

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ОТПАДА В ЛЕСУ

С.П. Карпачев¹✉, В.И. Запруднов¹, С.В. Посыпанов²

¹ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

karpachevs@mail.ru

Рассмотрен комплекс санитарно-оздоровительных мероприятий в лесу, включающий в себя уборку древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада на всем участке леса с заданной точностью в реальном масштабе времени в процессе уборки. Рассмотрен вариант уборки отпада с переработкой древесины на щепу в лесу. Указаны основные машины осуществляющие уборку по технологическим полосам, в частности мобильная лебедка и рубительная машина. С использованием натурных данных, на математической модели проведены исследования оценки объема и качества древесины отпада методами имитационного моделирования на основе метода линейных пересечений. Установлено, что при объеме древесины отпада от 5 до 50 м³/га потребная общая длина технологических полос для показателя точности $P = 20\%$ находится в пределах от 500 до 6000 м. Определено, что ошибки между истинными значениями объема отпада и его оценками не превысили по абсолютной величине 11,3 %. Установлено, что время учета и оценки объема древесины отпада уменьшается с увеличением объема древесины отпада на участке. Установлено, что основными факторами являются длина технологических полос и объем древесины отпада на участке. Показано, что производительность на учете и оценке объема древесины отпада увеличивается с увеличением объема древесины отпада на участке.

Ключевые слова: древесина отпада, санитарно-оздоровительные мероприятия, метод линейных пересечений, имитационное моделирование, математическая модель

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Запруднов В.И., Посыпанов С.В. Моделирование технологии контроля и регулирования древесины отпада в лесу // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 170–182. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-170-182

В целях устойчивого развития урбанизированных лесных экосистем и неистощимого лесопользования следует проводить исследования скоплений древесины отпада в лесу, давать им оценку и регулировать накопление.

Под древесиной отпада понимают упавшие и лежащие на земле в лесу стволы деревьев, их части и ветви.

Падение деревьев в насаждении может быть вызвано различными причинами, в частности естественным отмиранием, связанным с жизнедеятельностью лесных биосистем и природными факторами, например, ветровалом, снеговалом и т. п.

Ежегодный естественный отпад древесины в лесах достигает большого объема. В Московской области такой объем составляет в среднем 2 м³/га или около 3 млн м³ на всю территорию области, занятую лесами [1]. С учетом

накопленного за годы отпада, его объем на отдельных участках леса превышает 20 м³/га. В захламленных лесах проводятся санитарные мероприятия с удалением древесины отпада, назначаемые по результатам лесопатологических обследований. Уборка древесины отпада актуальна прежде всего для часто посещаемых урбанизированных территорий леса.

К древесному отпаду, подлежащему удалению, относятся усыхающие, ветровальные и буреломные деревья, а также деревья, пораженные стволовыми вредителями. Часть древесины отпада можно использовать как биотопливо, например в качестве дров для местных нужд, а часть — следует оставить в лесу на перегнивание как удобрение [1–3]. В еловых древостоях этот объем составляет порядка 40 % запаса древостоя [4].

Таким образом, для оценки и прогнозирования развития лесопатологической ситуации в лесу, оценки возможного объема переработки отпада на биотопливо, информация об объеме

и качестве древесины отпада, степени поражения ее стволовыми вредителями и о других характеристиках является чрезвычайно важной. В настоящее время эту информацию получают в результате визуальных обследований участков леса [5]. На основе полученных таким путем данных о древесине отпада делается вывод о необходимости проведения санитарных мероприятий и планируются работы по уборке отпада. Точность визуальных оценок объема и качества отпада не велика и зависит от опыта учетчика. Вместе с тем для прогнозирования влияния отпада на санитарное состояние леса и определения объема древесины отпада, которую можно использовать, например для производства дров, необходима точная информация.

Цель работы

Цель работы — в рамках проведения санитарно-оздоровительных мероприятий предложить и исследовать технологию уборки древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада на обследуемом участке леса с заданной точностью и в реальном масштабе времени в процессе уборки (далее — технология уборки отпада).

Материалы и методы

Для оценки количественных и качественных характеристик древесины отпада используется метод линейных пересечений (МЛП) [6–28]. Он заключается в том, что на обследованном участке леса разбивают отрезки прямых линий в определенном порядке [1, 6, 25]. Эти линии в МЛП называют линиями отбора. Затем учитываются все стволы отпада, которые пересеклись с линиями отбора. По отпаду, как по статистической выборке, делают вывод о характеристиках совокупности древесины отпада на всем участке. С заданной точностью определяют объем древесины отпада, процент поражения отпада стволовыми вредителями, объем древесины, пригодной для переработки в полезную продукцию, например на топливную щепу или на дрова и т. д.

Математический аппарат МЛП сочетается с технологией уборки отпада мобильными машинами с лебедкой. Размотанный по участку трос лебедки, в теории МЛП, можно рассматривать как линию отбора. Длина троса лебедки зависит как от технических параметров машины, так и от природных характеристик леса, в частности от плотности растущего древостоя. На практике

длина троса составляет 20...30 м. Как показал опыт работы в лесу, линию троса такой длины в среднем пересекают 1–2 ствола древесины отпада.

В лесу учет отпада удобно проводить не по всему участку, а по технологическим полосам, на которые предварительно разбивают обследуемый участок леса.

Рассматриваемая технология уборки отпада по МЛП предусматривает выполнение нескольких последовательных действий (рис. 1).

На первом этапе работ участок леса, на котором проводят оценку и уборку древесины отпада, разбивают на технологические полосы шириной, равной или больше чем максимальная длина стволов отпада ($b > l_{\max}$).

Далее в начале каждой технологической полосы устанавливают мобильную лебедку. После этого рабочий-чокеровщик разматывает трелевочный трос на всю длину, двигаясь вдоль технологической полосы по прямой линии. Все стволы отпада, оказавшиеся на линии троса, учитываются, при этом измеряется их длина и диаметр. Дополнительно, в зависимости от целей оценки отпада, можно проводить учет деловой части стволов, степень их поражения вредителями, гнилью, определять породу и другие характеристики.

После учета, отпад трелюют с каждой технологической полосы с помощью лебедки в начало полосы, где его оставляют в пачках для дальнейшей переработки, например измельчения, переработки на дрова или разделки на коротыши с последующей укладкой в поленицы на перегнивание в лесу.

