

 ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Обзорная статья

УДК 630*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163

Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки

К.П. Рукомойников[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: N-6961-2019.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Т.В. Сергеева, *аспирант*; *ResearcherID: AAY-9142-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

Т.А. Гилязова, *аспирант*; *ResearcherID: AFY-3945-2022.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Е.М. Царев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAB-2166-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

В.П. Комисар, *канд. филол. наук, доц.*; *ResearcherID: AAK-4178-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-5826>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; RukomojnikovKP@volgatech.net[✉], Sergeeva2010t@mail.ru,
tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, KomisarVP@volgatech.net

Поступила в редакцию 10.01.24 / Одобрена после рецензирования 14.03.24 / Принята к печати 19.03.24

Аннотация. Описана история развития имитационного моделирования в сфере функционирования машин для валки леса, названы основные лидеры в разработке систем компьютерной поддержки принятия управленческих решений, перечислены преимущества и недостатки различных подходов к имитационному моделированию производственного процесса в лесу. Целью исследования стала оценка достижений в данной области и поиск путей повышения их эффективности и совершенствования. Отмечено, что имитационный подход исключает колебания результатов из-за неконтролируемых факторов, таких как воздействие оператора и погода, а редкие нециклические рабочие элементы и задержки различных видов могут быть исключены из имитационной модели. Это облегчает сравнение производительности альтернативных систем машин и технологий в идеальных условиях. Проведенный обзор позволяет заострить внимание ученых на недостаточной изученности функционирования машин на валке деревьев при несплошных рубках леса; необходимости увеличения числа анализируемых факторов, повышающих точность моделирования; максимального использования в моделях современных технологических рекомендаций по работе операторов лесных машин; важности создания математических зависимостей с учетом факторов, влияющих на эффективность труда. Сделан вывод, что существующие модели перспективны, но все еще оставляют большое поле деятельности для дальнейшей модернизации и новых исследований. Обзор наглядно демонстрирует значительное увеличение числа анализируемых показателей природно-производственного процесса при имитационном моде-

лировании по сравнению с математическим и сокращение трудовых и материальных затрат по сравнению с изучением технологических процессов в производственных условиях. Имитационное моделирование машинной валки леса позволяет учесть влияние случайных факторов внешней среды, а также факторов взаимодействия лесозаготовительной техники. Широкое внедрение подобных компьютерных систем при заготовке лесоматериалов повысит эффективность технологических карт освоения лесных участков и обоснования нормативных показателей работы машин.

Ключевые слова: компьютерная поддержка принятия управленческих решений, моделирование лесосечных работ, технологический процесс лесосечных работ, производительность, время цикла, имитационный эксперимент, валка леса

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

Для цитирования: Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Комисар В.П. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 145–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-145-163>

Review article

Simulation Modeling of Technological Processes of Logging

Konstantin P. Rukomajnikov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Tatiana V. Sergeeva, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAV-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

Tatiana A. Gilyazova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Evgeny M. Tsarev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

Vera P. Komisar, Candidate of Philology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-4178-2020](https://orcid.org/0000-0001-8216-5826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-5826>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; RukomajnikovKP@volgatech.net[✉], Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, KomisarVP@volgatech.net

Received on January 10, 2024 / Approved after reviewing on March 14, 2024 / Accepted on March 19, 2024

Abstract. The history of the development of simulation modeling in the field of operation of forest felling machines is described, the main leaders in the development of computer support systems for managerial decision-making are named, and the advantages and disadvantages of various approaches to simulation modeling of the production process in the forest are listed. The aim of the research has been to evaluate achievements in this field and find ways to increase their effectiveness and improvement. It has been noted that the simulation approach eliminates fluctuations in results due to uncontrollable factors such as operator exposure and weather conditions, and rare non-cyclical working elements and delays of various types can be excluded from the simulation model. This facilitates comparison of the performance of alternative machine systems and technologies under ideal conditions. The conducted review makes it possible to focus the attention of scientists on the lack of knowledge of the



functioning of machines for felling trees in conditions of non-continuous logging; the need to increase the number of analyzed factors that improve the accuracy of modeling; maximum use in models of modern technological recommendations for the work of forest machine operators; the importance of creating mathematical dependencies taking into account factors affecting labour efficiency. It has been concluded that the existing models are promising, but still leave a large field for further modernization and new research. The review clearly demonstrates a significant increase in the number of analyzed indicators of the natural production process in simulation modeling compared to mathematical one and a reduction in labour and material costs compared to the research of technological processes in production conditions. Simulation modeling of machine felling allows taking into account the influence of random environmental factors, as well as factors of interaction between logging equipment. The widespread introduction of such computer systems in timber harvesting will increase the efficiency of technological maps for the development of forest plots and the substantiation of standard machine performance indicators.

Keywords: computer support for managerial decision-making, logging simulation, technological technological process of logging operations, performance, cycle time, simulation experiment, felling
Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

For citation: Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Komisar V.P. Simulation Modeling of Technological Processes of Logging. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 145–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-145-163>

В настоящее время существуют математические алгоритмы для расчета производительности машин, обоснования трудозатрат на выполнение различных технологических операций. Лесная отрасль не является исключением. Математическое моделирование [4, 5, 9, 17, 20, 29] и, в частности, имитационное моделирование [1, 12], технологических процессов широко используется на всех стадиях лесозаготовительного производства. При проектировании технологии работ в лесной отрасли нашли применение системы математического моделирования для прогноза объемов заготовленного сырья и трудозатрат на этапах технологического процесса [13, 19, 24, 63, 77], расчета топлива лесозаготовительной техники при выполнении цикла лесосечных работ и перебазировок лесосечных машин [22, 23], для решения транспортных задач при перевозке заготовленного сырья и конечной продукции [64, 82], а также решения комплексных задач управления лесохозяйственными и лесозаготовительными процессами [6–8, 28].

