УДК 630*323.12 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-121-130

Прогнозирование повреждаемости подроста при использовании харвестера и форвардера на лесозаготовках

В.В. Абрамов[1a], Д.А. Полукаров[1b], А.С. Черных[1c], Д.Н. Афоничев[2d], А.Ю. Мануковский[1e], В.П. Попиков[1f]

[1] ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия
[2] ФГБОУ ВО Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия
[a] vitali1980a@mail.ru, [b] aviatortut@mail.ru, [c] as-umu@mail.ru, [d] mayu1964@mail.ru, [e] dmafonichev@yandex.ru, [f] popikovpetr@yandex.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0001-8779-076X, [b] https://orcid.org/0000-0002-5914-4928,
[c] https://orcid.org/0000-0002-1601-420X, [d] https://orcid.org/0000-0001-9066-6428,
[e] https://orcid.org/0009-0008-8308-503, [f] https://orcid.org/0000-0002-6348-8934.
Статья поступила 22.06.2026, принята 18.09.2026.

В статье проведён анализ схем и способов работы харвестера и форвардера на лесосеке. Предложены способы разработки пасек для повышения доли сохранённого подроста при его равномерном распределении. Получено математическое выражение для определения повреждаемости подроста на технологических площадях лесосеки с учётом схемы прокладки первичной транспортной сети и её основных технологических параметров. Получена регрессионная зависимость показателя повреждаемости подроста на полупасеках от густоты насаждения, интенсивности рубки, высоты вырубаемых деревьев, а также ширины пасеки и волока при направленной валке харвестером крон деревьев на стену леса вершиной вперёд. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать математический аппарат для прогнозирования повреждаемости подроста на лесосеке при использовании системы машин «харвестер-форвардер» с учётом основных таксационных характеристик насаждения и лесоводственно-технологических параметров рубки. Результаты вычислений по первому предложенному к исследованию варианту применения харвестера и форвардера показывают заметное снижение контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек, на которых находится подрост до уровня 60, 5 %, что на 31 % меньше, чем у традиционного варианта. Применение второго альтернативного варианта позволяет сохранить подрост в ещё большем количестве – контакт крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек снижен до уровня 24, 2 %, что на 36 % меньше, чем у первого альтернативного варианта, и на 67 % меньше, чем традиционного. Полученные результаты рекомендованы к использованию на стадии проектирования лесозаготовительного производства для оценки функционирования технических средств с экономико-экологических позиций, также оценки квалификации оператора харвестера.

Ключевые слова: сплошные рубки; лесозаготовки; лесосечные работы; подрост; харвестеры; форвардеры.

Prediction of undergrowth damage when using a harvester and forwarder in logging operations

V.V. Abramov[1a], D.A. Polukarov[1b], A.S. Chernykh[1c], D.N. Afonichev[2d], A.Y. Manukovskiy[1e], V.P. Popikov[1f]

[1] Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia
[2] Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I; 1, Michurin St., Voronezh, Russia
[a] vitali1980a@mail.ru, [b] aviatortut@mail.ru, [c] as-umu@mail.ru, [d] mayu1964@mail.ru, [e] dmafonichev@yandex.ru, [f] popikovpetr@yandex.ru
[a] https://orcid.org/0000-0001-8779-076X, [b] https://orcid.org/0000-0002-5914-4928,
[c] https://orcid.org/0000-0002-1601-420X, [d] https://orcid.org/0000-0001-9066-6428,
[e] https://orcid.org/0009-0008-8308-503, [f] https://orcid.org/0000-0002-6348-8934.
Received 22.06.2026, accepted 18.09.2026.

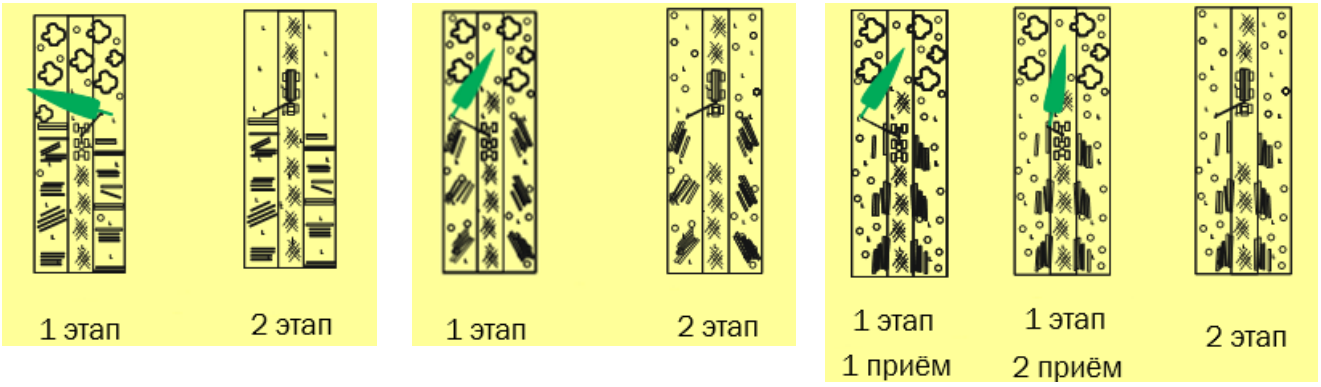
The article analyzes the schemes and methods of operation of the harvester and forwarder in the cutting area. Methods of developing cutting strips to increase the proportion of preserved undergrowth with its uniform distribution are proposed. A mathematical expression is obtained for determining the damage rate of undergrowth in the technological areas of the cutting area, taking into account the scheme of laying the primary transport network and its main technological parameters. A mathematical expression has been obtained for determining the damage to undergrowth on the technological areas of the cutting area, taking into account the layout of the primary transport network and its main technological parameters. A regression dependence has been obtained for the damage indicator of undergrowth on half-strips on stand density, cutting intensity, height of felled trees, as well as the width of the strip and the skid road when directional felling by a harvester with tree crowns onto the forest wall, tops forward. The completed theoretical and experimental

studies made it possible to develop a mathematical apparatus for predicting the damage to undergrowth in a cutting area when using the "harvester-forwarder" machine system, taking into account the main inventory characteristics of the stand and the silvicultural-technological parameters of cutting. The calculation results for the first variant of harvester and forwarder use proposed for study show a noticeable reduction in the contact of the crowns of felled trees with the surface of the half-strips on which the undergrowth is located, to a level of 60.5 %, which is 31 % less than in the traditional variant. The use of the second alternative variant makes it possible to preserve undergrowth in an even greater amount – the contact of the crowns of felled trees with the surface of the half-strips is reduced to a level of 24.2 %, which is 36 % less than in the first alternative variant, and 67 % less than in the traditional one. The results obtained are recommended for use at the stage of designing logging production to assess the functioning of technical means from economic and environmental positions, as well as to assess the qualification of the harvester operator.