Следует отметить, что в случае сильно захламленных полос сначала обозначают линию троса, например вешками и трелевку начинают с ближайших к лебедке стволов отпада. Учет отпада в этом случае проводят по мере очистки полосы.

Пересеченный тросом лебедки отпад является статистической выборкой, по которой, используя математический аппарат МЛП, можно определить характеристики всего отпада на участке. Причем если результаты учета сразу заносить, например в карманный компьютер, то оценку отпада можно получать в реальном масштабе времени и в соответствии с этими данными оперативно вносить корректировку в процесс уборки отпада. Точность оценки зависит от объема выборки, т. е. числа учтенных стволов отпада по технологическим полосам. Благодаря этому, с переходом от одной технологической полосы к каждой последующей увеличивается объем выборки и, следовательно, точность оценки будет расти.

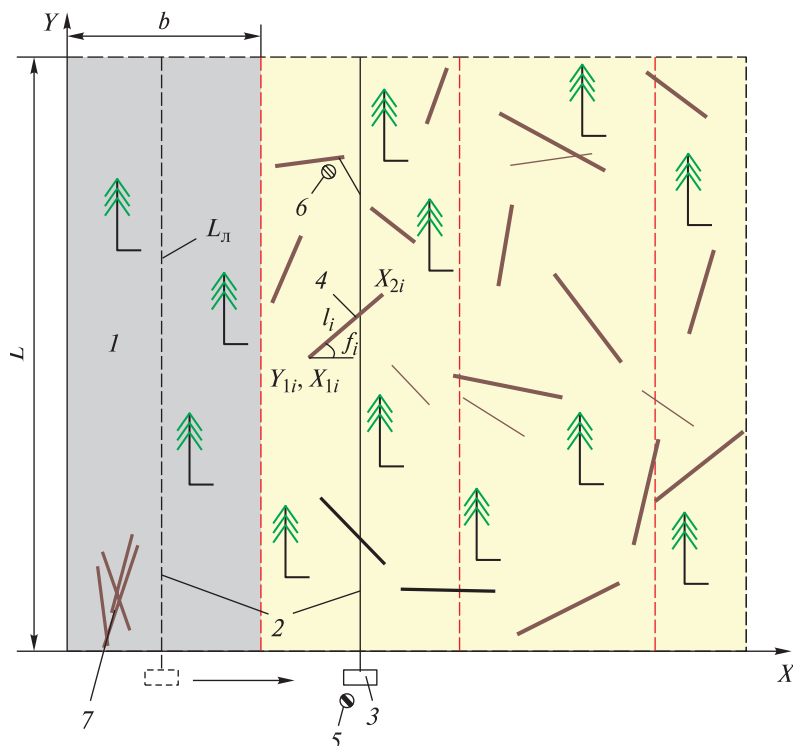


Рис. 1. Схема учета и уборки древесины отпада: 1 — технологическая полоса; 2 — трелевочный трос лебедки; 3 — лебедка; 4 — ствол древесины отпада; 5 — оператор лебедки; 6 — чокеровщик; 7 — стрелеванная с технологической полосы пачка древесины отпада; X_{1i} , Y_{1i} — координаты вершины i -го ствола отпада; X_{2i} , Y_{2i} — координаты комля i -го ствола отпада; l_i — длина i -го ствола отпада; f_i — угол ориентации i -го ствола отпада; b — ширина технологической полосы; L_n — длина троса лебедки

Fig. 1. Scheme of accounting and harvesting of waste wood: 1 — technological strip; 2 — skidding winch cable; 3 — winch; 4 — fallen timber trunk; 5 — winch operator; 6 — choker; 7 — fallen timber bundle shot from the technological strip; X_{1i} , Y_{1i} — coordinates of the top of the i -th fallen wood bundle; X_{2i} , Y_{2i} — coordinates of the top of the i -th fallen wood bundle; l_i — length of the i -th waste wood bundle; f_i — orientation angle of the i -th fallen wood bundle; b — width of the technological strip; L_n — length of the winch cable

Объем древесины отпада, приходящийся на 1 га площади участка, определяется по формуле

$$V_{\text{га}} = \frac{5000\pi}{L_n l_{\text{cp}}} \left(\frac{\sum_{i=1}^k v_i}{n} \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{га}}$ — объем древесины естественного отпада, приходящийся на 1 га площади участка, м³/га;

L_n — длина троса лебедки, м;

l_{cp} — средняя длина ствола древесины отпада, м;

v_i — объем i -го ствола древесины естественного отпада, пересекшегося с тросом лебедки, м³;

k — число стволов древесины естественного отпада, пересекшихся на n технологических полосах с тросом лебедки, шт.;

n — число технологических полос, шт.

Средняя длина ствола древесины отпада определяется по результатам измерения длины всех стволов отпада, пересекшихся с линией троса на всех n технологических полосах

$$l_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{n}. \quad (2)$$

Объем i -го ствола древесины естественного отпада v_i , пересекшегося с тросом лебедки, может быть определен как объем цилиндра



Рис. 2. Стволовые части древесины отпада с сучьями (Тверская область, фото С.П. Карпачева)

Fig. 2. Stem parts of waste wood with branches (Tver region, photo by S.P. Karpachev)

или усеченного конуса по результатам прямых измерений его диаметра и длины.

Стволы отпада могут значительно отличаться от цилиндров и конусов. Иногда отпад представляют упавшие деревья с сучьями и ветками (рис. 2). Если требуется высокая точность оценки объема отпада, например в исследовательских целях, то в формуле (1) объем ствола древесины отпада уместно рассматривать как его атрибут. На практике значение этого атрибута можно получить по результатам измерения объема щепы, полученной в результате измельчения отпада. Тогда объем древесины в плотных кубических метрах (пл. м³) всего стрелеванного отпада будет равен

$$\sum_{i=1}^k v_i = K_{\text{пдр}} \sum_{i=1}^k v_{\text{щ}_i}, \quad (3)$$

где $v_{\text{щ}_i}$ — насыпной объем щепы, полученный из i -го ствола древесины отпада, пересекшегося с тросом лебедки, нас.м³;

$K_{\text{пдр}}$ — коэффициент полнодревесности щепы.

Для определения объема щепы по формуле (3) может применяться объемный или весовой метод учета щепы. Для этого рубительная машина должна быть снабжена устройством для учета щепы. В самом простом виде это может быть мерная емкость, например мягкий контейнер типа *bigbag* объемом 1 м³.