На лесных участках разных стран на валке деревьев широко используются разнообразные одно- и многооперационные лесосечные машины. В частности, почти 100 % лесозаготовок в Швеции и Финляндии осуществляются системами машин для сортиментной заготовки древесины с применением комплекта машин из харвестера и форвардера [62]. В этих и других странах было проведено несколько исследований, включая анализ производительности и затрат [88], оценку харвестера в цепочке поставок древесины [52, 92, 101]. В Северной Америке системы машин для сортиментной заготовки используются примерно в 20–30 % случаев [53], уступая позиции специализированным валочным машинам. Еще меньше таких систем применяется на юго-востоке

США, где зафиксировано не более 1 % случаев ее использования [68]. В России доля сортиментной заготовки леса в общем объеме рубок составляет примерно 30 %, а на Северо-Западе доходит до 90 %, что связано с близостью Финляндии и небольшими размерами лесосек.

Оценка производственной эффективности машин для заготовки леса [21, 106] является актуальной по причине различных природно-производственных условий на каждой лесосеке. Учесть влияние всех природно-производственных факторов в реальных условиях затруднительно ввиду необходимости проведения значительного числа экспериментальных исследований с целью достижения достоверных результатов.

В случае экспериментальных исследований работы машины в реальных производственных условиях при обосновании нормативов выработки лесных машин наблюдения должны осуществляться за эталонным, физически здоровым рабочим, находящимся в бодром состоянии, в отсутствии не связанных с его производственной деятельностью проблем, не осознающим того, что происходит фотохронометражная фиксация всех его действий. Создание таких условий представляется сложно контролируемым, а в случае их невыполнения достоверность опытов может быть подвергнута сомнениям. Фотохронометражные наблюдения связаны с неточностью выбора фиксажных точек наблюдателем и многими другими факторами, которые реально исключить при решении данных вопросов точными математическими методами. В связи с этим методика обоснования норм выработки, базирующаяся на проведении фотохронометражных наблюдений, является не только излишне трудоемкой, но также зачастую оказывается недостоверной.

Имитационное моделирование [10, 14, 15] основано в первую очередь на природных (количество и взаимное расположение деревьев, подлеска, подроста и т. д.) и производственных (технология работы, технические характеристики техники: скорость движения машины, угловая и линейная скорости движения манипулятора) условиях. Именно такие природно-производственные факторы, поддающиеся четкому математическому анализу, должны быть использованы при обосновании норм выработки, а не индивидуальные личностные и профессиональные качества оператора. Лишь в случае математического подхода из анализа могут быть максимально исключены задержки, вызванные работой оператора и не связанные с природно-производственными условиями лесосеки, для обоснования норм выработки в рамках эффективного машино-часа. В настоящее время, когда в распоряжении ученых есть такой инструмент анализа, как имитационное моделирование технологических процессов, упор в обосновании норм выработки следует сделать именно на него. Применение современных языков программирования позволяет оценить все необходимые траектории движения как самой машины, так и ее отдельных технологических элементов, исключая непроизводительные потери времени и неверные действия оператора машины.

В логически верно построенную имитационную модель должны быть заложены точки размещения деревьев, технические характеристики машины, технология работы и последовательность действий оператора. Этого достаточно, чтобы имитировать работу без учета задержек, связанных с эмоциональными, профессиональными, личностными и физическими качествами оператора.

В итоге создается эталонный показатель деятельности оператора, а благодаря использованию принципа проведения многократных имитационных экспериментов у исследователя появляется возможность анализа различных вариаций природных условий с заданными им основными исходными параметрами. Имитационная модель позволяет оценить диапазон варьирования искомых результатов работы, обосновать верхнюю и нижнюю границы этого доверительного интервала, соответствующие наилучшим и наихудшим из технически возможных производственных результатов выработки. Значения, попадающие в этот интервал, следует утвердить в качестве норматива для машины. Нижняя граница описанного интервала может быть принята за норматив, который достигается при непрерывной, отлаженной работе оператора при самом негативном для него сочетании исследуемых природных условий лесосеки. Это значение правильно признать за нормативный показатель деятельности оператора в рамках эффективного машино-часа в отсутствие технических неполадок используемой техники.

Основными лидерами в разработке компьютерной поддержки принятия управленческих решений в нормировании труда на лесосечных работах, в частости систем имитационного моделирования, являются:

Америка: В.Р. Hartsough [72], Y. Li [79], J. Wang et al. [75, 94, 97–99], W.D. Greene et al. [69], J.L. Garbini et al. [61], K. Stampfer et al. [90], D.M. Aedo-Ortiz et al. [44], S.U. Randhawa et al. [85], S.A. Winsauer et al. [102, 105], W.B. Stuart [91], B.B. Bare et al. [46], D.P. Bradley et al. [50], L.E. Fisher et al. [56], S.E. O’Hearn et al. [84], D.V. Goulet et al. [65, 66], D.B. Webster [100], J.R. Killham [78], L.R. Johnson et al. [74, 75], L.D. Kellogg et al. [76], J.F. McNeel et al. [81] и др.;

Финляндия: А. Asikainen [45], Т. Nurminen et al. [83] и др.;

Швеция: D. Bergström et al. [47, 48], L. Sängstuvall et al. [87], O. Lindroos [80], L. Eliasson et al. [54];

Центральная Европа (Италия, Австрия): R. Spinelli et al. [89];

Россия: А.П. Соколов и др. [30–33], Ю.Ю. Герасимов и др. [2], Д.В. Черник [41], О.Р. Чайка и др. [38–40], Ю.А. Ширнин и др. [42], С.Н. Перский [16], Ю.В. Суханов и др. [35], А.К. Редькин и др. [18], А.В. Макаренко [11] и др.

Существуют также совместные научные изыскания ученых разных стран. К примеру, исследования В. Talbot (Южная Африка) и К. Suadicani (Дания) [93] и др.

Имитационные модели предоставляют ценные гибкие инструменты для оценки возможностей лесопромышленного комплекса, например, концепций развития лесозаготовительных машин, и поэтому вызывают повышенный интерес у ученых различных стран. С использованием моделирования технологических процессов конкретное действие может быть выполнено несколько раз с разными настройками программы.

Самой ранней попыткой имитационного моделирования являлось имитирование заготовки балансов с применением детерминированного подхода, реализованное в США [73, 100]. В дальнейшем L.R. Johnson et al. [74, 75] провели более широкое моделирование технологического процесса, допускающее использование случайных факторов. Однако наряду с перспективностью предложенного направления работы, полученные результаты показали необходимость дополнительных исследований в данном направлении.