Keywords: clear cuttings; logging; cutting-area operations; undergrowth; harvesters; forwarders.

Введение. Рубка древостоя с применением мощной лесозаготовительной техники вносит значительные изменения во все составные части биогеоценоза: подрост, почву, растительный покров, животный мир. Эти изменения будут проявляться по-разному в различных лесорастительных условиях и при различных технологических процессах лесозаготовок [1]. Очевидно, что от степени и характера этих изменений будут зависеть способы проведения и объёмы лесовосстановительных работ на вырубке. Желательно, чтобы объёмы эти были минимальными. Поэтому очень важным показателем для оценки качества выполнения лесосечных работ является величина сохранённого подроста [4–6]. Она зависит от доли технологических площадей, устраиваемых на лесосеке при подготовке её территории к основным работам, а также повреждаемости подроста непосредственно на полупасеках при выполнении уже основных операций технологического процесса [7].

В настоящее время в стране преобладает сортиментная заготовка древесины на базе харвестера и форвардера. Наиболее широко применяемый способ разработки пасеки при использовании данной техники следующий [2–3]. Валка деревьев осуществляется вершиной от волока и перпендикулярно ему. При этом есть возможность их укладки с учётом рядом расположенных групп подроста и молодняка хозяйственно ценных пород. В то же время применение данного способа не позволяет сохранять подрост при его равномерном размещении на лесосеке. Он погибает от соприкосновения с кронами деревьев в процессе их валки и последующей обработки из-за протаскивания ствола через харвестерную головку для очистки его от сучьев и раскряжёвки. Площадь контакта крон деревьев с местом произрастания подроста на полупасеках оказывается в результате очень значительной (рис. 1, *а*). В этой связи валку деревьев целесообразно выполнять на стену леса вершиной вперёд с расположением большей части кроны на волоке и последующей укладкой выпиливаемых сортиментов также вдоль волока под небольшим углом к нему. Это позволяет сузить ленты, на которых укладываются кроны деревьев и сортименты, а значит увеличить долю площади пасеки, на которой подрост сохраняется (рис. 1, *б*). При наличии операторов харвестеров высокой квалификации можно не только осуществлять направленную валку деревьев вершинами вперёд на волок с полупасек, но и вынос туда же манипулятором их комлевой части в приподнятом положении для последующей очистки от сучьев и раскряжёвки. Это позволяет устранить контакт подроста на полупасеке с кронами деревьев в процессе валки (рис. 1, *в*).



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Способы разработки пасек при выполнении сплошных рубок харвестером и форвардером

Точные данные по повреждаемости подроста при использовании харвестера и форвардера в различных способах разработки пасек зависят от конкретных лесоэксплуатационных условий, особенно от породного состава насаждения, его таксационных характеристик (высота и густота деревьев), форм и параметров крон деревьев (длина и наибольшая ширина кроны, высота до начала кроны и наибольшей ширины, боковая площадь кроны) (рис. 2). В настоящее время появляется возможность прогнозирования повреждаемости подроста на полупасеках с учётом всех вышеназванных факторов на основе современных информационных технологий с использованием средств дистанционного измерения [8–9]. Так, применение наземного лазерного

сканирования с использованием трёхмерных лазерных сканеров позволяет получать измерительную информацию с относительной погрешностью около 10 %, а некоторые модели, например, наземный 3D-лазерный сканер Z+F IMAGER 5016 работает с погрешностью измерения 2 мм на 100 метров дистанции при максимальной дальности сканирования – 365 м (рис. 3).

Таким образом, в рамках данной статьи обозначена цель исследования – обоснование средощадящих технологий производства сортиментов на лесосеке многооперационными машинами с возможностью использования данных лазерного сканирования деревьев.

В соответствии с поставленной целью были обозначены следующие задачи:

1. Получить математическое выражение для определения повреждаемости подроста на технологических площадях лесосеки с учётом схемы прокладки первичной транспортной сети и её основных технологических параметров.

2. Получить регрессионную зависимость показателя повреждаемости подроста на полупасеках от густоты насаждения, интенсивности рубки, высоты вырубаемых деревьев, а также ширины пасеки и волока при направленной валке харвестером крон деревьев на стену леса вершиной вперёд.

3. На основе полученного математического аппарата для прогнозирования повреждаемости подроста при различных способах разработки пасек разработать программное обеспечение для научно обоснованного выбора средощадящих технологий и технико-технологических параметров заготовки древесины системой машин «харвестер-форвардер».

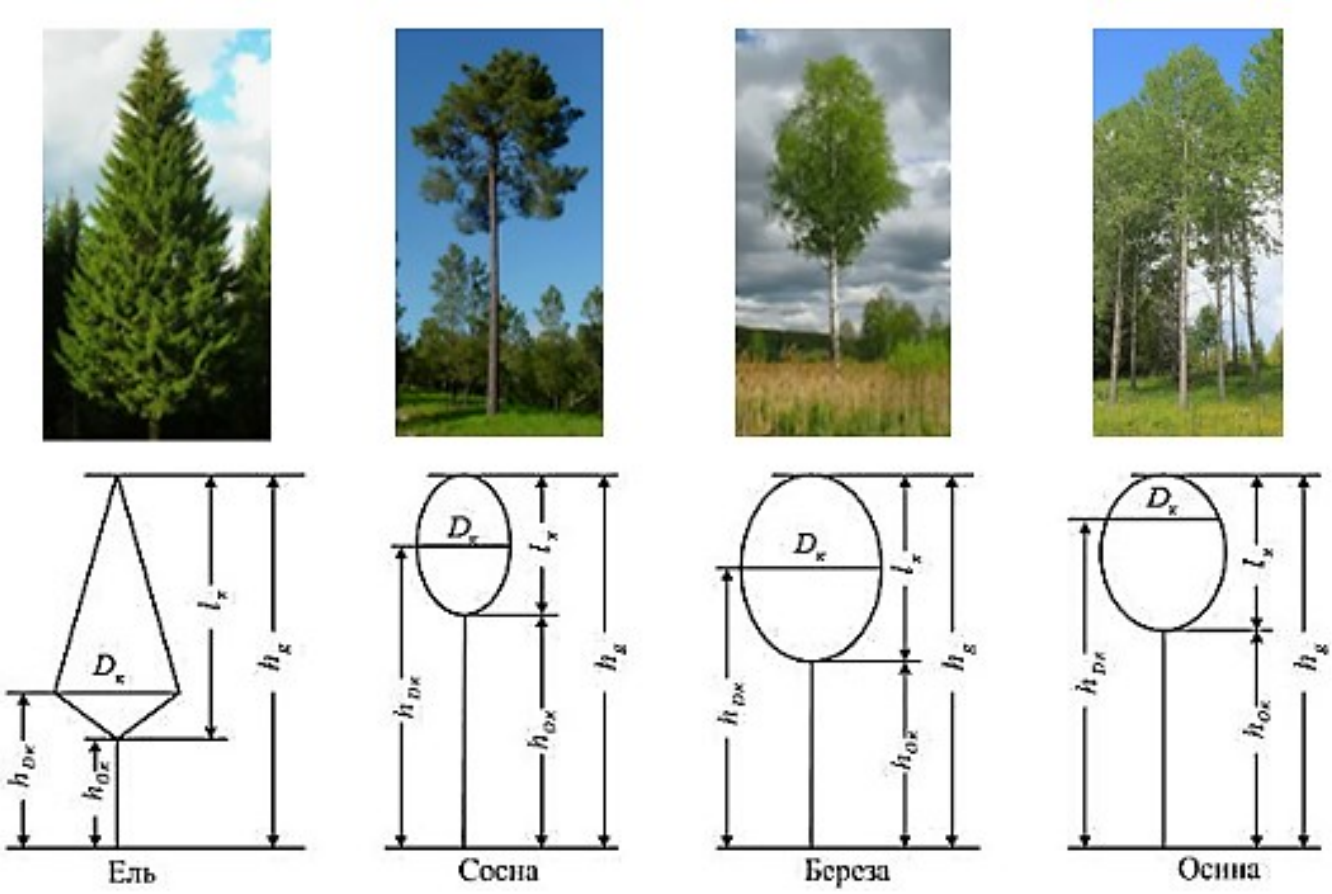


Рис. 2. Формы и параметры крон деревьев основных древесных пород

Материалы и методы. Объектом исследования являются технологии и способы работы харвестера и форвардера на лесосеке.

Предметом исследования являются показатель повреждаемости подроста при использовании харвестера и форвардера на сплошных рубках.

Для оценки повреждаемости подроста на лесосеке предлагается использовать показатель, учитывающий технологические площади лесосеки и площади с повреждением подроста на полупасеках,

$$Z = \frac{S_m \cdot 100}{S_л} + S_{пп}, \quad (1)$$

где S_m – технологические площади на лесосеке (волоки, коридоры, визиры, погрузочные пункты), га; $S_л$ – площадь разрабатываемой лесосеки, га; $S_{пп}$ – повреждаемость подроста на полупасеках, %.

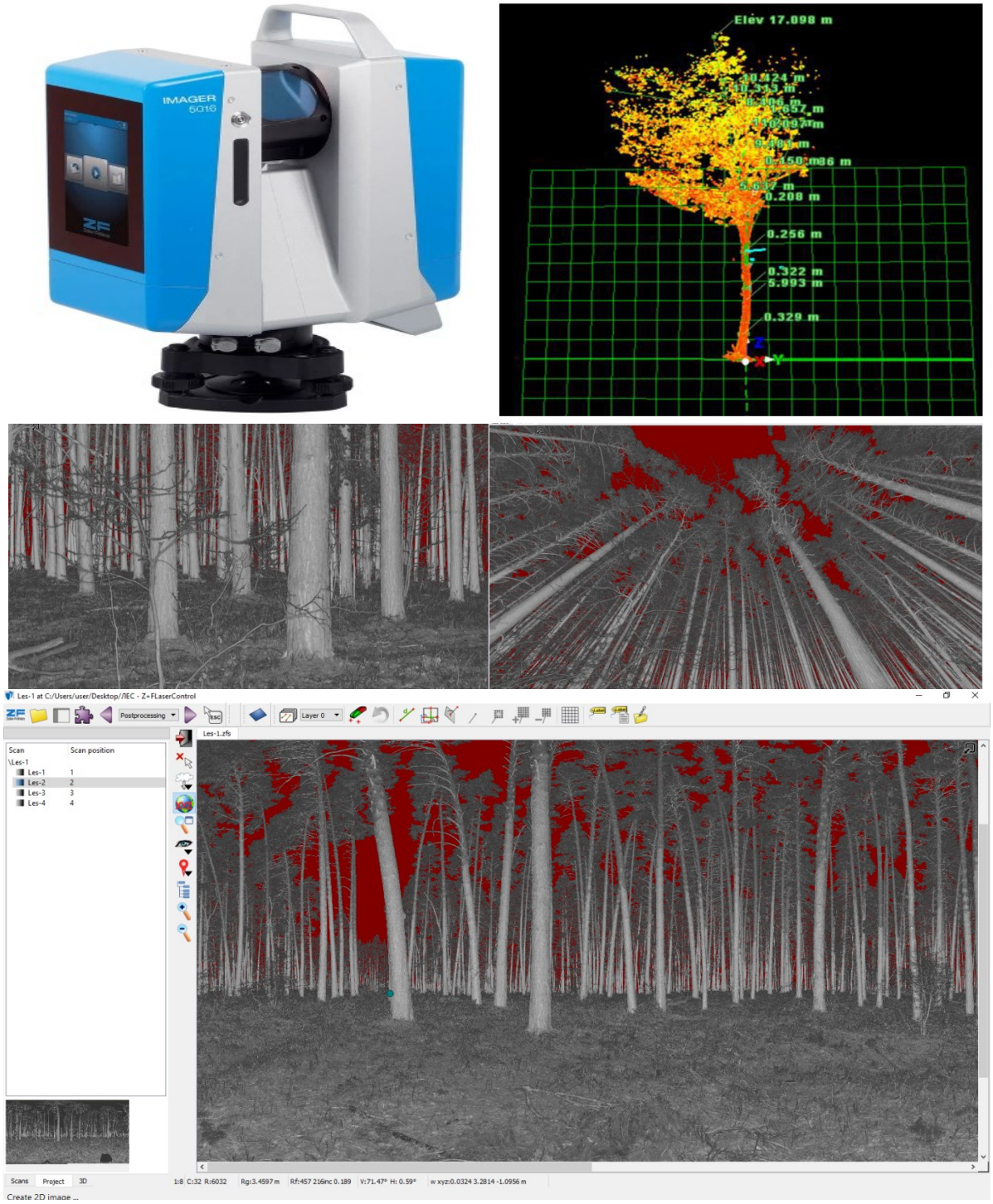


Рис. 3. Результаты измерений лазерным сканером Z+F IMAGER 5016 параметров насаждения и примеры построения 3D-модели отдельного дерева

Для расчёта технологических площадей (рис. 4) было предложено выражение, учитывающее долю магистральных и пасечных волоков, погрузочных пунктов, а также полуколец разворота при машинизированном способе разработки лесосеки (харвестер + форвардер) в зависимости от размеров указанных элементов и некоторых параметров лесозаготовительной техники:

$$S_m = S_{м.в.} + S_{п.в.} + S_{п.п.} + S_{п.к.} = \left[A - a - \left(\frac{b_n^2 + 4A}{2b_n} - 1{,}5b_{пв} \right) \right] \times b_{мв} + \left[\left(B - d - b_{мв} \right) \left[\frac{A}{b_n} \right] \right] \times b_{пв} + a \cdot b \cdot n_{п.п} + \frac{\pi\alpha}{720} \left(R_1^2 - r_1^2 \right) \left[\frac{A}{b_n} \right], \quad (2)$$

где $S_{м.в.}$ – площадь магистральных волоков, м^2; $S_{п.в.}$ – площадь пасечных волоков, м^2; $S_{п.п.}$ – площадь погрузочных площадок, м^2; $S_{п.к.}$ – площадь полуколец разворота лесозаготовительной техники при машинизированном способе разработки лесосеки, м^2; A – глубина лесосеки (делянки), м; a – длина погрузочного пункта, м; $b_п$ – ширина пасеки, м; $b_{пв}$ – ширина пасечного волока, м; $b_{мв}$ –ширина магистрального волока, м; B – ширина делянки, м; d – расстояние между усом лесовозной дороги и магистральным волоком, м; b – ширина погрузочного пункта, м; $n_{п.п}$ – количество погрузочных пунктов.

Для оценки повреждаемости подроста на лесосеке кроме расчёта технологических площадей $S_т$ требуется также определение показателя повреждаемости подроста на полупасеках $S_{пп}$. При равномерном распределении подроста на лесосеке данный показатель можно определить по площадям контакта крон сваленных деревьев с площадью полупасеки из следующего выражения:

$$S_{пп} = \sum_{l=1}^{L} S_{ппl}\, f_l \,, \tag{3}$$

где $S_{ппl}$ – площадь контакта крон сваленных деревьев определённой l-ой породы из состава насаждения с площадью полупасеки, м^2; f_l – доля l-ой породы в составе насаждения, м^2; L – количество пород деревьев в составе насаждения.

Для оценки повреждаемости подроста, равномерно распределённого на лесосеке по площадям контакта крон сваленных деревьев определённой породы, с поверхностью полупасек была составлена матрица полнофакторного плана, где пять факторов (интенсивность рубки – k_i, средняя высота деревьев на лесосеке – h_d, ширина разрабатываемой пасеки – $b_п$, ширина волока – $b_в$, густота насаждения – N) варьируются на двух уровнях – минимальном и максимальном, при 32 опытах (табл. 2).

Таблица 2. Параметры изменяемых факторов при определении $S_{пп} = f(N, k, h_д, b_п, b_в)$

Фактор			Уровни фактора			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение		верхний	нижний	основной	
	натуральное	нормализованное				
Густота, шт./га	N	x_1	1500	200	850	650
Интенсивности рубки, %	k	x_2	100	30	65	35
Высота деревьев, м	$h_д$	x_3	30	15	22,5	7,5
Ширина разрабатываемой пасеки, м	$b_п$	x_4	20	12	16	4
Ширина волока, м	$b_в$	x_5	5	1,5	3,25	1,75

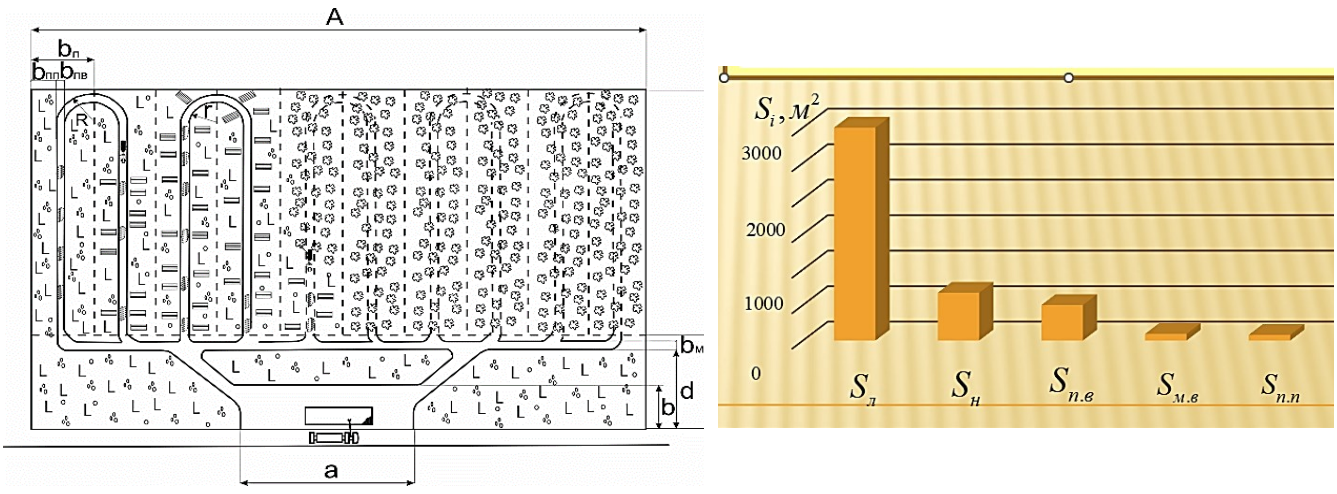


Рис. 4. Схема разработки и основные технологические параметры лесосеки при использовании харвестера и форвардера

Методика проведения вычислительного эксперимента. Для получения регрессионной зависимости площадей контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек от основных характеристик насаждения и лесоводственно-технологических параметров рубки было предложено реализовать в среде SolidWorks, позволяющей на основе данных цифрового сканирования моделировать вертикальную и горизонтальную структуру насаждения (рис. 5).

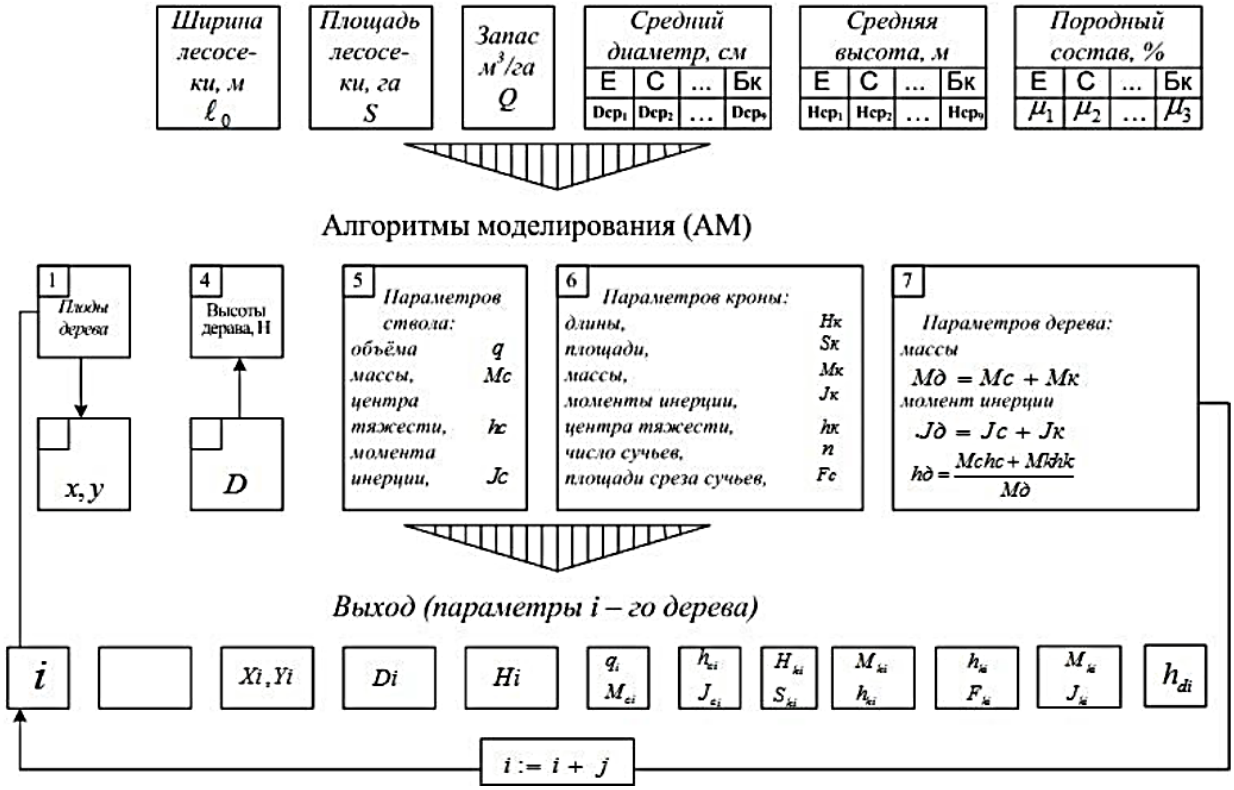


Рис. 5. Принципиальная схема создания модельной лесосеки

Последовательность проведения имитационного эксперимента была предложена следующая:

– создаётся на полупасеках пространственная структура расположения деревьев определённой породы и подроста, равномерно распределённого на лесосеке в зависимости от состава насаждения и индивидуальных характеристик предмета труда;

– далее определяется последовательность обработки деревьев, в соответствии с которой они снимаются с пня и укладываются индивидуально под таким углом к волоку, который позволит контакт крон сваленных деревьев с поверхностью волока сделать максимальным, снизив тем самым долю повреждённого подроста на полупасеке;

– после этого осуществляется подсчёт повреждаемости подроста, равномерно распределённого на лесосеке, по площадям контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек по каждой породе насаждения (рис. 6).

В ходе обработки данных имитационного эксперимента подтвердилась гипотеза о нормальности распределения выходной величины $S_{пп}$ по критерию Пирсона – χ^2; а также гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена – *G*. После этого были определены значимые коэффициенты регрессии с помощью критерия Стьюдента – *t* и получены с подтверждением достоверности по критерию Фишера – *F* следующие уравнения:

$$\begin{aligned} S_{пп}^{ель} &= -17,340912 + 0,009336N + 0,132646K \\ &+1,222260H + 0,219107bn + 5,434896bb \\ &+0,000206Nk + 0,000123NH - 0,000275Nbn \\ &+0,000026Nbb - 0,006232KH - 0,005271Kbn \\ &+0,026912Kbb - 0,015098Hbn - 0,043653Hbb \\ &-0,049113bnbb + 0,000002NKH + 0,000007NKbn \\ &-0,000076NKbb + 0,000014NHbn - 0,000136NHbb \\ &-0,000003Nbnbb + 0,000363KHbn - 0,002888KHbb \\ &-0,000216Kbnbb + 0,000609Hbnbb + 0,000003NKHbb \\ &+0,000001NKbnbb + 0,000001NHbnbb + 0,000026KHbnbb; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_{пп}^{сосна} &= -15,407515 + 0,01023N + 0,171251K \\ &+1,007221H + 0,208199b_п + 4,854659b_в \\ &+0,000056Nk - 0,000073NH - 0,000257Nb_п \\ &-0,001132Nb_в - 0,007861KH - 0,005049Kb_п \\ &-0,005284Kb_b - 0,013059Hb_п - 0,075095Hb_в \\ &-0,051489b_пb_в + 0,000005NKH + 0,000007NKb_п \\ &-0,000026KHb_в + 0,000012NHb_п - 0,000045NHb_в \\ &+0,000018Nb_пb_в + 0,000316KHb_п - 0,000966KHb_в \\ &+0,000257Kb_пb_в + 0,001170Hb_пb_в + 0,000001NKHb_в; \end{aligned} \quad (4)$$

$$S_{пп}^{береза} = -16,7949043 + 0,0112127\ N + 0,187990\ K + 1,095464\ H + 0,226956\ b_{в} + 5,259921\ b_{в} + 0,000058\ N\ k - 0,000084\ N\ H - 0,000280\ N\ b_{п} - 0,001230\ N\ b_{в} - 0,008624\ K\ H - 0,005510\ K\ b_{п} - 0,005782\ K\ b_{в} - 0,01421\ H\ b_{п} - 0,081201\ H\ b_{в} - 0,055760\ b_{п}\ b_{в} + 0,000006\ NKH + 0,000007\ NK\ b_{п} - 0,000028\ NK\ b_{в} + 0,000014\ NH\ b_{п} - 0,000049\ NH\ b_{в} + 0,000019\ N\ b_{п}\ b_{в} + 0,000345\ KH\ b_{п} - 0,001046\ KH\ b_{в} + 0,000279\ K\ b_{п}\ b_{в} + 0,001265\ H\ b_{п}\ b_{в} + 0,000001NKH\ b_{в}; \quad (5)$$

$$S_{пп}^{осина} = -14,767921 + 0,009812\ N + 0,164477\ K + 0,965409\ H + 0,199742bn + 4,650315bb + 0,000053Nk - 0,000071NH - 0,000246Nbn - 0,001084Nbb - 0,007549KH - 0,004845Kbn - 0,005047Kbb - 0,012523Hbn - 0,071889Hbb - 0,049320bnbb + 0,000005NKH + 0,000006NKbn - 0,000025NKbb + 0,000012NHbn - 0,000044NHbb + 0,000017Nbnbb + 0,000303KHbn - 0,000927KHbb + 0,000246Kbnbb + 0,001120Hbnbb + 0,000001NKHbb. \quad (6)$$

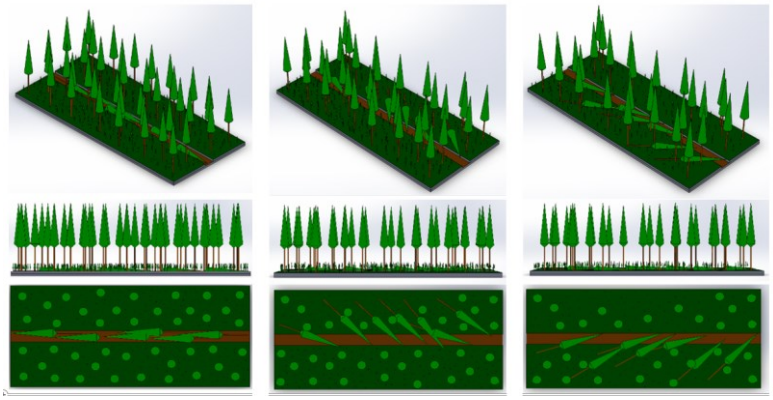


Рис. 6. Участок модельной лесосеки для имитационного эксперимента в среде SolidWorks

Таблица 2. Условия, результаты и анализ эксперимента

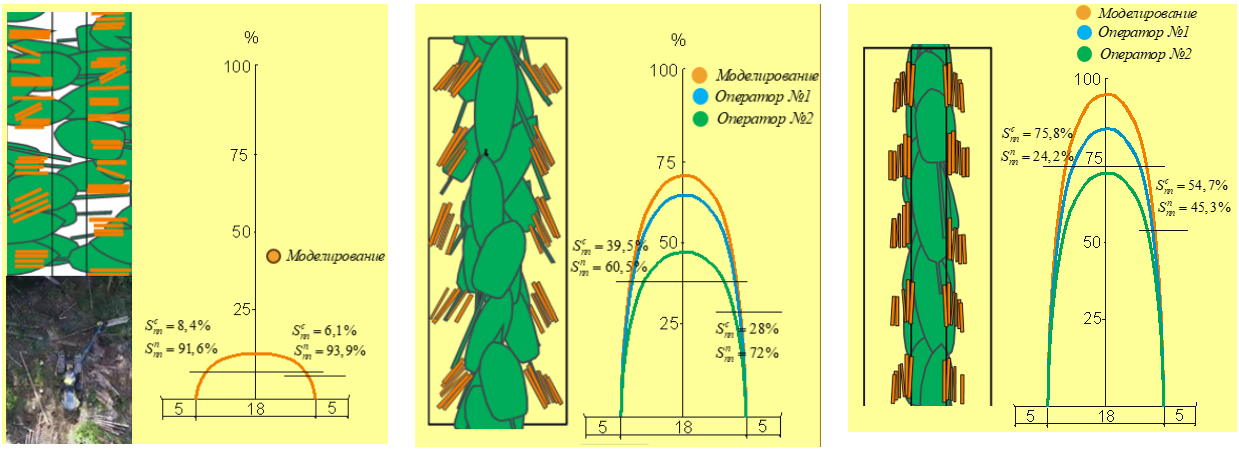
№ опыта	Результаты эксперимента $S_{пп}$, %					Значения расчётов		
	S_{41}	S_{42}	S_{43}	S_{44}	S_{45}	$\overline{y_j}$	σ^2	y_j
1	84,83	86,8	83,776	87,76	85,65	85,54	9,89480	85,7632
2	41,48	43,65	40,46	44,43	42,3	42,01	10,28292	42,464
3	41,94	43,81	40,82	44,81	42,66	43	9,73948	42,808
4	9,98	11,95	9,16	12,93	10,8	10,95	9,08692	10,964
5	63,66	65,46	62,54	66,56	64,38	64,5	9,7248	64,52
6	14,72	16,69	13,7	17,67	15,54	15,86	9,84052	15,664
7	14,61	16,64	14,02	17,69	15,56	15,25	8,87372	15,704
8	5,42	7,39	4,4	8,47	6,24	6,16	10,24972	6,384
9	51,18	53,08	50,06	54,23	52	52,56	10,5148	52,11
10	22,46	24,59	21,54	25,41	23,28	23,69	9,79812	23,456
11	33,38	35,08	32,37	36,13	34	33,62	8,56028	34,192
12	29,46	31,43	28,54	32,41	30,28	30,78	9,45572	30,424
13	38,96	40,96	38,04	42,01	39,88	40,32	9,8948	39,97
14	21,8	23,67	20,63	24,45	22,32	22	9,16332	22,574
15	23,98	25,98	23,04	26,93	24,8	25,18	9,59272	24,946
16	19,86	21,83	18,67	22,61	20,48	21,14	9,7994	20,69
17	84,34	86,24	83,32	87,29	85,16	85,49	9,7008	85,27
18	38,53	40,13	37,51	41,18	39,05	39,73	8,0808	39,28
19	42,21	44,18	41,19	45,16	43,03	42,95	9,84052	43,154
20	7,1	8,8	5,78	10,15	7,72	7,92	11,0388	7,91
21	64,1	66,07	63,18	67,05	64,92	65,07	9,45572	65,064
22	12,95	14,55	11,63	15,6	13,47	13,44	9,2148	13,64
23	13,68	15,65	12,59	16,63	14,5	15,06	10,1194	14,61
24	2,77	4,47	1,5	5,52	3,39	3,75	9,5618	3,53
25	61,78	63,73	60,66	64,73	62,6	62,24	10,1998	62,7
26	24,22	25,82	22,9	26,87	24,74	24,66	9,2148	24,91
27	38,06	40,13	37,22	41,21	38,98	39,68	10,1414	39,12
28	22,01	23,71	20,79	24,76	22,63	22,42	9,3608	22,78
29	45,62	47,59	44,58	48,65	46,44	46,21	10,24612	46,576
30	12,41	14,09	10,09	15,06	12,93	13,48	14,21752	12,916
31	21,23	23,2	19,21	24,28	22,05	21,75	15,01772	21,994
32	8,68	10,38	7,46	11,53	9,3	9,47	9,7648	9,01

Материалы и методы. Таким образом, в результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований был получен математический аппарат для прогнозирования повреждаемости подроста на лесосеке при использовании системы машины «харвестер-форвардер» в различных способах разработки пасек.

Результаты вычислений для традиционного варианта разработки пасек харвестером, когда деревья обрабатываются параллельно волоку, показали площадь контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек на уровне 91,6 %, а с учётом волоков – 93,9 % (рис. 7, *а*).

Предложенный нами в качестве первой альтернативы способ разработки пасек для лесосек с подростом, равномерно распределённым по площади, предполагает валку деревьев производить вперёд вершиной на стену леса с расположением большей части кроны на волоке и последующей укладкой выпиливаемых сортиментов также вдоль волока, что позволяет сузить ленты, на которых укладываются кроны деревьев и сортименты, а значит увеличить долю площади пасеки, на которой сохраняется подрост. Результаты вычислений по альтернативному варианту показывают заметное снижение контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек до уровня 60, 5 %, что на 31 % меньше, чем у традиционного варианта (рис. 7, *б*).

Предложенный нами в качестве второй альтернативы способ разработки пасек харвестером предполагает не только направленную валку деревьев вершинами вперёд на волок с полупасек, но и вынос туда же манипулятором их комлевой части в приподнятом положении для последующей очистки от сучьев и раскряжёвки. Результаты вычислений по второму альтернативному варианту позволяют сохранить подрост в ещё большем количестве, так как здесь контакт крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек снижен до уровня 24, 2 %, что на 36 % меньше, чем у первого альтернативного варианта, и на 67 % меньше, чем традиционного (рис. 7, *в*).



а) *б)* *в)*

Рис. 7. Эпюры, характеризующие степень сохранности подроста при ширине пасеки: *а* – 1 способ разработки пасеки; *б* – 2 способ разработки пасеки; *в* – 3 способ разработки пасеки

Сравнение результатов моделирования с результатами работы харвестера (PONSSE Buffalo) на производстве (ОАО «Ковровский лесокомбинат», Владимирская область) показало, что идеального прогнозируемого уровня по сохранности подроста операторы харвестеров не достигают с расхождением в 5…13 % в зависимости от опыта и мастерства оператора.

Таким образом, в результате проведённых исследований был получен математический аппарат не только для прогнозирования повреждаемости подроста на лесосеке при использовании системы машины «харвестер-форвардер» в различных способах разработки пасек, но также оценки квалификации оператора харвестера. На его основе на кафедре ЛПМСиС ВГЛТУ было разработано программное обеспечение для научно-обоснованного выбора средощадящих технологий и технико-технологических параметров заготовки древесины многооперационными машинами (свидетельство о государственной регистрации №2025667680) [24]. Полученные результаты рекомендованы к использованию на стадии проектирования лесозаготовительного производства для оценки работы системы машины «харвестер-форвардер» с экономико-экологических позиций.

Результаты. На основе проведённых исследований были получены следующие результаты:

1. Проведён анализ схем и способов работы харвестера и форвардера на лесосеке, который показал значительный процент повреждаемости подроста при использовании данной техники.

2. Были предложены к исследованию способы разработки пасек для повышения доли сохранённого подроста при его равномерном распределении по лесосеке. Результаты вычислений по первому альтернативному варианту показывают заметное снижение контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек на которых находится подрост до уровня 60, 5 %, что на 31 % меньше, чем у традиционного варианта. Результаты вычислений по первому альтернативному варианту применения харвестера и форвардера показывают заметное снижение контакта крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек, на которых находится под-

рост до уровня 60, 5 %, что на 31 % меньше, чем у традиционного варианта. По второму альтернативному варианту позволяют сохранить подрост в ещё большем количестве, так как здесь контакт крон сваленных деревьев с поверхностью полупасек снижен до уровня 24, 2 %, что на 36 % меньше, чем у первого альтернативного варианта, и на 67 % меньше, чем традиционного.

3. Получено математическое выражение по определению повреждаемости подроста при устройстве технологических площадей для работы многооперационных машин на лесосеке.

4. Получена регрессионная зависимость показателя повреждаемости равномерно распределённого подроста на полупасеках при валке деревьев харвестером от густоты насаждения, интенсивности рубки, высоты вырубаемых деревьев, а также ширины пасеки и волока.

Заключение. Представленные в статье теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать математический аппарат для прогнозирования повреждаемости подроста на лесосеке при использовании системы машин «харвестер-форвардер» с учётом основных таксационных характеристик насаждения и лесоводственно-технологических параметров рубки. Полученные результаты рекомендованы к использованию на стадии проектирования лесозаготовительного производства для оценки функционирования технических средств с экономико-экологических позиций, также оценки квалификации оператора харвестера. С этой целью было создано программное обеспечение для научно-обоснованного выбора средощадящих технологий и технико-технологических параметров заготовки древесины многооперационными машинами «Программа для определения площади повреждённого подроста на лесосеке» (свидетельство о государственной регистрации № 2025667680).

Литература

1. Бухтояров Л.Д. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках / Бухтояров Л.Д., Абрамов В.В., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. // Resources and Technology. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2020. Т. 17 (3). С. 1–35.
2. Воронин П.В. Современные средства и методы для дистанционного измерения параметров древостоя // В сборнике: Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса - 2025. Материалы международной научной конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова и 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Воронеж: ВГЛТУ, 2025. – С. 159-163.
3. Глушков С.П. Исследование эколого-экономических параметров работы машины Mounty-4000 / Глушков С.П., Боядживев Д.И., Черных А.С., Попиков П.И., Афоничев Д.Н., Абрамов В.В., Полукаров Д.А. // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2025. Т. 14. № 2 (54). – С. 393-398.
4. Графова Е.О. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-западного региона РФ / Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В. // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. Т. 2 (50). С. 5–24.
5. Заикин А.Н. Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ / Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Чуйков А.С., Новиков А.И., Стасюк В.В. // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2024. Т. 14. № 2 (54). – С. 204–226.
6. Заикин А.Н. Методы снижения повреждаемости стволов деревьев при выборочных и санитарных рубках леса / Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – Архангельск: САФУ, 2019. Т. 4. С. 200–201.
7. Казаков Н.В. Повышение эффективности автоматизированного учета древесной продукции лесозаготовительного предприятия / Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Григорьев И.В. // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БГУ, 2025. № 1 (65). – С. 138-145.
8. Полукаров Д.А. Оценка способов работы харвестера и форвардера по степени сохранности лесной среды // В сборнике: Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВГЛТУ, 2021. – С. 40-41.
9. Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок / Черных А.С., Максименков А.И., Бухтояров Л.Д., Афоничев Д.Н., Абрамов В.В., Поздняков Е.В., Полукаров Д.А. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023662656, 09.06.2023. Заявка № 2023661918 от 09.06.2023.
10. Рогачев Д.И. Повышение технологической эффективности лесосечных работ с помощью системы поддержки принятия решений оператора валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Д.И. Рогачев; МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2025. 216 с.
11. Рогачев Д.И. Реализация сегментации деревьев для системы поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины / Рогачев Д.И., Клубничкин В.Е. // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БГУ, 2023. № 4 (60). – С. 169-175.
12. Рогачев Д.И. Фильтрация шумов сканируемого lidar участка леса на основе цветовых моделей / Рогачев Д.И., Козлов И.В., Клубничкин В.Е. // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. Т. 13. № 4.1 (52). – С. 125–139.
13. Рябухин П.Б. Лесозаготовки и экология лесной среды. // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БГУ, 2019. № 3 (43). – С. 96–99.
14. Рябухин П.Б. Экономико-математическое моделирование оценки эффективности деятельности предприятий лесопромышленного комплекса. // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БГУ, 2020. № 4 (48). – С. 139–144.
15. Сиваков В.В. Совершенствование работы лесозаготовительных машин в условиях внедрения цифровых технологий / Сиваков В.В., Заикин А.Н. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – СПб: СПбГЛТУ, 2025. № 255. – С. 320-335.
16. Троянов И.Н. Исследование технологических вариантов выполнения обрабатывающих операций лесосечных работ бензопилами / Троянов И.Н., Абрамов В.В., Бухтояров Л.Д., Афоничев Д.Н., Черных А.С., Максименков А.И. // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2019. Т. 3 (35). С. 114–130.
17. Черных А.С. Технологический процесс лесосечных работ как объект автоматизированного регулирования и управления // В сборнике: Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса – 2025. Материалы международной научной конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова и 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Воронеж: ВГЛТУ, 2025. – С. 393–398.
18. Glushkov S. Study of the work of modern logging machines in mountain conditions / Glushkov S., Boyadzhiev D., Cher-

nykh A., Popikov P., Afonichev D., Abramov V., Polukarov D., Savchenko S., Zhuzhukin K. // BIO Web of Conferences. – 2024. T. 145. – P. 03007.
19. Kaartinen H. et al. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning // Remote Sensing. 2022. Vol. 4. №. 4. P. 950–974.
20. Lefsky M.A. et al. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists // BioScience. 2022. Vol. 52. №. 1. P. 19–30.

References

1. Bukhtoyarov L.D. Analysis of the designs and technologies of forwarder operations in logging / Bukhtoyarov L.D., Abramov V.V., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V. // Resources and Technologies. – Petrozavodsk: PetrSU, 2020. Vol. 17 (3). Pp. 1–35.
2. Voronin P.V. Modern tools and methods for remote measurement of stand parameters // In the collection: Energy-resource-saving and environmentally safe technologies of the forestry industry complex – 2025. Materials of the international scientific conference dedicated to the 95th anniversary of the G. F. Morozov Voronezh State Forest Technical University and the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War. – Voronezh: Voronezh State Forest Technical University, 2025. – Pp. 159–163.
3. Glushkov S.P. Study of the ecological and economic parameters of the Mounty-4000 machine operation / Glushkov S.P., Boyadzhiev D.I., Chernykh A.S., Popikov P.I., Afonichev D.N., Abramov V.V., Polukarov D.A. // Forestry Engineering Journal. – Voronezh: VGLTU, 2025. Vol. 14. No. 2 (54). – Pp. 393–398.
4. Grafova E.O. Analysis of the factors of negative impact of logging production on the natural environment of the Northwestern region of the Russian Federation / Grafova E.O., Syunyov V.S., Gorbach V.V. // Forestry Engineering Journal. – Voronezh: VGLTU, 2023. Vol. 2 (50). Pp. 5–24.
5. Zaikin A.N. Automated operational management of logging operations: a methodological analysis / Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Chuykov A.S., Novikov A.I., Stasyuk V.V. // Forestry Engineering Journal. – Voronezh: VGLTU, 2024. Vol. 14. No. 2 (54). – Pp. 204–226.
6. Zaikin A.N. Methods for Reducing Damage to Tree Trunks during Selective and Sanitary Felling / Grafova E.O., Syunyov V.S., Gorbach V.V. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal. – Arkhangelsk: NArFU, 2019. Vol. 4. Pp. 200–201.
7. Kazakov N.V. Improving the efficiency of automated accounting of wood products at a logging enterprise / Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Grigoriev I.V. // Systems. Methods. Technologies. – Bratsk: BSU, 2025. No. 1 (65). – Pp. 138–145.
8. Polukarov D.A. Assessment of the operating methods of harvester and forwarder based on the degree of preservation of the forest environment // In the collection: Modern resource-saving technologies and technical means of the forest complex. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. – Voronezh: Voronezh State Forest Technical University, 2021. – Pp. 40–41.
9. Program for substantiation of technology and a system of machines for logging / Chernykh A.S., Maksimenkov A.I., Bukhtoyarov L.D., Afonichev D.N., Abramov V.V., Pozdnyakov E.V., Polukarov D.A. // Certificate of registration of the computer program RU 2023662656, 09.06.2023. Application No. 2023661918 dated 09.06.2023.
10. Rogachev D.I. Improving the technological efficiency of logging operations using a decision support system for the operator of a felling, debarking, and bucking machine [Text]: dis. ... Candidate of Technical Sciences / D.I. Rogachev; Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2025. 216 p.
11. Rogachev D.I. Implementation of tree segmentation for a decision support system for a logging machine operator / Rogachev D.I., Klubnichkin V.E. // Systems. Methods. Technologies. – Bratsk: BSU, 2023. No. 4 (60). – Pp. 169–175.
12. Rogachev D.I. Noise filtering of a forest area scanned by lidar based on color models / Rogachev D.I., Kozlov I.V., Klubnichkin V.E. // Forestry Engineering Journal. – Voronezh: VGLTU, 2023. Vol. 13. No. 4.1 (52). – Pp. 125–139.
13. Ryabukhin P.B. Logging and the ecology of the forest environment. // Systems. Methods. Technologies. – Bratsk: BSU, 2019. No. 3 (43). – Pp. 96–99.
14. Ryabukhin P.B. Economic and mathematical modeling of assessing the efficiency of лесопромышленного complex enterprises. // Systems. Methods. Technologies. – Bratsk: BSU, 2020. No. 4 (48). – Pp. 139–144.
15. Sivakov V.V. Improving the operation of logging machines in the context of digital technology implementation / Sivakov V.V., Zaikin A.N. // Proceedings of the St. Petersburg State Forest Technical Academy. – St. Petersburg: SPbGLTU, 2025. No. 255. – Pp. 320–335.
16. Troyanov I.N. Study of technological options for performing loading and unloading operations using chainsaws in logging / Troyanov I.N., Abramov V.V., Bukhtoyarov L.D., Afonichev D.N., Chernykh A.S., Maksimenkov A.I. // Forestry Engineering Journal. – Voronezh: VGLTU, 2019. Vol. 3 (35). Pp. 114–130.
17. Chernykh A.S. The technological process of logging operations as an object of automated regulation and control // In the collection: Energy-resource-saving and environmentally safe technologies of the forestry industry complex — 2025. Materials of the international scientific conference dedicated to the 95th anniversary of G. F. Morozov Voronezh State Forest Technical University and the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War. – Voronezh: VGLTU, 2025. – Pp. 393–398.
18. Glushkov S. Study of the operation of modern logging machines in mountainous conditions / Glushkov S., Boyadzhiev D., Chernykh A., Popikov P., Afonichev D., Abramov V., Polukarov D., Savchenko S., Zhuzhukin K. // BIO Web of Conferences. – 2024. Vol. 145. – P. 03007.
19. Kaartinen H. et al. An international comparison of methods for detecting and delineating individual trees using airborne laser scanning // Remote Sensing. 2022. Vol. 4. No. 4. Pp. 950–974.
20. Lefsky M.A. et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies. Lidar is a new remote sensing technology that allows for direct measurement of the three-dimensional distribution of vegetation cover. With its help, it is possible to accurately assess the structural characteristics of vegetation, which is of particular interest to specialists in the field of forest, landscape, and global ecology // BioScience. 2022. Vol. 52. No. 1. Pp. 19–30.