Математический аппарат МЛП, применяемый в рассматриваемой технологии уборки отпада, позволяет определять кроме объема и другие характеристики древесины отпада, в частности долю той или иной породы в скоплении отпада, степень поражения древесины вредителями, долю деловой древесины и пр. [1, 3, 25]. Например, процент древесины, пригодной для переработки на топливную щепу или на дрова, в общем объеме отпада может быть установлен по выборке пересеченных тросом стволов отпада по формуле

$$P_V = \frac{V_{\text{сум}} - V_{\text{тщд}}}{V_{\text{сум}}} 100, \quad (4)$$

где $V_{\text{сум}}$ — общий объем древесины в выборке отпада, м³;

$V_{\text{тщд}}$ — объем древесины, пригодной для переработки в топливную щепу (дрова), м³.

Следует иметь в виду, что полусгнившая и сгнившая часть древесины отпада не может быть стрелевана (рис. 3). Такую древесину, попавшую на линию троса, учитывают и оставляют на месте ее нахождения.

Точность и эффективность оценки отпада была исследована на математических моделях методами имитационного моделирования [29–41]. Моделировался участок леса с технологическими полосами размером $L \times b$. Считалось, что



Рис. 3. Частично и полностью сгнившая древесина отпада, не подлежащая трелевке (Тверская область, фото С.П. Карпачева)

Fig. 3. Partially and completely rotten waste timber not subject to skidding (Tver Oblast, photo by S.P. Karpachev)

через середину ширины каждой технологической полосы по всей ее длине проходит трос лебедки, который в модели представлялся в виде отрезка прямой линии.

В имитационных экспериментах использовались данные визуального и инструментального обследования древесины отпада на лесных участках в Тверской области (Селижаровский район, 2020–2024 гг., см. рис. 2, 3), характеризующиеся высокой степенью захламленности (более 20 м³/га). Стволы древесины отпада представляли собой упавшие деревья разных лет. Уборка отпада на этих участках леса не проводилась.

Для древесины отпада были приняты следующие законы распределения:

- координат стволов древесины отпада по участку — равномерный;
- угла ориентации стволов отпада по участку — равномерный;
- длины стволов отпада — нормальный.

В модели по каждому i -му стволу отпада на технологической полосе определяли (см. рис. 1) координаты верхней части X_{1i} и Y_{1i} , угол ориентации f_i , длину l_i , которые разыгрывались по принятым выше законам.

Координата ствола отпада в его верхней части X_{1i} определялась на интервале

$$0 < X_{1i} \leq b, \quad (5)$$

где b — ширина технологической полосы (в модели принята равной 20 м).

Угол ориентации ствола отпада f_i на участке определялся на интервале

$$-\frac{\pi}{2} < f_i \leq +\frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

Координата нижней части ствола отпада X_{2i} определялась расчетом

$$X_{2i} = X_{1i} + l_i \cos f_i. \quad (7)$$

Факт пересечения ствола отпада с тросом лебедки в данной технологической полосе определялся условием

$$X_{1i} < \frac{b}{2}; \quad X_{2i} \geq \frac{b}{2}. \quad (8)$$

Координата Y_{1i} ствола отпада в его верхней части определялась на интервале

$$0 < Y_{1i} \leq L, \quad (9)$$

где L — длина технологической полосы, равная максимальной длине троса лебедки $L_{л. \max}$.

Для j -й технологической полосы координата Y_{1i} в модели принималась равной

$$Y_{1i} = L_{л. ji}, \quad (10)$$

где $L_{л. ji}$ — текущая длина троса лебедки, где произошло пересечение со стволом отпада.

Длина ствола отпада l_i устанавливалась по нормальному закону со средним значением 8 м и стандартным отклонением 1 м.

Каждому стволу древесины отпада назначался атрибут — его объем v_i , который зависит от его диаметра и длины. Собранные нами данные натурных измерений не выявили корреляцию между этими величинами. Исходя из этого в модели объем ствола отпада определяли независимо от его длины по нормальному закону со средним значением 0,2 м³ и стандартным отклонением 0,05 м³. Точность оценки общего объема древесины отпада на участке определяли по формуле (1).

Полученную в экспериментах оценку объема сравнивали с его действительным значением и определяли ошибку оценки по формуле

$$\text{Error} = \frac{V_{\text{оц}} - V_{\text{д}}}{V_{\text{оц}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где $V_{\text{оц}}$ — оценка объема древесины естественного отпада на участке, м³/га;

$V_{\text{д}}$ — действительный объем древесины отпада на участке, м³/га.

Количество технологических полос, необходимое для оценки объема древесины отпада на участке, определялось для показателя точности $P = 20 \%$ с вероятностью результата 0,95. На практике, в первом приближении, число технологических полос можно установить по результатам первичного визуального лесопатологического обследования с последующей корректировкой по результатам фактического учета отпада на технологических полосах.

В модели было задано количество стволов отпада на участке. Потребное число технологических полос определялось по формуле

$$n_L = \frac{Var \cdot t^2}{P^2}, \quad (12)$$

где Var — коэффициент вариации, %;

P — показатель точности, %;

t — показатель достоверности.

Коэффициент вариации определи по формуле

$$Var = \frac{100\sigma}{M}, \quad (13)$$

где σ — стандартное отклонение;

M — математическое ожидание числа стволов отпада, пересекших линию троса лебедки в данной технологической полосе.

Математическое ожидание числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки определяли по формуле

$$M = pN_{\text{сум}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{сум}}$ — общее число стволов древесины отпада на технологической полосе, шт.;

p — вероятность пересечения линии троса лебедки со стволом древесины отпада, определяемая уравнением

$$p = \frac{2l_{\text{ср}}}{b\pi}. \quad (15)$$

Стандартное отклонение определяли по формуле

$$\sigma = \sqrt{p(1-p)N_{\text{сум}}}. \quad (16)$$

Для оценки эффективности технологии уборки древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада достаточно рассмотреть только работу лебедки, поскольку именно на этом этапе производится учет отпада. Для более полной оценки предложенной технологии уборки отпада следует рассмотреть весь технологический процесс, включая и переработку собранного отпада.