Модель симуляции складирования, измельчения, сортировки, погрузки, транспортировки и выгрузки лесоматериалов была предложена В.В. Vare et al. [46] для оценки процессов обработки порубочных остатков. Однако эта модель не позволяла охарактеризовать взаимосвязи между операциями.

Обобщение 8 имитационных моделей, доступных до 1980 г., с сопоставлением их свойств было выполнено D.V. Goulet et al. [65, 66].

W.B. Stuart [91] разработал систему моделирования функционирования лесосечных машин, которая определяла доступную для движения манипулятора часть пасаки и имитировала спиливание ближайшего к ней дерева с дальнейшим переходом к следующему ближайшему дереву.

Были предложены имитационная модель проверки работоспособности валочно-пакетирующей машины с резиновыми шинами [104] и грейферного трелевочного трактора и рубительной машины для измельчения деревьев [103]. Модели реализованы на языке Fortran и представляли собой дискретные программы имитирования событий для оценки производительности как отдельных, так и взаимодействующих между собой машин.

J.L. Garbini et al. [61] осуществили сочетание методов численного моделирования на языке Fortran с графической анимацией. Численное моделирование использовалось для расчета расположения деревьев и заготовленной древесины, а графическая анимация давала возможность быстрого поиска ошибок, вызванных числовым моделированием. Входными данными являлись характеристики сырья и готовой продукции, а также параметры самой машины.

J.L. Fridley et al. [57–60] с использованием моделирования и графической анимации объектов технологического процесса исследовали работу валочно-пакетирующей машины при рубках прореживания с целью анализа воздействия различных конструктивных параметров машины на ее эффективность.

При моделировании валочно-пакетирующей машины W.D. Greene et al. [67, 69, 70] изучили влияние насаждений и эксплуатационных факторов на ее производительность. Был сделан вывод, что средний диаметр деревьев и их количество являются наиболее важными из факторов, а ширина пасаки и среднее расстояние между деревьями играют меньшую роль. В процессе интерактивного моделирования ученые обнаружили, что влияние человеческого фактора на работу машины минимально [71].

Анализ значимости изменения физических параметров валочно-пакетирующей машины был осуществлен на базе 3-мерной цветной интерактивной компьютерной графической симуляции в режиме реального времени, разработанной W.A. Block et al. [49]. Программное обеспечение позволяло пользователю оценивать производительность при изменении физических параметров техники.

J. Wang et al. [98] предложили интерактивную систему моделирования древостоев и анализа производительности лесосечных машин. Моделирование выполнялось путем перемещения изображений машин на картах древостоев на экране компьютера. Оценены потенциальные взаимодействия типа древостоя, метода сбора урожая и оборудования. Исследованы 3 метода валки (бензопила, валочно-пакетирующая машина и харвестер) и 2 способа трелевки (грейферный трелевочный трактор и форвардер) как для разновозрастного древостоя, так и для одновозрастного. Метод полезен при сравнении альтер-

нативных систем в различных ситуациях сбора заготовленной древесины. Для повышения эффективности разработана событийно-ориентированная имитационная модель [95, 96].

Анализ существующих исследований показывает, что наибольшую сложность при моделировании вызывают перемещения валочной машины, выполняющей выборочные рубки. Техника, задействованная на валке, должна осуществлять движения с избеганием повреждений оставляемых на дорашивание деревьев, эффективно перемещаясь между спиливаемыми деревьями. Многие имитационные модели либо не учитывают движения лесосечных машин в этих условиях, либо делают это неадекватно. Предложен вариант оценки повреждения деревьев в ходе лесосечных работ с использованием интерактивной программы компьютерной симуляции. Она могла имитировать эффективность лесосечных работ в различных лесохозяйственных условиях [51]. При эмпирическом сравнении компьютерной модели и реальных производственных объектов модель с оценкой ущерба оставляемым на дорашивание деревьям хорошо себя зарекомендовала, но ее развитие с применением данных других лесосечных машин и древостоев может значительно повысить эффективность моделирования.

Современная среда и методы компьютерного моделирования XXI в. значительно улучшили и расширили подходы к имитированию лесосечных работ, использовавшиеся ранее. В частности, Y. Li [79] была разработана система моделирования путем оценки производительности, затрат и интенсивности движения при различных конфигурациях лесосек и способах рубок. Рассмотрены 5 способов рубок, реализуемых в Северной Америке. Автор предусмотрел отдельный блок программы для генерации древостоя, который может быть отображен как в 2-мерном, так и в 3-мерном пространстве моделирования. Результаты показали, что на производительность и стоимость работ в первую очередь влияли размер удаляемых деревьев, интенсивность вырубki, расстояние между срубленными деревьями и технические характеристики машин. Сплошные рубки всегда давали наибольшую производительность, а выборочные были наименее производительны.

Данная модель отличается детальностью анализа препятствий на пути манипулятора к захватываемому дереву, при этом она дает возможность наблюдения как за харвестером, так и за валочно-пакетирующей машиной, перемещающимися по пасекам. Однако в случае использования харвестера предусмотрено, что он движется по волоку, все деревья на котором удалены до начала движения машины в ходе предыдущих этапов рубки, что не всегда соответствует варианту ведения работ на обширных лесных территориях РФ, не тронутых рубками. Кроме того, в модели не учтены рекомендации по последовательности освоения рабочих зон вблизи харвестера, отсутствует анализ траектории движения манипулятора при перемещении поваленных деревьев в зону их обработки с минимизацией повреждений оставляемых на дорашивание деревьев, не приняты во внимание рекомендации по зонам укладки сортиментов вблизи харвестера. Также не учтен крупный подлесок, создающий значительные препятствия на пути движения манипулятора в лиственных и смешанных древостоях.

Имитационный подход исключает колебания результатов из-за неконтролируемых факторов, таких как воздействие оператора [80] и погодных условий.

Редкие нециклические рабочие элементы [55], а также задержки различных видов [89] могут быть исключены из имитационной модели. Это облегчает сравнение производительности альтернативных систем в идеальных условиях.

Значительный интерес представляет исследование L. Sängstuvall et al. [87], в котором представлена первая имитационная модель выборочной обработки нескольких деревьев за цикл движения манипулятора. Особое внимание уделено сохранности оставляемых деревьев в процессе наведения манипулятора на удаляемые деревья. Оценена продуктивность инновационных систем при рубках ухода молодняка с широкими диапазонами среднего диаметра (1,5–15,6 см), деревьев на площади (1000–19 100 дер./га) и средней высоты (2,3–14,6 м). Для анализа использованы 56 типовых насаждений, характерных для большей части территории Швеции и не подвергавшихся 1-му прореживанию. Базовые уровни интенсивности рубки были установлены в 30, 40 и 50 % от общей площади древостоя с доведением числа деревьев до 1000–4000 дер./га. Компьютерное программирование и моделирование выполнены с использованием программного обеспечения MatLab. Несмотря на то, что результаты моделирования предусматривали участки без предварительного прореживания и прокладку волока в ходе основной рубки за счет движения харвестера, они соответствуют лишь работе в молодняках с большим количеством тонкомерных деревьев, требования к сохранности которых в процессе рубки гораздо ниже, чем при рубках прореживания, проходных и выборочных рубках в спелых древостоях, а следовательно, предполагают дополнительные исследования для случая более возрастных древостоев. Проведен анализ геометрического метода выбора деревьев в рубку, подходящего только для молодых насаждений.

Среди современных российских исследований в области имитационного моделирования технологического процесса на лесосеках особого внимания заслуживают разработки Петрозаводского государственного университета на языке C++. Ю.В. Сухановым и др. [34–36], А.П. Соколовым [30, 31] выполнена симуляция действий специализированных лесосечных машин, которая наряду с анализом производительности позволяет эффективно учитывать повреждения наносимые оставляемым на доращивание деревьям при наведении манипулятора, валке дерева, его подтаскивании и обработке, при перемещении харвестера по технологическому коридору в условиях сложного рельефа. Программа эффективно оценивает доступность деревьев и рассчитывает время наведения манипулятора на выбранное дерево. При этом математические зависимости, отслеживающие время движения манипулятора к дереву, предусматривают синхронизацию операций поворота манипулятора и его прямолинейного перемещения к дереву. Однако уделено недостаточное внимание тому, что синхронизация операций более характерна для сплошных рубок и не всегда достижима при выборочных, при которых возможность движения манипулятора по кратчайшей траектории ограничена и предполагается его последовательное перемещение в обход препятствий с разделением угловых и прямолинейных движений на несколько этапов. Не учтено разделение обрабатываемой с одной рабочей позиции площадки на зоны, а следовательно, программа не может анализировать варианты технологической очередности валки деревьев с одной рабочей позиции.

Вариант имитационной модели, позволяющей учесть препятствия для движения манипулятора лесного харвестера в виде оставляемых на доращивание деревьев нецелевого компонента рубки и крупного подлеска, предложен сотрудниками Поволжского государственного технологического университета [25–27, 86]. В отличие от ранее созданных систем моделирования процессов освоения лесных участков, использующих метод дискретно-событийного имитационного моделирования, основным методом для реализации проекта был выбран метод агентного имитационного моделирования процессов, анализирующий действия децентрализованных динамически взаимодействующих агентов и симулирующий производственные процессы, переходя от показателей микроуровня к показателям макроуровня. Система представляется в виде агентов: заявок, ресурсов и обслуживаемых систем. Каждый агент может иметь свою программную реализацию, что дает возможность последующего внедрения в модель дополнительных агентов моделирования без нарушения целостности работы всей системы.

В своих исследованиях В.В. Журавлев и др. [3], Чайка и др. [39] продемонстрировали возможности имитационного моделирования на примере харвестера в искусственных насаждениях и показали, что отдельные деревья, отобранные в рубку, могут быть доступны с 2 и более рабочих позиций харвестера, в т. ч. с соседних пасек. Ограничением модели является возможность ее использования лишь при искусственных посадках лесных насаждений рядами, что не позволяет повсеместно применять ее на практике.

Ю.Ю. Герасимов и др. [2], С.Н. Перский [16] провели проверку эффективности функционирования систем лесосечных машин на основе имитационного моделирования и ГИС-технологий. При этом учитывались как природно-производственные условия, так и параметры лесосечных машин со свойственными для них показателями надежности. Созданная модель показала свою работоспособность, но ее использование ограничено условиями сплошных рубок.

По мнению С.Б. Якимовича и др. [43], М.А. Тетериной [37], А.К. Редькина и др. [18], наиболее значимыми характеристиками симуляции лесосечных процессов являются согласованность работы лесосечных машин, степень их загрузки и продолжительность простоев, изменение допустимых нагрузочных и скоростных параметров в зависимости от режима работы машин и лесорастительных условий.

Заключение

Проведенный обзор позволяет заострить внимание ученых на недостаточной изученности работы машин, задействованных на валке деревьев в условиях несплошных рубок леса: большинство из предыдущих научных работ относятся либо к конкретным регионам, либо к определенным условиям древостоя, что обуславливает неполноту информации о производственном процессе и стоимости систем сортиментной заготовки для лесов РФ. Не все полученные в ходе ранее проведенных имитационных исследований результаты представлены их разработчиками в виде математических зависимостей с возможностью пересчета для других производственных условий без использования специализированных программных средств. Обоснованные же на данный момент математические зависимости нацелены лишь на поиск путей повышения про-

изводительности лесосечных машин для валки леса и не позволяют детально анализировать трудоемкость отдельных элементов технологического цикла работы, зависящих от природно-производственных условий лесосек. Многие рассмотренные научные труды основаны на данных, которые отличаются от встречающихся сегодня в РФ, зарубежные исследования зачастую выполнены лишь с учетом движения машины по волокам, оставшимся от предыдущих этапов рубки и не предусматривают самостоятельную расчистку волока, что не всегда характерно для обширных территорий лесов РФ. Выполненные исследования имеют ограничения по анализируемым в них факторным признакам и не принимают во внимание влияние препятствий в виде крупного подлеска на территории смешанных и лиственных лесов РФ, воздействующего на эффективность работы лесосечных машин при валке деревьев. В ходе анализа существующих систем имитационного моделирования лесосечных работ выявлено, что в них недостаточно учтены современные технологические рекомендации ведения работ, характеризующие последовательность действий оператора при освоении рабочей зоны вблизи машины. При моделировании целесообразно повышение уровня оценки действий операторов многофункциональных лесных машины, сокращающих повреждения древостоя в процессе перемещения поваленных деревьев в зону дальнейшей обработки.

Исследователи продемонстрировали полезность интерактивного компьютерного моделирования лесных машин, задействованных на валке деревьев. Однако существующие разработки оставляют большое поле деятельности для их модернизации и новых исследований. Это позволит увеличить число анализируемых показателей природно-производственного процесса по сравнению с математическим моделированием и минимизировать трудовые и материальные ресурсы по сравнению с производственными исследованиями в данной области.

Разработка систем компьютерного моделирования функционирования лесных машин является направлением, дающим возможность учесть влияние случайных факторов внешней среды, а также факторов взаимодействия техники в процессе лесозаготовительного производства. Широкое внедрение подобных компьютерных систем при заготовке древесины на лесосеках позволит повысить эффективность технологических карт освоения лесных участков и обоснования нормативных показателей работы машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Герасимов Ю.Ю., Давыдков Г.А., Кильпелайнен С.А., Соколов А.П., Сяунев В.С. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 5. С. 122–129.

Gerasimov Yu.Yu., Davydkov G.A., Kilpelainen S.A., Sokolov A.P., Syunyov V.S. Prospects of Applying New Information Technologies in Forest Complex. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 5, pp. 122–129. (In Russ.).

2. 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: ВоГТУ, 2004. С. 286–289.

Gerasimov Yu.Yu., Perskij S.N. Simulation Model of Continuous Logging Based on GIS Technologies. *Modeling, Optimization and Intensification of Production Processes and Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Vologda, Vologda State University, 2004, pp. 286–289. (In Russ.).

3. Журавлев В.В., Чайка О.Р. Методика оценки доступности деревьев для захвата при моделировании работы харвестера на рубках ухода в искусственных насаждениях // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 21–25.

Zhuravlev V.V., Chaika O.R. Methodology for Assessing the Availability of Trees for Capture when Modeling the Operation of a Harvester during Thinning in Artificial Plantations. *Modern Resource-Saving Technologies and Technical Means of the Forestry Complex: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry named after. G.F. Morozov, 2021, pp. 21–25. (In Russ.).

4. Заикин А.Н. Моделирование режимов работы лесосечных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 71–77.

Zaikin A.N. Simulation of Logging Machines Operation Modes. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2009, no. 1, pp. 71–77. (In Russ.).

5. Заикин А.Н. Математическое моделирование режимов работы лесосечных машин и анализ изменения объемов оперативных запасов // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 69–75.

Zaikin A.N. Designing of Operation Modes of Logging Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 69–75. (In Russ.).

6. Заикин А.Н. Моделирование процессов лесозаготовок как основа снижения негативного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 72–77.

Zaikin A.N. Simulation of Logging Processes as Basis of Lowering Negative Impact of Forest Machines on Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 2, pp. 72–77. (In Russ.).

7. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С., Зеликова Н.В. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости // Лесотехн. журн. 2022. Т. 12, № 1(45). С. 96–109.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S., Zelikova N.V. Software for the Management of Forestry and Logging Processes: Assessment of Applicability. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2022, vol. 12, no. 1(45), pp. 96–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8>

8. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // Лесн. вестн. 2023. Т. 27, № 4. С. 172–184.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. Software in Forestry and Logging. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 172–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-172-184>

9. Иванников В.А. Совершенствование системы формирования грузопотоков лесоматериалов на смежных видах транспорта: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2019. 331 с.

Ivannikov V.A. *Improving the System of Formation of Timber Freight Flows on Related Types of Transport*: Doc. Tech. Sci. Diss. Voronezh, 2019. 331 p. (In Russ.).

10. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование // Классика CS. 3-е изд. СПб: Питер; Киев: Издат. группа BHV, 2004. 847 с.

Law A.M., Kelton W.D. *Simulation Modeling and Analysis. Classics of CS*. 3rd ed. St. Petersburg, Piter, Kiev, BHV Publ. Group, 2004. 847 p. (In Russ.).

11. Макаренко А.В. Имитационное моделирование работы лесозаготовительной машины с помощью сетей Петри // Науч. тр. МГУЛ, «Технология и оборудование лесопромышленного производства». 2011. Вып. 356. С. 44–49.

Makarenko A.V. Simulation of a Logging Machine Using Petri Nets. *Scientific Works of Moscow State Forest University*, “Technology and Equipment for Forest Industry Production”, 2011, iss. 356, pp. 44–49. (In Russ.).

12. Мохирев А.П. Обоснование доступности древесных ресурсов путем моделирования структуры лесотранспортных потоков (на примере Красноярского края РФ): дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2021. 402 с.

Mokhirev A.P. *Substantiation of the Availability of Wood Resources by Modeling the Structure of Forest Transport Flows (Using the Example of the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation)*: Doc. Tech. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2021. 402 p. (In Russ.).

13. Мохирев А.П., Рукомойников К.П. Моделирование структуры лесотранспортных потоков. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-тет, 2022. 396 с.

Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P. Modeling the Structure of Timber Transport Flows. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2022. 396 p. (In Russ.).

14. Официальный сайт компании The AnyLogic Company производителя инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 03.12.23).

The Official Website of The AnyLogic Company, a Manufacturer of Simulation Tools and Business Applications. (In Russ.).

15. Официальный сайт Национального общества имитационного моделирования. Режим доступа: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения: 04.12.23).

The Official Website of the National Simulation Society. (In Russ.).

16. Перский С.Н. Блок-схема имитационной модели «Сплошные рубки» // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам 5-й междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГИТА, 2004. Вып. 8. С. 196–197.

Perskiy S.N. Block Diagram of the Simulation Model “Clear Felling”. *Aktual'nye problem lesnogo kompleksa*: Collection of Scientific Papers on the Results of the 5th International Scientific and Technical Conference. Bryansk, Bryansk State Technological University of Engineering, 2004, iss. 8, pp. 196–197. (In Russ.).

17. Пильник Ю.Н. Методы и алгоритмы синтеза организационных структур формирования сетевых грузопотоков лесоматериалов многоуровневых транспортно-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2019. 340 с.

Pil'nik Yu.N. *Methods and Algorithms for Synthesizing Organizational Structures for Forming Network Freight Flows of Timber of Multi-Level Transport and Technological Systems*: Doc. Tech. Sci. Diss. Voronezh, 2019. 340 p. (In Russ.).

18. Редькин А.К., Макаренко А.В. Особенности отсчета модельного времени при имитационном моделировании работы лесозаготовительных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 3. С. 53–57.

Redkin A.K., Makarenko A.V. Countdown the Time for Simulation of Work Forest Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 53–57. (In Russ.).

19. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 154–158.

Rukomojnikov K.P. Imitating Modeling of Work of Complete Sets of Adaptive-Modular Wood Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 154–158. (In Russ.).

20. Рукомойников К.П. Выбор рациональной технологии и обоснование параметров поквартального освоения лесных участков. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-тет, 2016. 296 с.

Rukomojnikov K.P. Selection of Rational Technology and Justification of Parameters for Quarterly Development of Forest Areas. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2016. 296 p. (In Russ.).

21. Рукемойников К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127.

Rukomoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 1, pp. 120–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120>

22. Рукемойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 117–127.

Rukomojnikov K.P., Kuptsova V.O. Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-117-127>

23. Рукемойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т.В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 148–158.

Rukomojnikov K.P., Kuptsova V.O., Sergeeva T.V. A Mathematical Model of Fuel Consumption for the Forwarder Amkodor-2682 when Performing Forestry Operations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 6, pp. 148–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-148-158>

24. Рукемойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukomojnikov K.P., Mokhiev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

25. Рукемойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжечных машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113.

Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. Computer Simulation of the Development of Logging Sites Using a Felling-Delimiting Bucker. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2(54), pp. 108–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-2-108-113>

26. Рукемойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесн. вестн. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 69–80.

Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Modeling Operation of Forest Harvester in Anylogic Simulation System. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614531 РФ. Программа моделирования работы харвестера: № 2022613687; заявл. 16.03.2022; опубл. 23.03.2022 / К.П. Рукемойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, В.П. Комисар; заявитель – Поволж. гос. технол. ун-тет.

Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Kommissar V.P. *Harvester Operation Simulation Program*. Certificate of State Registration of a Computer Program no. 2022614531 RF. (In Russ.).

28. Сиваков В.В., Заикин А.Н., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» // Лесотехн. журн. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 200–218.

Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Digitalization of the Workflow Management System of Logging Machines: Efficiency Assessment Using the Example of “Ponsse”, “Komatsu”, and “John Deere”. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2023, vol. 13, no. 3(51), pp. 200–218. (In Russ.).

29. Соколов А.П. Комплексное освоение лесосырьевых баз: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2015. 329 с.

Sokolov A.P. *Integrated Development of Forest Raw Material Bases: Substantiation of Technologies and Process Parameters Based on a Logistic Approach*: Doc. Tech. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2015. 329 p. (In Russ.).

30. Соколов А.П. Поддержка выбора технологической схемы разработки лесосеки с помощью имитационной модели // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. ст. Красноярск, 2020. С. 193–197.

Sokolov A.P. A Decision Support Method for Wood Harvesting Technological Scheme Choice. *Lesoeksploatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny*: Collection of Articles. Krasnoyarsk, 2020, pp. 193–197. (In Russ.).

31. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехн. журн. 2017. № 3. С. 307–314.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation of the Production Process of Timber Harvesting with the Help of Petri Nets. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 307–314. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712

32. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование процесса лесозаготовок в условиях ветровальной лесосеки // Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2018. Вып. 5. С. 74–77.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation Modeling of the Logging Process in Windfall Logging Conditions. *Voprosy sovremennykh tekhnicheskikh nauk*: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg, 2018, iss. 5, pp. 74–77. (In Russ.).

33. Соколов А.П., Осипов Е.В. Обоснование технологии заготовки древесины с помощью имитационного моделирования на сетях Петри // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1. С. 111–119.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Substantiation of the Technology of Wood Harvesting with the Help of Imitation Modeling on Petri Net. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 111–119. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095

34. Суханов Ю.В. Система моделирования лесозаготовок с учетом потребностей биоэнергетики // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 152–157.

Suhanov Y.V. Computer Simulation of Wood Harvesting with Consideration of Bioenergy. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 1(93), pp. 152–157. (In Russ.).

35. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Уч. зап. Петрозаводск. гос. ун-та. 2012. № 8-2(129). С. 49–51.

Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. Simulation modeling of Harvester Operation: Algorithms and Implementation. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo*

gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University, 2012, no. 8-2(129), pp. 49–51. (In Russ.).

36. Суханов Ю.В., Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Оценка экономической эффективности систем машин для производства топливной щепы в Республике Карелия // *Resources and Technology*. 2013. Т.10, № 1. С. 1–23.

Sukhanov Yu.V., Sokolov A.P., Gerasimov Yu.Yu. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Karelia. *Resources and Technology*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 1–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2013.1941>

37. Тетерина М.А. Обоснование параметров обрабатывающе-транспортной системы «харвестер-форвардер» (на примере предприятий Пермского края): дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 197 с.

Teterina M.A. Justification of the Parameters of the Processing and Transport System “Harvester-Forwarder” (Using the Example of Enterprises in the Perm Territory): Doc. Tech. Sci. Diss. Moscow, 2009. 197 p. (In Russ.).

38. Чайка О.Р., Журавлев В.В. Обоснование параметров технологического оборудования харвестеров для несплошных рубок леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 2. С. 39–40.

Chayka O.R., Zhuravlev V.V. Justification of Parameters of Harvesters’ Technological Equipment for Non-Final Loggings. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2021, no. 2, pp. 39–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40>

39. Чайка О.Р., Мухеев К.П. Алгоритм моделирования захвата и срезания деревьев харвестером на несплошных рубках леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 12. С. 30–33.

Chayka O.R., Mikheyev K.P. Simulation Algorithm for Gripping and Cutting of Trees by Harvester in Case of Incompleted Forest Felling. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2019, no. 12, pp. 30–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33>

40. Чайка О.Р., Фокин Н.С. Алгоритм моделирования параметров лесных насаждений // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 12. С. 41–43.

Chayka O.R., Fokin N.S. Simulation Algorithm of Parameters of Forest Plantations. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2018, no. 12, pp. 41–43. (In Russ.).

41. Черник Д.В., Казанцев Р.В. Имитационное физическое моделирование универсальной лесозаготовительной машины // Хвойные бореал. зоны. 2020. Т. 38, № 3-4. С. 183–188.

Chernik D.V., Kazantsev R.V. Imitational Physical Modeling of a Universal Forestry Machine. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2020, vol. 38, no. 3-4, pp. 183–188. (In Russ.).

42. Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 66–72.

Shirnin Yu.A., Onuchin E.M. Simulation Modeling of the Movement of a Multi-Functional Forest Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.).

43. Якимович С.Б., Тетерина М.А. Моделирование стохастических обрабатывающе-транспортных систем с перемещаемыми запасами // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 6. С. 71–76.

Yakimovich S.B., Teterina M.A. Modeling of Stochastic Processing and Transport Systems with Moving Stocks. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2007, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.).

44. Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a Harvester-Forwarder Softwood Thinning: A Software Evaluation. *Forest Products Journal*, 1997, vol. 47, iss. 5, pp. 36–41.
45. Asikainen A. Simulation of Stump Crushing and Truck Transport of Chips. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 3, pp. 245–250. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.488656>
46. Bare B.B., Jayne B.A., Anholt B.F. *A Simulation-Based Approach for Evaluating Logging Residue Handling Systems*: General Technical Report PNW-45. Oregon, Portland, US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1976. 30 p.
47. Bergström D., Bergsten U., Nordfjell T., Lundmark T. Simulation of Geometric Thinning Systems and Their Time Requirements for Young Forests. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 1, art. no. 311. <https://doi.org/10.14214/sf.311>
48. Bergström D. *Techniques and Systems for Boom-Corridor Thinning in Young Dense Forests*: Doctoral Thesis. Umeå, Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2009. 87 p.
49. Block W.A., Fridley J.L. Simulation of Forest Harvesting Using Computer Animation. *Transactions of the ASAE*, 1990, vol. 33, no. 3, pp. 967–974. <https://doi.org/10.13031/2013.31425>
50. Bradley D.P., Biltonen R.E., Winsaure S.A. A Computer Simulation of Full-Tree Field Chipping and Trucking. *Research Paper NC-129*. Minnesota, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1976. 14 p.
51. Bragg W.C., Ostrofsky W.D., Hoffman B.F., Jr. Residual Tree Damage Estimates from Partial Cutting Simulation. *Forest Products Journal*, 1994, vol. 44, iss. 7/8, pp. 19–22.
52. Chiorescu S., Grönlund A. Assessing the Role of the Harvester within the Forestry-Wood Chain. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 2, pp. 77–84.
53. Conradie I.P., Greene W.D., Murphy G.E. Value Recovery with Harvesters in Southeastern USA Pine Stands. *2nd Forest Engineering Conference*, 2003, pp. 55–63.
54. Eliasson L., Lageson H. Simulation Study of a Single-Grip Harvester in Thinning from Below and Thinning from Above. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 589–595. <https://doi.org/10.1080/02827589908540824>
55. Eliasson L. Simulation of Thinning with a Single-Grip Harvester. *Forest Science*, 1999, vol. 45, iss. 1, pp. 26–34. <https://doi.org/10.1093/forestscience/45.1.26>
56. Fisher E.L., Gochenour D.L., Jr. Improved Timber Harvesting through Better Planning. A GASP IV Simulation Analysis. *Transactions of the ASAE*, 1980, vol. 23, no. 3, pp. 553–557. <https://doi.org/10.13031/2013.34622>
57. Fridley J.L., Garbini J.L., Jorgensen J.E. Interactive Simulation of Forest Thinning System Concepts. *ASAE Paper no. 82-1603*. Michigan, St. Joseph, 1982. 16 p.
58. Fridley J.L., Garbini J.L., Jorgensen J.E., Peters P.A. An Interactive Simulation for Studying the Design of Feller-Bunchers for Forest Thinning. *Transactions of the ASAE*, 1985, vol. 28, no. 3, pp. 680–686. <https://doi.org/10.13031/2013.32319>
59. Fridley J.L., Jorgensen J.E., Garbini J.L. A Rational Approach to Feller-Buncher Design for Steep Slope Thinning. *Forest Products Journal*, 1988, vol. 38, iss. 6, pp. 31–37.
60. Fridley J.L., Jorgensen J.E. Geometric Modeling to Predict Thinning System Performance. *Transactions of the ASAE*, 1983, vol. 26, no. 4, pp. 976–982. <https://doi.org/10.13031/2013.34059>
61. Garbini J.L., Lembersky M.R., Chi U.H., Hehnen M.T. Merchandiser Design Using Simulation with Graphical Animation. *Forest Products Journal*, 1984, vol. 34, no. 4, pp. 61–68.
62. Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-Length: The Next Decade. *International Journal of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, iss. 2, pp. 17–24.

63. Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving Cut-to-Length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, iss. 1, pp. 89–105.
64. Gerasimov Y., Sokolov A., Karjalainen T. GIS-Based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 163–175.
65. Goulet D.V., Iff R.H., Sirois D.L. Tree-to-Mill Forest Harvesting Simulation Models: Where are We? *Forest Products Journal*, 1979, vol. 29, no. 10, pp. 50–55.
66. Goulet D.V., Iff R.H., Sirois D.L. Five Forest Harvesting Simulation Models. Part II: Paths, Pitfalls, and Other Considerations. *Forest Products Journal*, 1980, vol. 30, no. 8, pp. 18–22.
67. Greene W.D., Fridley J.L., Lanford B.L. Operator Variability in Interactive Simulations of Feller-Bunchers. *Transactions of the ASAE*, 1987, vol. 30, no. 4, pp. 918–922. <https://doi.org/10.13031/2013.30499>
68. Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's Logging Businesses, 1987 to 1997. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 1, pp. 25–28.
69. Greene W.D., Lanford B.L. Geometric Simulation of Feller-Bunchers in Southern Pine Plantation Thinning. *ASAE Paper no. 84-1612*. Michigan, St. Joseph, 1984. 17 p.
70. Greene W.D., Lanford B.L. *An Interactive Simulation Program to Model Feller-Bunchers*. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn, 1986, Bulletin no. 576.
71. Greene W.D., Lanford B.L., Mykytka E.F. Stand and Operating Effects on Feller-Buncher Productivity in Second Thinnings of Southern Pine. *Forest Products Journal*, 1987, vol. 37, iss. 3, pp. 27–34.
72. Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting Cost Model for Small Trees in Natural Stands in the Interior Northwest. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 4, pp. 54–60.
73. Hool J.N., Bussel W.H., Leppert A.M., Harmon G.R. Pulpwood Production System Analysis – a Simulation Approach. *Journal of Forestry*, 1972, vol. 70, iss. 4, pp. 214–215.
74. Johnson L.R., Biller C.J. Wood-Chipping and a Balanced Logging System: Simulation Can Check the Combinations. *Transactions of the ASAE*, vol. 17, no. 4, pp. 651–655.
75. Johnson L.R., Gochenour D.L., Jr., Biller C.J. Simulation Analysis of Timber-Harvesting Systems. *23rd Annual Conference and Convention*. California, Anaheim, American Institute of Industrial Engineers, 1972, pp. 353–362.
76. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
77. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical Model of Interaction between Forest Machine Mover and Consolidating Soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1177, art. no. 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>
78. Killham J.R. *The Development of a Forest Harvesting Simulation Model*: M.S. Thesis. Alabama, Auburn, Auburn University, 1975. 354 p.
79. Li Y. Modeling Operational Forestry Problems in Central Appalachian Hardwood Forests. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*, 2005, art. no. 4166. <https://doi.org/10.33915/etd.4166>
80. Lindroos O. The Effects of Increased Mechanization on Time Consumption in Small-Scale Firewood Processing. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 5, art. no. 227. <https://doi.org/10.14214/sf.227>
81. McNeel J.F., Rutherford D. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661>

82. Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. no. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012053>
83. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, art. no. 346. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
84. O'Hearn S.E., Stuart W.B., Walbridge T.A. Using Computer Simulation for Comparing Performance Criteria between Harvesting Systems. *American Society of Agricultural Engineers Paper*, 1976, no. 76, art. no. 1567.
85. Randhawa S.U., Scott T.M. Model Generation for Simulation Analysis: an Application to Timber Harvesting. *Computers and Industrial Engineering*, 1996, vol. 30, iss. 1, pp. 51–60. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00030-5)
86. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Komisar V.P. Computer Modeling to Support Management and Organizational Decisions in the Use of a Forest Harvester. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12251, Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD2021). 122510 p. <https://doi.org/10.1117/12.2631137>
87. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of Harvester Productivity in Selective and Boom-Corridor Thinning of Young Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 56–73. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
88. Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and Cost of CTL Harvesting of *Eucalyptus globulus* Stands Using Excavator-Based Harvesters. *Forest Products Journal*, 2002, vol. 52, iss. 1, pp. 67–77.
89. Spinelli R., Visser R. Analyzing and Estimating Delays in Harvester Operations. *International Journal of Forest Engineering*, 2008, vol. 19, iss. 1, pp. 36–41. <https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702558>
90. Stampfer K., Henoeh J. Process Simulation to Evaluate Steep Terrain Harvesting Systems. *Landwards, The Institution of Agriculture Engineers*, 1999, vol. 54, no. 3, pp. 1–11.
91. Stuart W.B. Harvesting Analysis Technique: a Computer Simulation System for Timber Harvesting. *Forest Products Journal*, 1981, vol. 31, iss. 11, pp. 45–53.
92. Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the Utility of Two Integrated Harvester-Forwarder Machine Concepts Through Stand-Level Simulation. *International Journal of Forest Engineering*, 2003, vol. 14, iss. 2, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702476>
93. Talbot B., Suadicani K. Analysis of Two Simulated In-Field Chipping and Extraction Systems in Spruce Thinnings. *Biosystems Engineering*, 2005, vol. 91, iss. 3, pp. 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.014>
94. Wang J., Greene W.D. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines. *International Journal of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, iss. 1, pp. 81–99.
95. Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, Harvest, and Equipment Interactions in Simulated Harvesting Prescriptions. *Forest Products Journal*, 1998, vol. 48, iss. 9, pp. 81–86.
96. Wang J., LeDoux C.B. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production through Computer Simulation. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 1, pp. 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>
97. Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Modeling and Simulating Two Cut-to-Length Harvesting Systems in Central Appalachian Hardwoods. *Proceedings of the 26th Annual Meeting of Council on Forest Engineering*. Maine, Bar Harbor, 2003. 5 p.

98. Wang J.X., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, vol. 16, iss. 2, pp. 11–27. <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
99. Wang J., Li Y., Miller G. Development of a 3D Stand Generator for Central Appalachian Hardwood Forests. *Proceedings of the IUFRO Conference on Symposium on Statistics and Information Technology in Forestry*. Virginia, Blacksburg, 2002. 5 p.
100. Webster D.B. Development of a Flexible Timber Harvesting Simulation Model. *Forest Products Journal*, 1975, vol. 25, iss. 1, pp. 40–45.
101. Wester F., Eliasson L. Productivity in Final Felling and Thinning for a Combined Harvester-Forwarder (Harwarder). *International Journal of Forest Engineering*, 2003, vol. 14, iss. 2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702477>
102. Winsauer S.A. A Program and Documentation for Simulation of a Tracked Feller/Buncher. *Research Paper NC-192*. US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1980. 29 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-192>
103. Winsauer S.A. A Program and Documentation for Simulation of Grapple Skidders and a Whole-Tree Chipper. *Research Paper NC-221*. Maine, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. 10 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-221>
104. Winsauer S.A., Bratley D.P. A Program and Documentation for Simulation of a Rubber-Tired Feller-Buncher. *Research Paper NC-212*. Maine, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. 14 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-212>
105. Winsauer S.A., Kofman P.D. Simulation of the Kockums 81-11 Feller/Buncher. *American Society of Agriculture Engineers*. Illinois, Chicago, Hyatt Regency, 1986. 11 p.
106. Ylimäki R., Väätäinen K., Lamminen S., Sirén M., Ala-Ilomäki J., Ovaskainen H., Asikainen, A. Kuljettajaa Opastavien Järjestelmien Tarve ja Hyötypotentialiaali Koneellisessa Puunkorjuussa = The Need for and Benefit Potential of Operator Guidance Systems in Mechanized Harvesting. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*, 2012. 224 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest