. FROLOV, E. YU. SHULYAK

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
E-mail: karpachevs@mail.ru

The issues of quantitative assessment of large forest combustible materials in the form of lying on the ground trunks of dead wood of natural fall and their parts are considered. A mathematical model of the method of assessment of the stock of dead wood by sampling lines is presented. Formulas are obtained for determining the number of sampling lines depending on the stock of dead wood on the site and the accuracy indicator. A digital model and a complex of computer programs for modeling the procedure of assessment of dead wood are proposed. The error in estimating the stock of dead wood by simulation modeling and theoretical formulas did not exceed 1.5 %. It is recommended to estimate the stock of forest combustible materials using 70 sampling lines.

Keywords: forest combustible materials, dead wood, linear intersection method, digital modeling.

Введение

ГОСТ Р 70861-2023 определяет лесной горючий материал как растительный горючий материал в лесном биогеоценозе. Лесной горючий материал по степени горимости делят на проводников горения, поддерживающих горение и не поддерживающих горение. Проводники горения способны активно гореть и играют главную роль в возникновении лесных пожаров [1]. Проводники горения, в зависимости от степени горимости и их роли в возникновении пожаров, можно классифицировать по группам [2, 3, 4]. Наиболее пожароопасны (I группа) мелкие лесные горючие материалы, образующие сплошной слой растительного материала – опад, мхи,

лишайники [5]. Крупные лесные горючие материалы, такие как сухостойные деревья, валежник, ветровальные и снеговальные деревья, крупные сучья, порубочные остатки также относящиеся к проводникам горения (III группа пожарной опасности). Большей частью это древесина естественного отпада, лежащая на земле. Обычно древесина естественного отпада в виде валежника и крупных сучьев не образует сплошного слоя и в здоровом лесу их объем не превышает 10–15 м³/га. Однако при захлавлении 20–50 м³/га и более (рис. 1), древесина отпада становится опасным проводником горения. Мертвая древесина естественного отпада, пролежавшая 2–3 года, в сухой сезон особенно

пожароопасна. Она вызывает пламенное горение, создающее низовые пожары, которые сложны для тушения [6].

Природная опасность возникновения лесных пожаров напрямую зависит от накопленного объема древесины естественного отпада. Для планирования и проведения противопожарного обустройства леса важно знать

количественные и качественные характеристики этой древесины, например, запас, состояние древесины, процент влажности и т.п. [7]. В настоящей статье рассматриваются вопросы количественной оценки древесины естественного отпада в виде стволов и их частей. Далее – ДЕО.



Рис. 1. Пример скопления крупных горючих лесных материалов. Тверская область. Фото автора

Метод оценки запаса ДЕО

В статье для оценки запаса ДЕО рассматривается метод линейных пересечений [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Метод линейных пересечений – это статистический метод, который позволяет по выборке из некоторого количества стволов древесины естественного отпада сделать вывод об объемах и качестве всей ДЕО на участке леса. Отличительная особенность метода заключается в способе формирования статистической выборки древесины отпада. Выборка производится на пробном участке леса. Участок разбивают несколькими отрезками прямых линий одинаковой длины (далее – промерные линии), точки начала и конца которых на практике обозначают вешками. Для удобства проведения полевых измерений и последующих вычис-

лений, на практике пробный участок леса лучше разбивать в виде полос одинаковой ширины близкими по форме к прямоугольной. В этом случае промерные линии должны пересекать всю ширину участка. При этом промерные линии нужно ориентировать нормально к оси участка, как показано на рис. 2. Все стволы ДЕО, пересекающие промерные линии, учитываются. По учтенным стволам, как по статистической выборке, дается оценка всему скоплению ДЕО.

В теоретических исследованиях рассматривался 2D-плоский участок леса прямоугольной формы размером $L \times B$ в координатах X - Y , который пересекает промерная линия (рис. 2). Ствол ДЕО на рис. 2 представлен отрезком прямой линии длиной l .

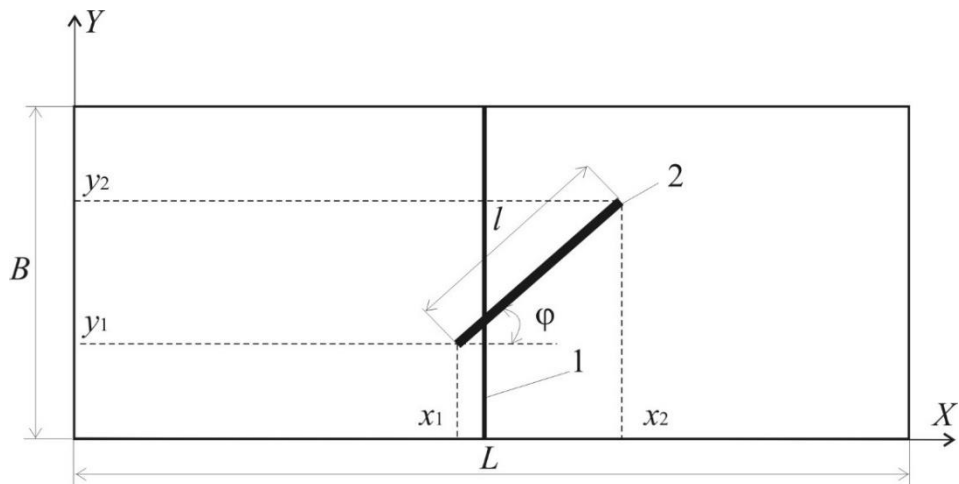


Рис. 2. 2D-схема модельного пробного участка леса.
На рисунке обозначено: 1 – промерная линия, 2 – ствол ДЕО в виде отрезка прямой

В общем случае вероятность пересечения ствола ДЕО промерной линией будет зависеть от длины участка L , длины ствола l и угла ориентации φ :

$$p = \frac{l}{L} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\varphi \cdot f(\varphi) \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол ориентации ствола ДЕО относительно оси OX участка;

$f(\varphi)$ – плотность распределения угла ориентации ствола ДЕО относительно оси OX участка.

В настоящей статье будем рассматривать случай равномерного закона распределения угла ориентации стволов ДЕО относительно оси OX . Такое распределение характерно для обследованных участков реального леса [14].

Тогда формула (1) преобразуется к виду [14]:

$$p = \frac{2l}{\pi L}. \quad (2)$$

Если на пробном участке находится N стволов ДЕО, то математическое ожидание, что ровно m стволов пересекнутся с промерной линией, определится по формуле:

$$M[m] = p \cdot N. \quad (3)$$

Дисперсия числа пересечений стволов ДЕО с промерной линией, определяемая как

$$D[m] = \sum_{m=0}^N (m - M[m])^2 \cdot p(m), \text{ будет равна:}$$

$$D[m] = p \cdot (1 - p) \cdot N. \quad (4)$$

Потребное число промерных линий n , необходимых для оценки количества стволов ДЕО на пробном участке леса можно определить по известной из математической статистики формуле [15]:

$$n = \left[\frac{V \cdot t}{P} \right]^2, \quad (5)$$

где V – коэффициент изменчивости, %;
 P – показатель точности, %;
 t – показатель достоверности.

На практике число стволов на участке можно определить через запас ДЕО:

$$N = N_s \cdot S \quad (6)$$

где N_s – запас стволов ДЕО на 1 га лесного участка;
 S – площадь участка леса, га.

По формуле (5) было определено потребное число промерных линий для разного запаса стволов ДЕО на участке, разных значений показателей точности P и показателя достоверности для уровня значимости $\alpha=0,05$. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица. Число промерных линий

Запас стволов ДЕО, шт./га	Потребное число промерных линий для показателя точности P :	
	5 %	20 %
20	1129	71
40	565	35
60	376	24
80	282	18
100	226	14

Потребное число промерных линий (табл.) зависит от количества стволов ДЕО на пробном участке леса и принятого показателя точности. Например, при относительно небольшом запасе ДЕО на участке леса, равном $N_s = 20$ шт./га, для показателя точности $P = 5\%$ потребуется 1129 промерных линий отбора, а для $P = 20\%$, только 71 промерная линия. Для практических целей оценки пожароопасности леса, точность $P = 5\%$ представляется избыточной. Однако, при $P = 20\%$, результаты, полученные по 71 промерной линии, могут значительно отклоняться от истинного значения запаса ДЕО на участке.

Цель цифрового моделирования – установить отклонение значений в оценке количества стволов ДЕО на пробном участке леса методом линейных пересечений по промерным линиям, число которых определялось для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и показателей точности $P = 5\%$ и $P = 20\%$.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели, с использованием математического аппарата теории метода линейных пересечений, была разработана математическая модель и комплекс компьютерных программ, которые имитировали процесс оценки количества стволов ДЕО по промерным линиям на пробном участке заданных размеров.

Компьютерные программы были написаны на языке Python с подключением библиотек NumPy и Matplotlib.

Пробный участок имел размеры 100×100 м. Программа позволяла назначать любые длины стволам ДЕО. В экспериментах все стволы были приняты длиной $l = 10$ м. При этом соблюдалось условие $l < L/2$.

После запуска, программа в пределах пробного участка генерировала заданное количество стволов ДЕО. Положение каждого ствола ДЕО определялось его углом ориентации и координатами.

Угол φ_i ориентации ствола ДЕО относительно оси OX был задан на интервале $[-\pi/2, +\pi/2]$ равномерным распределением.

Координаты начала ствола ДЕО на участке задавали по равномерному закону на интервалах $x_{1i} = [0, L]$ и $y_{1i} = [0, B]$.

Координаты конца каждого i -ого ствола ДЕО x_{2i}, y_{2i} вычисляли с учетом угла ориентации ствола и его длины:

$$x_{2i} = l + x_{1i} \cdot \cos \varphi_i, \text{ м} \quad (7)$$

$$y_{2i} = l + y_{1i} \cdot \sin \varphi_i, \text{ м} \quad (8)$$

Затем, на пробный участок, как показано на рис. 2 накладывалась промерная линия. Учитывались все стволы ДЕО, которые пересекли промерную линию. Для получения статистически значимых результатов программа позволяла генерировать любое количество пробных участков для опытов с ними.

В каждом последующем опытным прогоне модели, программа генерировала новый запас ДЕО на пробном участке, и процедура учета повторялась. Поскольку каждый прогон модели проводился с одной промерной линией, то число прогонов соответствовало числу промерных линий.

Программа позволяла генерировать любое количество стволов ДЕО с необходимым набором их характеристик. В программе для этого был создан тензор, состоящий из двумерных матриц, строки которых были равны запасу ДЕО на участке, а столбцы – характеристики каждого ствола ДЕО. Глубина тензора или число матриц было равно числу прогонов модели n . Таким образом, тензор хранил всю информацию о стволах ДЕО за все прогоны модели.

Факт пересечения i -ого ствола ДЕО с промерной линией устанавливали из условия:

$$(x_{2i} \geq x_{отб}) \& (x_{1i} \leq x_{отб}), \quad (9)$$

где $x_{отб}$ – координата промерной линии относительно оси OX участка.

Программа позволяла назначать любую координату $x_{отб}$ промерной линии. В экспериментах координата промерной линии для всех прогонов была принята постоянной $x_{отб} = 50$ м.

Если программа определяла факт пересечения ствола ДЕО с промерной линией как TRUE, то в соответствующую ячейку столбца матрицы для данного ствола ДЕО заносилось 1, если как FALSE, то 0.

По результатам имитационного моделирования из данных тензора определялось общее число пересечений стволов ДЕО в каждом прогоне модели. Эти результаты заносились в одномерный массив – вектор, длиной равной числу прогонов. Данные вектора представляли статистический ряд числа пересечений ДЕО с промерной линией в каждом прогоне модели. Ряд обрабатывался по правилам статистики, в частности определялись среднее число пересечений стволов ДЕО с промерной линией m и дисперсия s^2 . Оценка запаса ДЕО \tilde{N} на участке выполнялась по формуле:

$$\tilde{N} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (10)$$

Для проверки адекватности цифровой модели результаты моделирования сравнивались с теоретическими. Моделировались ДЕО с запасом стволов 20, 40, 60, 80, 100 шт./га. Число прогонов модели составило 10000, что соответствовало участку 10000 га и числу линий отбора $n = 10000$.

На рис. 3 показан пример визуализации компьютерной генерации стволов ДЕО на пробном участке леса размером 100×100 м, а также промерная линия. Пример приведен для запаса ДЕО $N_s = 80$ шт./га.

Оценка количества стволов ДЕО на пробном участке \tilde{N} , полученная в экспериментах, сравнивалась с истинным числом ДЕО N на пробном участке и вычислялась ошибка по формуле:

$$ERROR = \frac{N - \tilde{N}}{N} \cdot 100 \quad , \% \quad (11)$$

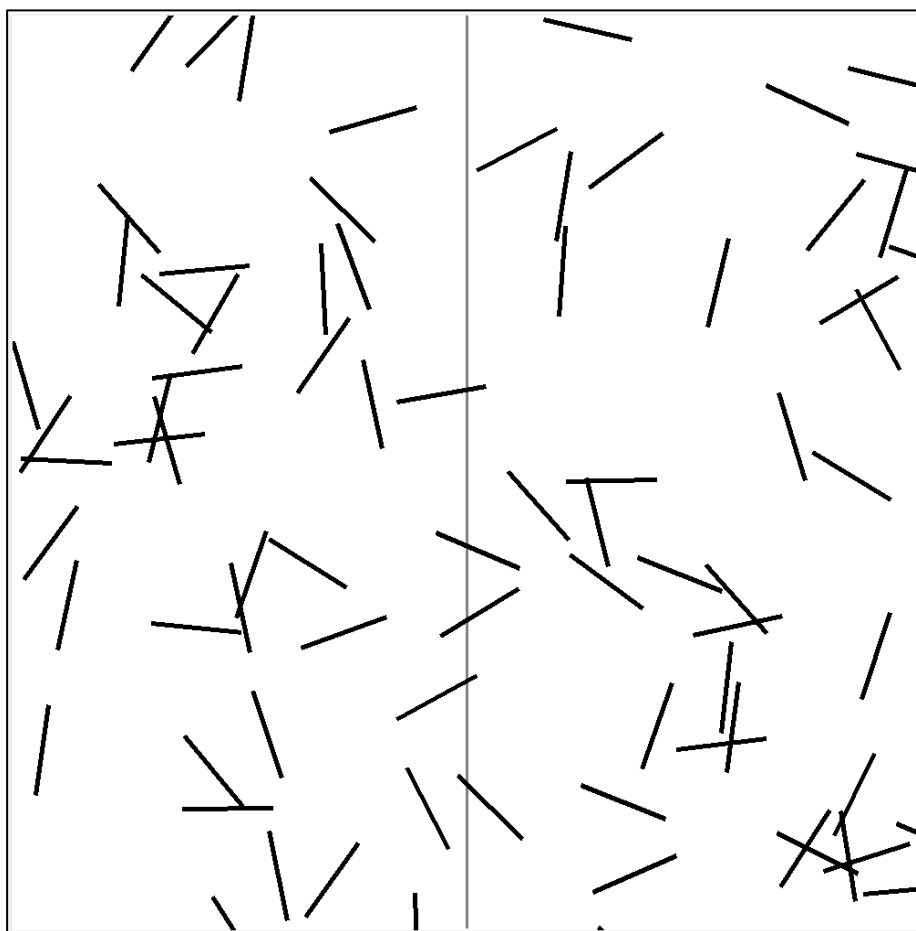


Рис. 3. Пробный участок леса размером 100×100 м с запасом ДЕО 80 шт./га. (Компьютерная генерация)

Результаты исследований

Данные имитационных экспериментов показали хорошее совпадение с результатами теоретических исследований. Отклонение в расчетах необходимого числа промерных линий по теоретическим формулам и полученные в результате экспериментов не превысило 1,5 %, что хорошо видно на графике рис. 4.

Для того, чтобы установить разброс значений в оценке количества стволов ДЕО по промерным линиям, число которых было определено ранее (табл.), в модель вводились массивы исходных данных: вектор варьируемых количеств стволов ДЕО $N_s = [20, 40, 60, 80, 100]$ и векторы наборов потребного числа промерных линий для $P = 20\%$, $n_{20\%} = [71, 35, 24, 18, 14]$, и $P = 5\%$, $n_{5\%} = [1129, 565, 376, 282, 226]$.

Имитационное моделирование проводилось с каждым набором промерных линий по 1000 прогонов. После каждого прогона модели с заданным набором промерных линий определялось среднее значение числа пересечений стволов ДЕО с одной промерной линией. Например, если набор промерных линий был принят равным 14, то после каждого прогона число всех пересечений стволов ДЕО со всеми 14-тью промерными линиями суммировалось, а затем делилось на 14. В результате получалось среднее значение пересечений стволов ДЕО с одной промерной линией. Эти данные по каждому прогону заносились в одномерный массив – вектор пересечений для данного комплекта промерных линий (в приведенном примере он равен 14).

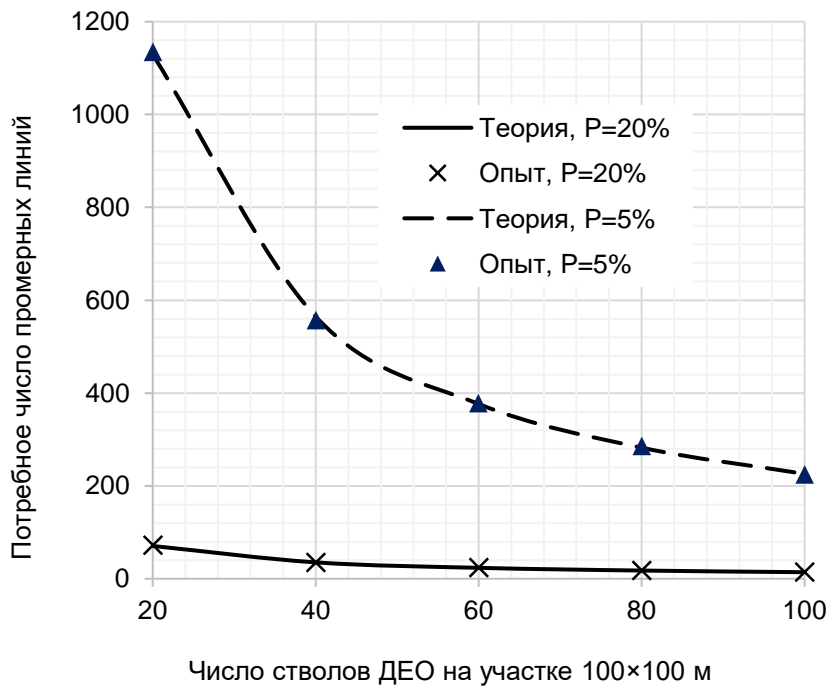


Рис. 4. Зависимость необходимого числа промерных линий от количества стволов ДЕО на пробном участке

Массив вектора пересечений представлял собой статистический ряд из 1000 значений средних пересечений стволов ДЕО с промерной линией в каждом прогоне модели для данного комплекта промерных линий. Для этого статистического ряда определялись медиана, квартили, наблюдаемые минимальное и максимальное значения оценок.

Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке для показателя точности $P = 20\%$ приведена на рис. 5. Диаграмма для показателя точности $P = 5\%$ – на рис. 6.

Диаграмма показывает пять ключевых статистических показателей: минимальное

значение, первый квартиль (25 %), медиану (50 %), третий квартиль (75 %), максимальное и минимальное значения в виде так называемых усов: верхнего и нижнего. Также на диаграмме кружками показаны аномальные выбросы, значения которых находятся за пределами доверительных интервалов.

Межквартильный диапазон колебания, в который укладывается 50 % всех оценок для $P = 20\%$, находится в пределах $\pm 7\%$ относительно среднего. Этот диапазон для $P = 5\%$ находится в пределах $\pm 1,5\%$ относительно среднего, что значительно меньше оценок для $P = 20\%$. Это хорошо видно из диаграмм на рис. 6 и рис. 7.

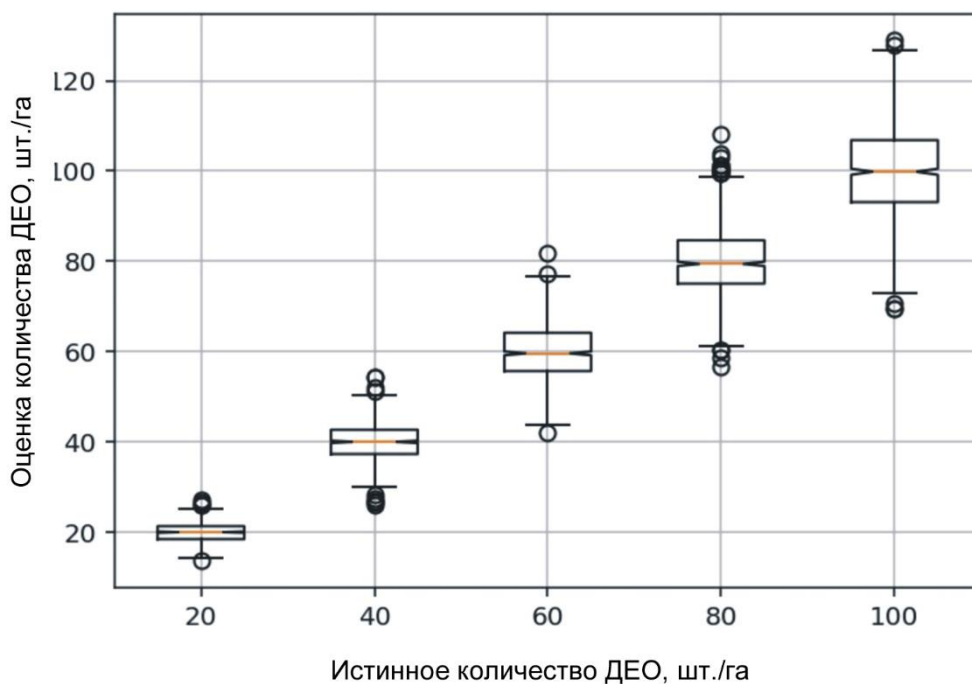


Рис. 5. Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке (показатель точности $P = 20\%$)

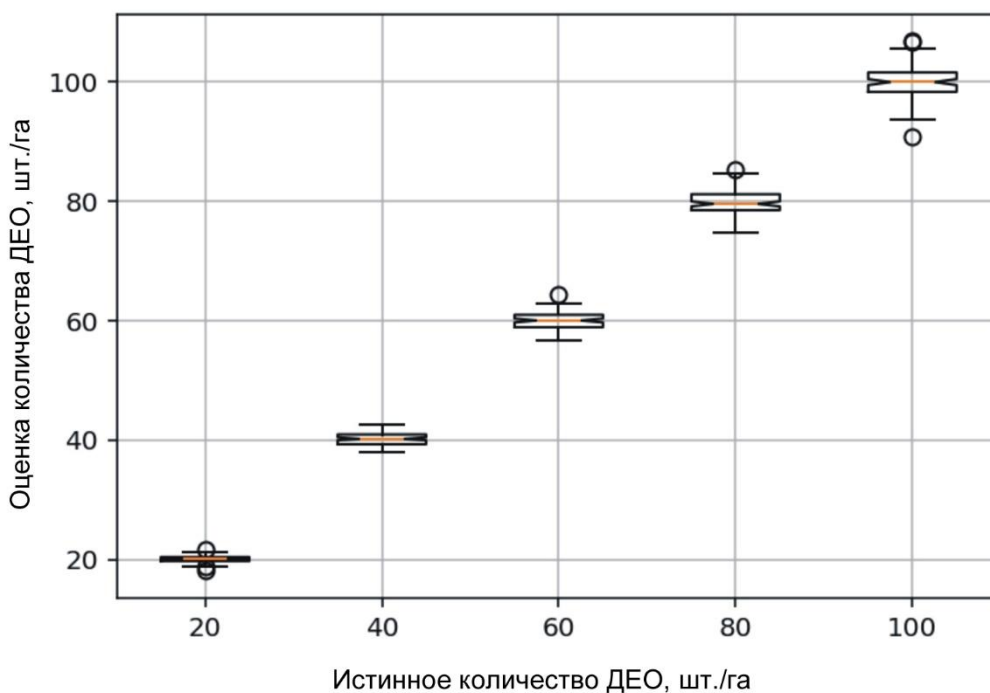


Рис. 6. Диаграмма размаха оценок количества стволов ДЕО на пробном участке (показатель точности $P = 5\%$)

Отметим, что если брать диапазон колебания, в который укладывается 99 % всех оценок, то для $P = 20\%$ этот диапазон находится уже в пределах $\pm 20-25\%$ относительно среднего, а для $P = 5\%$ – $\pm 5\%$.

Выводы

Определение количества стволов ДЕО на участке леса на практике может проводиться для коэффициента точности $P = 20\%$, при этом оценка будет находиться в пределах $\pm 20-25\%$.

Число промерных линий при количестве стволов ДЕО 20 шт./га и более, не будет превышать 70.

Эксперименты с цифровой моделью показали совпадение полученного потребного числа промерных линий с теоретическими данными в широком диапазоне варьирования количества стволов ДЕО на пробном участке. Разброс значений в оценке количества стволов

ДЕО по промерным линиям показал, что на практике для целей оценки природной пожарной опасности и противопожарного обустройства лесов можно в первом приближении проводить оценку количества стволов ДЕО методом линейных пересечений с показателем точности $P = 20\%$ по 70 линиям отбора, что приемлемо для практического использования метода.

Список литературы

1. Волокитина А. В. Разработка определителя типов основных проводников горения // Сибирский лесной журнал. 2023. № 6. С. 50–62. DOI: 10.15372/SJFS20230606. EDN: OFWQOF

2. Курбатский Н. П. О классификации лесных пожаров // Лесное хозяйство. 1970. №3. С. 68–73.

3. Аксенов С. Г. Разработка классификационной шкалы лесных пожаров / С. Г. Аксенов, Э. С. Насырова, М. А. Леонтьева [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 2 (17). С. 80–84. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.17.2.004. EDN: QESCAI

4. Плотникова А. С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем И. С. Мелехова. Обзор современных российских методических подходов // Вопросы лесной науки, 2021. Т. 4. № 2. Статья № 83. Выпуск: «Лесные пожары». DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2

5. Котельников Р. В., Мартынюк А. А. Показатель для оценки эффективности организации охраны лесов от пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 2. С. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

6. Заворотный А. Г., Лавлинский И. В. Оценка пожарной опасности лесов методами многомерного статистического анализа // Технологии гражданской безопасности. 2025. Т. 22, № 1 (83). С. 22–30. EDN: SQZALC

7. Волокитина А. В., Софронов М. А., Корец М. А. Проблема прогнозирования поведения лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 4. С. 41–48.

8. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters / Bate L., Torgersen T., Wisdom M. [et al.]. Forest Ecology and Management, 2009, vol. 258(5), pp. 635–640.

9. Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. Silva Balcanica, 2013, vol. 14 (1), pp. 83–93.

10. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method / S. P. Karpachev, V. I. Zaprudnov, M. A. Bykovskiy [et al.]. Croatian

journal of forest engineering, 2017, vol. 38 (2017) 1, pp. 33–45.

11. Linnel Nemes A.F., Davis G. Efficient of six line intersect sampling designs for estimation volume and density of coarse woody debris. Nanaimo: Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002.

12. Marshall P. L., Davis G., LeMay V.M., Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report TR-003 March, Research Section, Vancouver Forest Region, BCMOF, 2000, 34 p.

13. Analysis of sampling methods for coarse woody debris / Woldendorp G., Keenan R., Barry S. [et al.]. Forest Ecology and Management, 2004, vol. 198 (1), pp. 133–148.

14. Карпачев С. П., Щербачев Е. Н. Статистическая оценка количества и качества скоплений древесины, образующихся на лесных участках и в водоемах. М.: МГУЛ, 2013. 129 с.:

15. Кремер Н. Ш. Математическая статистика: учебник и практикум для вузов. 5-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2026. 259 с.

References

1. Volokitina A. V. Razrabotka opredelitel'ya tipov osnovnykh provodnikov goreniya [Development of an identifier for the types of main combustion conductors]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2023, issue 6, pp. 50–62. DOI: 10.15372/SJFS 20230606. EDN: OFWQOF

2. Kurbatsky N. P. O klassifikatsii lesnykh pozharov. [On the classification of forest fires]. *Lesnoe hozyajstvo*, 1970, issue 3, pp. 68-73.

3. Aksyonov S. G. Razrabotka klassifikatsionnoy shkaly lesnykh pozharov [Development of a classification scale for forest fires] / S. G. Aksyonov, E. S. Nasyrova, M. A. Leontyeva [et al.]. *Sibirskiy pozharo-spatatel'nyy vestnik*, 2020, vol. 2 (17), pp. 80–84, DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.17.2.004. EDN: QESCAI

5. Kotelnikov R. V., Martynyuk A. A. Pokazatel' dlya otsenki effektivnosti organizatsii okhrany lesov ot pozharov [An Indicator for Assessing the Effectiveness of Organizing Forest Fire Protection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy*

zhurnal, 2021, issue 2, pp. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

6. Zavorotny A. G., Lavlinsky I. V. Otsenka požarnoy opasnosti lesov metodami mnogomernogo statisticheskogo analiza [Assessment of forest fire hazard using multivariate statistical analysis methods]. *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti*, 2025, issue 22, vol. 1 (83), pp. 22–30, EDN: SQZALC

7. Volokitina A. V., Sofronov M. A., Korets M. A. Problema prognozirovaniya povedeniya lesnykh požarov [The problem of forecasting the behavior of forest fires]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010, vol. 19, issue 4, pp. 41–48.

8. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters / Bate L., Torgersen T., Wisdom M. [et al.]. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 258(5), pp. 635–640.

9. Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. *Silva Balcanica*, 2013, vol. 14 (1), pp. 83–93.

10. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method / S. P. Karpachev, V. I. Zaprudnov, M. A. Bykovskiy [et al.]. *Croatian journal of forest engineering*, 2017, vol. 38 (2017) 1, pp. 33–45.

11. Linnel Nemec A.F., Davis G. Efficient of six line intersect sampling designs for estimation volume and density of coarse woody debris. Nanaimo: Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002.

12. Marshall P. L., Davis G., LeMay V.M., Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report TR-003 March, Research Section, Vancouver Forest Region, BCMOF, 2000, 34 p.

13. Analysis of sampling methods for coarse woody debris / Woldendorp G., Keenan R., Barry S. [et al.]. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 198 (1), pp. 133–148.

14. Karpachev S. P., Shcherbakov E. N. *Statisticheskaya otsenka kolichestva i kachestva skopleniy drevesiny, obrazuyushchikhsya na lesnykh uchastkakh i v vodoyemakh* [Statistical assessment of the quantity and quality of wood accumulations formed in forest areas and water bodies]. Moscow: MGUL, 2013. 129 p.

15. Kremer N. Sh. *Matematicheskaya statistika: uchebnyk i praktikum dlya vuzov. 5-ye izd.* [Mathematical statistics: a textbook and practical training for universities. 5th ed.]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2026. 259 p.

Карпачев Сергей Петрович

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
доктор технических наук, профессор
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Karpachev Sergey Petrovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
Doctor of Technical Sciences, Professor
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Фролов Сергей Владимирович

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
кандидат физико-математических наук, доцент
Author ID: 1128865
ORCID: 0009-0008-8998-0143
E-mail: s_v_frolov@mail.ru

Frolov Sergey Vladimirovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor

Author ID: 1128865

ORCID: 0009-0008-8998-0143

E-mail: s_v_frolov@mail.ru

Фролов Денис Васильевич

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
старший преподаватель

Author ID: 759893

ORCID: 0009-0004-4121-4379

E-mail: dendiablo@mail.ru

Frolov Denis Vasilyevich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

Senior lecturer

Author ID: 759893

ORCID: 0009-0004-4121-4379

E-mail: dendiablo@mail.ru

Шуляк Екатерина Юрьевна

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва
преподаватель

E-mail: kasatka1091979@mail.ru

Shulyak Ekaterina Yurievna

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow

lecturer

E-mail: kasatka1091979@mail.ru