В настоящее время при очистке леса от захламленности собранную древесину отпада либо распиливают бензопилами на короткие бревна и укладывают в поленницы для дальнейшего перегнивания в лесу, либо измельчают в щепу, которую оставляют на месте [29–35]. В настоящей работе рассмотрен вариант технологии, когда всю собранную древесину отпада измельчают на щепу. При этом часть щепы остается в лесу на удобрение, а часть используется как топливная щепа для нужд биоэнергетики.

По принятой технологии общее время цикла $T_{\text{сум}}$ на выполнение операций на каждой технологической полосе, включающее в себя время на учет отпада, трелевку и переработку его на щепу, будет составлять

$$T_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^n \left((t_{1j} + t_{2j}) + \sum_{i=1}^{N_j} (t_{3ji} + t_{4ji} + t_{5ji}) \right), \quad (17)$$

где n — число технологических полос на участке;

N_j — число стволов отпада на j -й технологической полосе;

t_{1j} — время перемещения мобильной рубительной машины к j -й технологической полосе, с;

t_{2j} — время на разматывание троса лебедки и учета числа пересечений стволов древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{3ij} — время на чокеровку i -го ствола древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{4ij} — время трелевки i -го ствола древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{5ij} — время на измельчение i -го ствола древесины отпада в щепу и ее учета на j -й технологической полосе, с.

В случае если пересечение стволов отпада равно нулю, то, соответственно, время цикла на такой технологической полосе определяется как

$$T_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^n (t_{1j} + t_{2j}). \quad (18)$$

Отметим, что все временные циклы являются случайными величинами. В модели все циклы были заданы как случайные величины, распределенные по экспоненциальному закону.

Часовую производительность без учета простоев определяли как сумму всего стрелеванного и оцененного отпада за 1 ч

$$П_{\text{ч}} = \frac{3600V_{\text{сум}}}{T_{\text{сум}}}, \quad (19)$$

где $V_{\text{сум}}$ — общий объем стрелеванной и оцененной древесины отпада, м³.

Результаты и обсуждение

При планировании имитационных экспериментов была принята длина технологической полосы, равной длине троса лебедки 20 м (она же длина линии отбора в теории МЛП). Ширина полосы $b = 20$ м.

Число стволов древесины отпада на участке определялось как отношение среднего объема древесины отпада на участке к среднему объему одного ствола отпада.

Матрица планирования имитационных экспериментов для оценки объема древесины отпада на участке представлена в таблице.

Как следует из формулы (12), необходимое число технологических полос уменьшается по степенной зависимости с увеличением количества стволов древесины отпада на полосе. На практике уместно определять не необходимое число технологических полос, а их общую длину — суммарную длину полос, равную суммарной длине линий троса лебедки. По результатам экспериментов была получена такая зависимость (рис. 4). Для показателя точности $P = 20$ % потребная суммарная длина технологических полос находится в пределах от 500 до 6000 м при изменении объема древесины отпада от 50 до 5 м³/га.

Для того чтобы на практике определить потребную суммарную длину технологических полос для получения характеристик отпада с заданной точностью, можно воспользоваться графиком зависимости среднего числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки. На рис. 5 представлена зависимость числа пе-

Матрица планирования имитационных экспериментов

Simulation experiments planning matrix

Номер опыта	Заданный объем древесины отпада на участке, м ³ /га	Расчетное число стволов древесины отпада на участке, шт./га	Расчетный объем древесины отпада на полосе, м ³ /полоса	Расчетное число стволов древесины отпада на полосе, шт./полоса
1	5	25	0,2	1
2	10	50	0,4	2
3	15	75	0,6	3
4	20	100	0,8	4
5	25	125	1	5
6	30	150	1,2	6
7	35	175	1,4	7
8	40	200	1,6	8
9	45	225	1,8	9
10	50	250	2	10

ресечений стволов отпада на технологической полосе длиной 20 м, что соответствует длине линии троса лебедки, позволяющая уже после учета стволов отпада на 10...20 технологических полосах определить по среднему числу пересечений примерный объем древесины отпада и по графику (см. рис. 4) установить потребную суммарную длину технологических полос. В дальнейшем в процессе учета отпада следует постоянно переоценивать объем отпада и корректировать потребную суммарную длину технологических полос.

Точность оценки объема древесины отпада устанавливали по расхождению между истинным значением объема и его оценкой. В сериях экспериментов (рис. 6) были получены оценки объема древесины отпада и их истинные значения в зависимости от объема древесины отпада.

Анализ результатов серий имитационных экспериментов показал, что ошибки в оценке объема между истинными значениями объема отпада и его оценками, рассчитанными по формуле (11), не превысили по абсолютной величине 11,3 %. При этом отклонение оценок не зависит от объема отпада на участке (см. рис. 6).

Результаты имитационного моделирования позволили установить потребное время на учет и оценку объема древесины отпада на участке (рис. 7) по формулам (17) и (18). Кроме того, была установлена производительность труда по учету и оценке объема отпада на участке (рис. 8) по формуле (19).

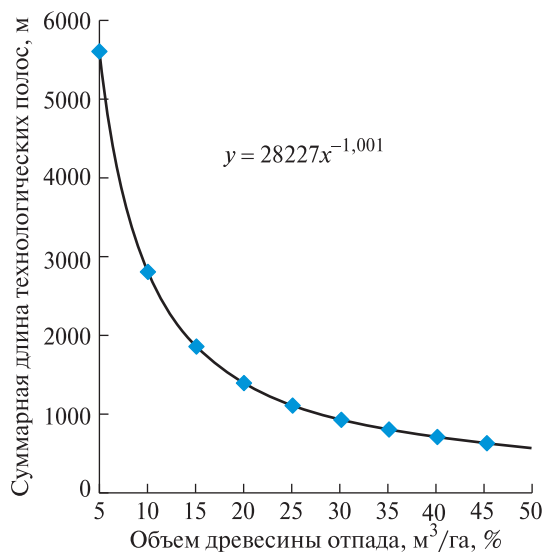


Рис. 4. Зависимость необходимой суммарной длины технологических полос от объема древесины отпада
Fig. 4. Dependence of the required total length of technological strips on the volume of waste wood

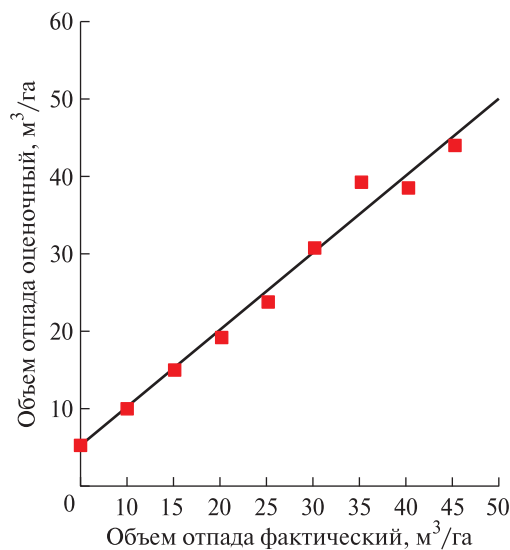


Рис. 6. Оценка и истинные значения объема древесины отпада
Fig. 6. Estimated and true values of waste wood volume

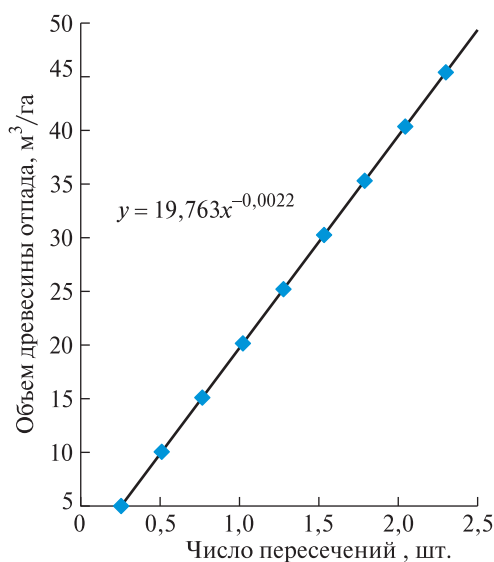


Рис. 5. Зависимость объема древесины отпада на участке от числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки на технологической полосе длиной 20 м
Fig. 5. Dependence of the volume of waste wood on the site on the number of crossings of fallen trunks with the winch cable line on the 20 m long technological strip

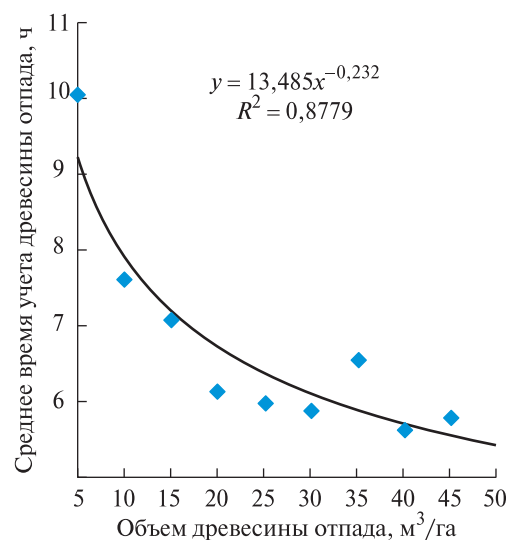


Рис. 7. Потребное время на учет древесины отпада
Fig. 7. Time required to count waste wood

Под производительностью следует понимать учитываемый объем древесины отпада за 1 ч.

В имитационных экспериментах по определению затрат времени и уровня производительности при учете и оценке объема отпада временные циклы были заданы на основе ограниченных выборок хронометража

отдельных операций и разной степени захламливаемости полос, поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем при совершенствовании приемов оценки возможны уменьшение времени на учет и оценку объема отпада и повышение производительности.

Как и ожидалось, время учета уменьшается с увеличением объема древесины отпада на участке. Основным фактором здесь служит уменьшение суммарной длины технологических полос с увеличением объема древесины отпада на участке (см. рис. 4). Однако эта зависимость не является линейной. Так, например, время на учет и оценку отпада составило:

- 10 ч для объема отпада 5 м³/га;
- 6 ч при объеме отпада 25 м³/га;
- 5,6 ч для объема отпада 50 м³/га.

Это связано с тем, что с увеличением объема отпада число стволов отпада, пересекающих линию троса лебедки (а именно эти стволы необходимо учитывать) увеличивается, при этом общая потребная длина технологических полос уменьшается.

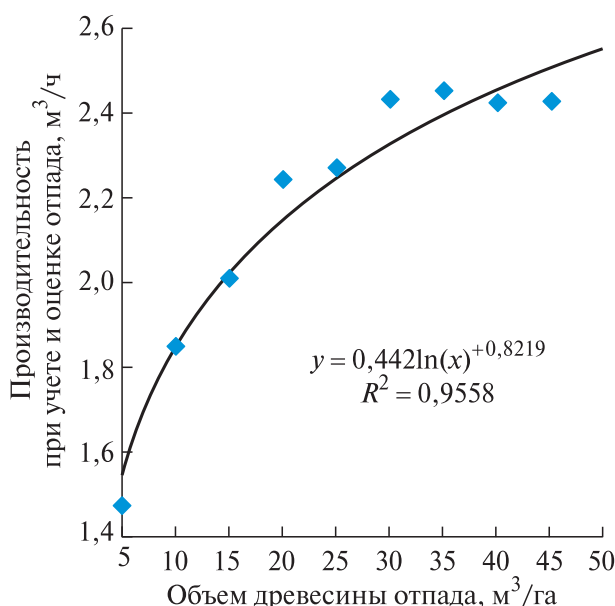


Рис. 8. Производительность при учете отпада в зависимости от объема древесины отпада

Fig. 8. Productivity depending on waste volume

Характер изменения времени на учет и оценку объема отпада (см. рис. 7) отражается и на производительности (см. рис. 8).

Производительность при учете и оценке объема древесины отпада повышается с увеличением объема древесины отпада на участке. Эта зависимость также не является линейной. Например, производительность при учете и оценке объема отпада составила:

- 1,472 м³/ч для объема отпада 5 м³/га;
- 2,270 м³/ч для объема отпада 25 м³/га;
- 2,464 м³/ч для объема отпада 50 м³/га.

Обращает на себя внимание тот факт, что производительность на интервале 30...50 м³/ч в экспериментах не повышалась (см. рис. 8).

Выводы

Предложена технология уборки древесины отпада, позволяющая проводить одновременно с уборкой оценку отпада на всем участке леса, в частности его объем, долю деловой древесины, степень поражения гнилью и т. п. В процессе уборки в реальном масштабе времени определяется объем убранного отпада и объем еще остающегося на участке древесины отпада. Это позволяет регулировать объемы убираемой и оставляемой древесины отпада в лесу.

Рассмотрена технология уборки отпада мобильной лебедкой на технологических полосах с одновременной оценкой объема и характеристик древесины отпада. Результаты учета позволяют получать оценки характеристик древесины отпада с заданной точностью.

Заданный показатель точности определяется суммарной длиной технологических полос, которая принимается равной максимальной длине троса лебедки. Так, для показателя точности $P = 20\%$ потребная суммарная длина технологических полос находится в пределах от 500 м до 6000 м при изменении объема древесины отпада от 50 до 5 м³/га.

На практике первоначальную оценку объема отпада рекомендуется проводить по результатам его учета на технологических полосах суммарной длиной 200...600 м. В процессе уборки отпада следует корректировать его объем за счет дополнительного учета отпада.

Предложенный метод обеспечивает быстрое и более надежное получение результатов оценки и регулирования древесины отпада при проведении санитарно-оздоровительных мероприятий в лесу по сравнению с известными методами.

Список литературы

- [1] Карпачев С.П., Диев Р.И. Моделирование технологических процессов уборки древесины естественного отпада на нужды биоэнергетики // Техника и оборудование для села, 2017. № 6. С. 46–48.
- [2] Мошников С.А., Ананьев В.А. Запас древесного детрита основных насаждений Южной Карелии // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2013. № 2. С. 22–28.
- [3] Tiryana T. Simulating harvest schedule for timber management and multipurpose management in teak plantation // Journal Manajemen Hutan Tropika, 2016, v. 22 (1), pp. 1–12. <http://dx.doi.org/10.7226/jtfm.2.1.1>.
- [4] Сергиенко В.Г., Иванов А.М., Власов Р.В., Антонов О.И. Древесный отпад и биоразнообразие на участках выборочных рубок в Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2015. № 3. С. 4–19.

- [5] Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к приказу Рослесхоза от 29.12.2007. № 523. 32 с.
- [6] Andini S., Budiaman A., Muhdin M. Development of Line Intersect Method for Logging Residue Assessment of Teak // *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2017, v. 23(2), pp. 51–60.
- [7] Daniel P. Bebbier and Sean C. Thomas. Prism sweeps for coarse woody debris // *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1737–1743.
- [8] Bouriaud O., Stefan G., Flocea M. Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests // *Biomass and Bioenergy* 2013, v. 54, pp. 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.022>.
- [9] Bate L., Torgersen T., Wisdom M., Garton E. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters // *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 258(5), pp. 635–640.
- [10] Bell G., Kerr A., McNickle D., Woollons R. Accuracy of the line intersect method of post-logging sampling under orientation bias // *Forest Ecology and Management*, 1996, v. 84(1), pp. 23–28.
- [11] Pedlar J.H., Pearce J.L., Venier L.A., McKenney D.W. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada // *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 158, pp. 189–194.
- [12] Michael S. Williams and Jeffrey H. Perpendicular distance sampling: an alternative method for sampling downed coarse woody debris // *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1564–1579.
- [13] Ducey M.J., Williams M.S., Gove J.H., Roberge S. Distance-limited perpendicular distance sampling for coarse woody debris: theory and field results // *Forestry*, 2013, v. 86, pp. 119–128. DOI: 10.1093/forestry/cps059
- [14] Waddell K.L. Sampling Coarse Woody Debris for Multiple Attributes in Extensive Resource Inventories Extensive Resource Inventories // *Ecological Indicators*, 2002, v. 1, pp. 139–153.
- [15] Bartels R., Dell J.D., Knight R.L., Schaefer G. Dead and down woody material / Ed. E.R. Brown. *Management of Wildlife and Fish Habitats in Forests of Western Oregon and Washington*, R6-F&WL-192-1985, USDA Forest Service, Portland, OR, 1985, pp. 171–186.
- [16] Budiaman A., Komalasari P. Waste of felling and on-site production of teak squarewood of the community forest // *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2012, v. 18 (3), pp. 164–168.
- [17] De Vries P.G. *Sampling Theory for Forest Inventory*. Springer-Verlag. New York, 1986, 399 p, chapter 13, pp. 242–279.
- [18] Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations // *Silva Balcanica*, 2013, v. 14(1), pp. 83–93.
- [19] Timothy G. Gregoire and Harry T. Valentine. Line intersect sampling: Ell-shaped transects and multiple intersections // *Environmental and Ecological Statistics*, 2003, v. 10, pp. 263–279.
- [20] Hazard J.W., Pickford S.G. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. Part II // *Forest Sci.*, 1986, v. 32(2), pp. 447–470.
- [21] Howard S.O., Ward F.R. Measurement of logging residue alternative applications of the line intersect method // *USDA Forest Serv. Res Note PNW-183*, Pac. Northwest Forest and Range Exp. Stn., Portland, Oregon, 1972, 8 p.
- [22] Ghaffariyan M.R., Acuna M., Brown M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia // *Biomass and Bioenergy*, 2013, v. 59, pp. 486–493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.029>.
- [23] Grushecky S.T., Wang J., McGill D.W. Influence of site characteristics and costs of extraction and trucking on logging residue utilization in southern West Virginia // *Forest Product Journal*, 2007, v. 57, pp. 63–67.
- [24] Helmsaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkolä M., Luiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth // *Forest Ecology Management*, 2011, v. 261, pp. 1919–1927.
- [25] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107.
- [26] Keane R.E., Gary K. Comparing three sampling techniques for estimating fine woody down dead biomass // *International Journal of Wildland Fire*, 2013, v. 22, pp. 1093–1107. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13038>
- [27] Nemec A.F.L., Davis G. Efficiency of six line intersect sampling designs for estimating volume and density of coarse woody debris. Nanaimo, Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002, 12 p.
- [28] 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, 2000, BCMOF, 34 p.
- [29] Moriana R., Vilaplana F., Ek M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties // *Cellulose*, 2015, v. 22, pp. 3409–3423. DOI 10.1007/s10570-015-0738-4
- [30] Sari D.R., Ariyanto A. The potential of woody waste biomass from the logging activity at the natural forest of Berau District, East Kalimantan // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, v. 144(1), p. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/144/1/012061
- [31] Zamora-Cristales R., Sessions J. Modeling harvest forest residue collection for bioenergy production // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, v. 37(2), pp. 287–296.
- [32] Zbiec M., Franc-Dabrowska., Drejerska N. Wood waste management in Europe through the lens of the circular bioeconomy // *Energies*, 2022, v. 15(12), p. 4352.
- [33] Behjou F., Ramezan M., Esfahan E.Z., Eftekhari A. Wood waste during full-length and cut-to-length harvesting systems in caspian forests // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2016, v. 3(8), pp. 52–56. DOI:10.21833/ijaas.2016.08.009
- [34] Dalya N., Wahyuni W., Muin A.V.F. Utilization of community forest wood harvesting waste in Bone Pute Village, Burau District, East Luwu Regency // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, v. 886, p. 012021. DOI:10.1088/1755-1315/886/1/012021
- [35] Woldendorp G., Keenan R., Barry S., Spencer R. Analysis of sampling methods for coarse woody debris // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 198(1), pp. 133–148.

- [36] Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю., Денисов С.А., Петухов И.В., Анисимов П.Н. Обоснование технологии лесосечных работ в горельниках с содействием естественному восстановлению сосны // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2024. № 1 (61). С. 66–75.
- [37] Рукомойников К., Сергеева Т., Гилязова Т., Царев Е., Комисар В. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки // ИзВУЗ. Лесной журнал, 2025. № 1. С. 145–63.
- [38] Герасимов Ю.Ю., Перский С.Н. Имитационная модель сплошных рубок на основе ГИС-технологий // Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Вологда, 19–21 мая 2004 г. Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 286–289.
- [39] Заикин А.Н. Моделирование режимов работы лесосечных машин // Изв. вузов. Лесной журнал, 2009, № 1. С. 71–77.
- [40] Тарасов Н.М., Роженцов А.П., Войтко П.Ф. Статистическая оценка скопления затонувшей древесины методом латинских квадратов // Мелиорация и водное хозяйство, 2003. № 5. С. 38–41.
- [41] Тарасов Н.М., Гайсин И.Н., Роженцов А.П., Войтко П.Ф. Технология обнаружения и оценки качества затонувшей древесины в водных объектах Республики Марий Эл // Мелиорация и водное хозяйство, 2003. № 5. С. 41–45.

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnov@bmstu.ru

Посыпанов Сергей Валентинович — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.posypanov@narfu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2025.

Одобрено после рецензирования 21.05.2025.

Принята к публикации 26.05.2025.

FOREST LITTER CONTROL AND REGULATION MODELLING TECHNOLOGY

S.P. Karpachev¹, V.I. Zaprudnov¹, S.V. Posypanov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

karpachevs@mail.ru

The complex of sanitary and health-improving measures in the forest is considered, which includes harvesting of waste wood with simultaneous quantitative and qualitative assessment of characteristics of waste wood in the whole forest area with a given accuracy in real time in the process of harvesting. The variant of waste wood harvesting with wood processing for wood chips in the forest is considered. The main machines carrying out harvesting on technological strips are specified, in particular mobile winch and chipper. With the use of natural data, mathematical model studies of estimation of the volume and quality of waste wood by simulation modelling methods based on the method of linear intersections have been carried out. It was found that at the volume of waste wood from 5 to 50 m³/ha the required total length of technological strips for the accuracy indicator $P = 20\%$ is in the range from 500 to 6000 metres. It was determined that the errors between the true values of the waste wood volume and its estimates did not exceed 11,3 % in absolute value. It was found that the time to record and estimate the volume of waste wood decreases with increasing volume of waste wood in the plot. It was found that the main factors are the length of technological strips and the volume of waste wood on the plot. It was shown that the productivity of waste wood volume counting, and estimation increases as the volume of waste wood on the plot increases.

Keywords: waste wood, sanitary measures, linear intersection method, simulation modeling, mathematical model

Suggested citation: Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Posypanov S.V. *Modelirovaniye tekhnologii kontrolya i regulirovaniya drevesiny otpada v lesu* [Forest litter control and regulation modelling technology]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 170–182. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-170-182

References

- [1] Karpachev S.P., Diev R.I. *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov uborki drevesiny estestvennogo otpada na nuzhdy bioenergetiki* [Modeling of technological processes for harvesting natural wood debris for bioenergy needs]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2017, no. 6, pp. 46–48.
- [2] Moshnikov S.A., Anan'ev V.A. *Zapas drevesnogo detrita osnovnykh nasazhdeniy Yuzhnoy Karelii* [Stock of wood detritus in the main stands of Southern Karelia]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2013, no. 2, pp. 22–28.
- [3] Tiryana T. Simulating harvest schedule for timber management and multipurpose management in teak plantation. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2016, v. 22 (1), pp. 1–12. <http://dx.doi.org/10.7226/jtfm.2.1.1>.
- [4] Sergienko V.G., Ivanov A.M., Vlasov R.V., Antonov O.I. *Drevesnyy otpad i bioraznoobrazie na uchastkakh vyborochnykh rubok v Leningradskoy oblasti* [Wood debris and biodiversity in selective logging areas in the Leningrad Region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2015, no. 3, pp. 4–19.
- [5] *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatiy. Prilozhenie 2 k prikazu Rosleskhoza ot 29.12.2007* [Guide to sanitation. Appendix 2 to the Order of the Federal Forestry Agency of December 29, 2007], no. 523, 32 p.
- [6] Andini S., Budiaman A., Muhdin M. Development of Line Intersect Method for Logging Residue Assessment of Teak. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2017, v. 23(2), pp. 51–60.
- [7] Daniel P. Bebbler and Sean C. Thomas. Prism sweeps for coarse woody debris. *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1737–1743.
- [8] Bouriaud O., Stefan G., Flocea M. Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests. *Biomass and Bioenergy* 2013, v. 54, pp. 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.022>.
- [9] Bate L., Torgersen T., Wisdom M., Garton E. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters. *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 258(5), pp. 635–640.
- [10] Bell G., Kerr A., McNickle D., Woollons R. Accuracy of the line intersect method of post-logging sampling under orientation bias. *Forest Ecology and Management*, 1996, v. 84(1), pp. 23–28.
- [11] Pedlar J.H., Pearce J.L., Venier L.A., McKenney D.W. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada. *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 158, pp. 189–194.
- [12] Michael S. Williams and Jeffrey H. Perpendicular distance sampling: an alternative method for sampling downed coarse woody debris. *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1564–1579.
- [13] Ducey M.J., Williams M.S., Gove J.H., Roberge S. Distance-limited perpendicular distance sampling for coarse woody debris: theory and field results. *Forestry*, 2013, v. 86, pp. 119–128. DOI: 10.1093/forestry/cps059
- [14] Waddell K.L. Sampling Coarse Woody Debris for Multiple Attributes in Extensive Resource Inventories Extensive Resource Inventories. *Ecological Indicators*, 2002, v. 1, pp. 139–153.
- [15] Bartels R., Dell J.D., Knight R.L., Schaefer G. Dead and down woody material. /Ed. E.R. Brown. *Management of Wildlife and Fish Habitats in Forests of Western Oregon and Washington*, R6-F&WL-192-1985, USDA Forest Service, Portland, OR, 1985, pp. 171–186.
- [16] Budiaman A., Komalasari P. Waste of felling and on-site production of teak squarewood of the community forest. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2012, v. 18 (3), pp. 164–168.
- [17] De Vries P.G. *Sampling Theory for Forest Inventory*. Springer-Verlag. New York, 1986, 399 p, chapter 13, pp. 242–279.
- [18] Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. *Silva Balcanica*, 2013, v. 14(1), pp. 83–93.
- [19] Timothy G. Gregoire and Harry T. Valentine. Line intersect sampling: Ell-shaped transects and multiple intersections. *Environmental and Ecological Statistics*, 2003, v. 10, pp. 263–279.
- [20] Hazard J.W., Pickford S.G. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. Part II. *Forest Sci.*, 1986, v. 32(2), pp. 447–470.
- [21] Howard S.O., Ward F.R. Measurement of logging residue alternative applications of the line intersect method. *USDA Forest Serv. Res Note PNW-183*, Pac. Northwest Forest and Range Exp. Stn., Portland, Oregon, 1972, 8 p.
- [22] Ghaffariyan M.R., Acuna M., Brown M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia. *Biomass and Bioenergy*, 2013, v. 59, pp. 486–493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.029>.
- [23] Grushecky S.T., Wang J., McGill D.W. Influence of site characteristics and costs of extraction and trucking on logging residue utilization in southern West Virginia. *Forest Product Journal*, 2007, v. 57, pp. 63–67.
- [24] Helmissaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology Management*, 2011, v. 261, pp. 1919–1927.
- [25] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107.
- [26] Keane R.E., Gary K. Comparing three sampling techniques for estimating fine woody down dead biomass. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, v. 22, pp. 1093–1107. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13038>
- [27] Nemec A.F.L., Davis G. Efficiency of six line intersect sampling designs for estimating volume and density of coarse woody debris. *Nanaimo, Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002*, 2002, 12 p.
- [28] 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, 2000, BCMOF, 34 p.

- [29] Moriana R., Vilaplana F., Ek M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties. *Cellulose*, 2015, v. 22, pp. 3409–3423. DOI 10.1007/s10570-015-0738-4
- [30] Sari D.R., Ariyanto A. The potential of woody waste biomass from the logging activity at the natural forest of Berau District, East Kalimantan. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, v. 144(1), p. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/144/1/012061
- [31] Zamora-Cristales R., Sessions J. Modeling harvest forest residue collection for bioenergy production. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, v. 37(2), pp. 287–296.
- [32] Zbiec M., Franc-Dabrowska., Drejerska N. Wood waste management in Europe through the lens of the circular bioeconomy. *Energies*, 2022, v. 15(12), p. 4352.
- [33] Behjou F., Ramezan M., Esfahan E.Z., Eftekhari A. Wood waste during full-length and cut-to-length harvesting systems in caspian forests. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2016, v. 3(8), pp. 52–56. DOI:10.21833/ijaas.2016.08.009
- [34] Dalya N., Wahyuni W., Muin A.V.F. Utilization of community forest wood harvesting waste in Bone Pute Village, Berau District, East Luwu Regency. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021., v. 886, p. 012021. DOI:10.1088/1755-1315/886/1/012021
- [35] Woldendorp G., Keenan R., Barry S., Spencer R. Analysis of sampling methods for coarse woody debris. // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 198(1), pp. 133–148.
- [36] Shirnin Yu.A., Shirnin A.Yu., Denisov S.A., Petukhov I.V., Anisimov P.N. *Obosnovanie tekhnologii lesosechnykh rabot v gorel'nikakh s sodeystviem estestvennomu vosstanovleniyu sosny* [Justification of logging technology in burnt areas with assistance to natural restoration of pine]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2024, no. 1 (61), pp. 66–75.
- [37] Rukomoynikov K., Sergeeva T., Gilyazova T., Tsarev E., Komisar V. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovki* [Simulation modeling of technological processes of logging]. *Russian Forest Journal*, 2025, no. 1, pp. 145–63.
- [38] Gerasimov Yu.Yu., Perskiy S.N. *Imitatsionnaya model' sploshnykh rubok na osnove GIS-tekhnologiy* [Simulation model of clear-cutting based on GIS technologies]. *Modelirovanie, optimizatsiya i intensivatsiya proizvodstvennykh protsessov i sistem: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modeling, optimization and intensification of production processes and systems: Proc. Int. scientific-practical. conf.], Vologda, May 19–21, 2004. Vologda: VoGTU, 2004, pp. 286–289.
- [39] Zaikin A.N. *Modelirovanie rezhimov raboty lesosechnykh mashin* [Modeling of operating modes of logging machines]. *Russian Forest Journal*, 2009, no. 1, pp. 71–77.
- [40] Tarasov N.M., Rozhentsov A.P., Voytko P.F. *Statisticheskaya otsenka skopleniya zatonuvshykh drevesiny metodom latinskikh kvadratov* [Statistical assessment of the accumulation of sunken wood using the Latin square method]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Melioration and water management], 2003, no. 5, pp. 38–41.
- [41] Tarasov N.M., Gaisin I.N., Rozhentsov A.P., Voytko P.F. *Tekhnologiya obnaruzheniya i otsenki kachestva zatonuvshykh drevesiny v vodnykh ob'yektakh Respubliki Mariy El* [Technology for detecting and assessing the quality of sunken wood in water bodies of the Mari El Republic]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Melioration and Water Management], 2003, no. 5, pp. 41–45.

Authors' information

Karpachev Sergey Petrovich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@bmstu.ru

Posypanov Sergey Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.posypanov@narfu.ru

Received 03.04.2025.

Approved after review 21.05.2025.

Accepted for publication 26.05.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest