

Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин

К.П. Рукомойников^a, Т.В. Сергеева^b, Т.А. Гилязова^c, М.Н. Волдаев^d,
Е.М. Царев^e, С.Е. Анисимов^f

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола,
Республика Марий Эл, Россия

^a rukomojnikovKP@volgatech.net, ^b sergeeva2010t@mail.ru, ^c tat-gilyazova@yandex.ru, ^d voldaevMN@volgatech.net,
^e carevEM@volgatech.net, ^f anisimovSE@volgatech.net

^a <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3339-8081>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Статья поступила 08.04.2022, принята 19.04.2022

В статье рассмотрен вопрос моделирования часовой и сменной производительности валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин. Актуальность данного вопроса обусловлена тем, что в последнее время лесопромышленные предприятия переходят на сортиментную технологию заготовки древесины с использованием современной лесозаготовительной техники. В статье приведен краткий анализ существующих исследований и сделана попытка разработки имитационной модели использования харвестера. В качестве основы данного исследования был использован пример компьютерной симуляции на базе среды имитационного моделирования Anylogic, позволяющей осуществить агентный подход к подготовке программного обеспечения. Полученная программа позволяет обеспечить поддержку принятия технических и технологических решений предприятиями лесной отрасли при освоении лесных участков. В статье представлены алгоритм работы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, а также детализация информационно-логических блоков алгоритма работы валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин, позволяющая оценить каждый элемент их работы в различных природно-производственных условиях. Одной из важных составляющих алгоритма является анализ наличия или отсутствия препятствий из числа деревьев целевых компонентов на пути движения манипулятора. Использование предложенного варианта программного обеспечения позволяет выполнить компьютерную симуляцию разработки всей площади, заданной исследователем лесосеки, с учетом времени на технические, технологические и организационные перерывы. Появляется возможность реализации имитационного эксперимента при анализе новых технологических схем или оценке степени влияния заложенных в модель факторов окружающей природной среды и технических характеристик машин и механизмов до фактической реализации рубки лесных насаждений. Статья может быть рекомендована научным и научно-производственным организациям при обосновании выбора новой техники и технологии работ в лесу.

Ключевые слова: харвестер; лесосека; лесозаготовка; лесозаготовительная машинная несплошная вырубка; компьютерная симуляция; Anylogic.

Computer simulation of the development of logging sites using a felling-delimiting buckler

K.P. Rukomojnikov^a, T.V. Sergeeva^b, T.A. Gilyazova^c, M.N. Voldaev^d, E.M. Tsarev^e, S.E. Anisimov^f

Volga State University of Technology, 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El

^a rukomojnikovKP@volgatech.net, ^b sergeeva2010t@mail.ru, ^c tat-gilyazova@yandex.ru, ^d voldaevMN@volgatech.net,
^e carevEM@volgatech.net, ^f anisimovSE@volgatech.net

^a <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3339-8081>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Received 08.04.2022, accepted 19.04.2022

The article deals with the issue of modeling the hourly and shift productivity of a felling-delimiting buckler. The relevance of this issue is due to the fact that recently timber enterprises are switching to cut-to-length technology for harvesting wood using modern logging equipment. The article provides a brief analysis of existing research and an attempt is made to develop a simulation model for the use of a harvester. This study is based on an example of a computer simulation based on the Anylogic simulation environment, which makes it possible to implement an agent-based approach to software preparation. The resulting program allows to provide support for the adoption of technical and technological solutions by forest industry enterprises during the development of forest areas. The article presents the operation algorithm of the felling-delimiting buckler, as well as the detailing of the information-logical blocks of the algorithm of the felling-delimiting buckler operation, which makes it possible to evaluate each element of their work in various natural and production conditions. One of the important components of the algorithm is the analysis of the presence or absence of obstacles from among the trees of non-target components on the path of the manipulator. The use of the proposed version of the software makes it possible to perform a computer simulation of the development of the entire area specified by the cutting area researcher, taking into account the time for technical, technological and organizational breaks. It becomes possible to implement a simulation experiment when analyzing new technological schemes or assessing the degree of influence of environmental factors and technical characteristics of machines and mechanisms included in the model before the actual implementation of felling forest plantations. The article can be recommended to scientific and research-industrial organizations in substantiating the choice of new equipment and technology for working in the forest.

Keywords: harvester; logging site; logging; logging machine partial felling; computer simulation; Anylogic.

Введение. Вопросу моделирования производительности лесосечных машин, в частности валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин (харвестеров), уделяют внимание многие отечественные [1–3] и зарубежные [4–7] ученые. Использование харвестеров на лесозаготовках РФ и за рубежом становится все более распространенным [8–11].

Очевидно, что моделирование действий валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины при осуществлении различных видов рубок должно в первую очередь учитывать таксационные характеристики лесосеки, а также технические характеристики машины. Однако математические варианты оценки выработки лесосечных машин и, в частности, валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин, разработанные на основе среднестатистических показателей времени выполнения ряда технологических операций, не учитывают целый ряд значимых таксационных характеристик лесных насаждений. Известные на данный момент математические зависимости расчета производительности концентрируют внимание исследователя на таксационных показателях лишь целевого компонента рубки, не уделяя должного внимания нецелевым элементам насаждений, а тем самым и обеспечению возможности ведения рубок без повреждения остающихся на лесосеке деревьев. Наличие на лесосеке устранимых при валке препятствий также требует затрат дополнительного времени и может повлечь за собой значительные отклонения между расчетными и фактическими показателями эффективности использования машин.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что существующие на сегодняшний день математические зависимости расчета производительности харвестеров нацелены в первую очередь на реализацию сплошных рубок леса и не уделяют достойного внимания вопросам обоснования выработки при несплошных рубках. Существующие нормативы на отдельные лесозаготовительные машины также сосредотачивают внимание исследователя лишь на таких важных параметрах предмета труда валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин, как объем хлыста и длина заготавливаемых сортиментов, и не уделяют внимания степени изреживания древостоя в ходе рубки и необходимости удаления препятствий в виде древесных насаждений не учитываемых при подведении итогов лесозаготовки.

Методы и методология исследований. При анализе эффективности использования харвестеров на несплошных рубках можно отметить, что значимое влияние на показатели производительности оказывают затраты времени на выбор эффективной рабочей позиции, исключающей повреждение остающихся на доращивание хозяйственно ценных деревьев, а также на валку нецелевых компонентов насаждений, препятствующих удалению назначенных в рубку деревьев.

Доля влияния этих трудозатрат в цикле работы валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин зависит от таксационных характеристик всех находящихся вблизи деревьев и заданной степени изреживания древостоя. Она носит случайный характер в зависимости от взаимного расположения машины и деревьев в зоне дей-

ствия эффективного вылета ее манипулятора на каждой рабочей позиции [12].

Организация производственных экспериментов в условиях, зависящих от множества факторов окружающей среды, к которым относятся экспериментальные исследования в условиях лесосек, является сложным и в большинстве случаев невозможным процессом. Реализация таких экспериментов на практике является трудоемкой и неизбежно приведет к значительным расходам. Во избежание подобной ситуации эффективным способом является вариант компьютерной симуляции производственного процесса с максимально возможным учетом внешних факторов [13–16]. Имитация технологического процесса должна пошагово воспроизводить реальный технологический процесс в ускоренном режиме моделирования ситуации. Это дает возможность расширить диапазон варьирования параметров и за короткий отрезок времени оценить значительный интервал времени работы в лесу.

Для имитации технологического процесса лесосечных работ существует возможность использования различных программ имитационного моделирования: *NetLogo*, *StarLogo*, *Swarm*, *Mason*, *Repast*, *EcoLab*, *Cormas* и мн. др. В основе данного исследования был использован пример компьютерной симуляции на базе среды имитационного моделирования *Anylogic* [17], позволяющей осуществить агентный подход к подготовке программного обеспечения [18].



Рис. 1. Пример рабочего окна компьютерной симуляции разработки лесосек с использованием харвестера в программной среде *Anylogic*. Условные обозначения: — деревья целевого компонента; — деревья нецелевого компонента; — подлесок; — сортименты; — харвестер; — погрузочный пункт

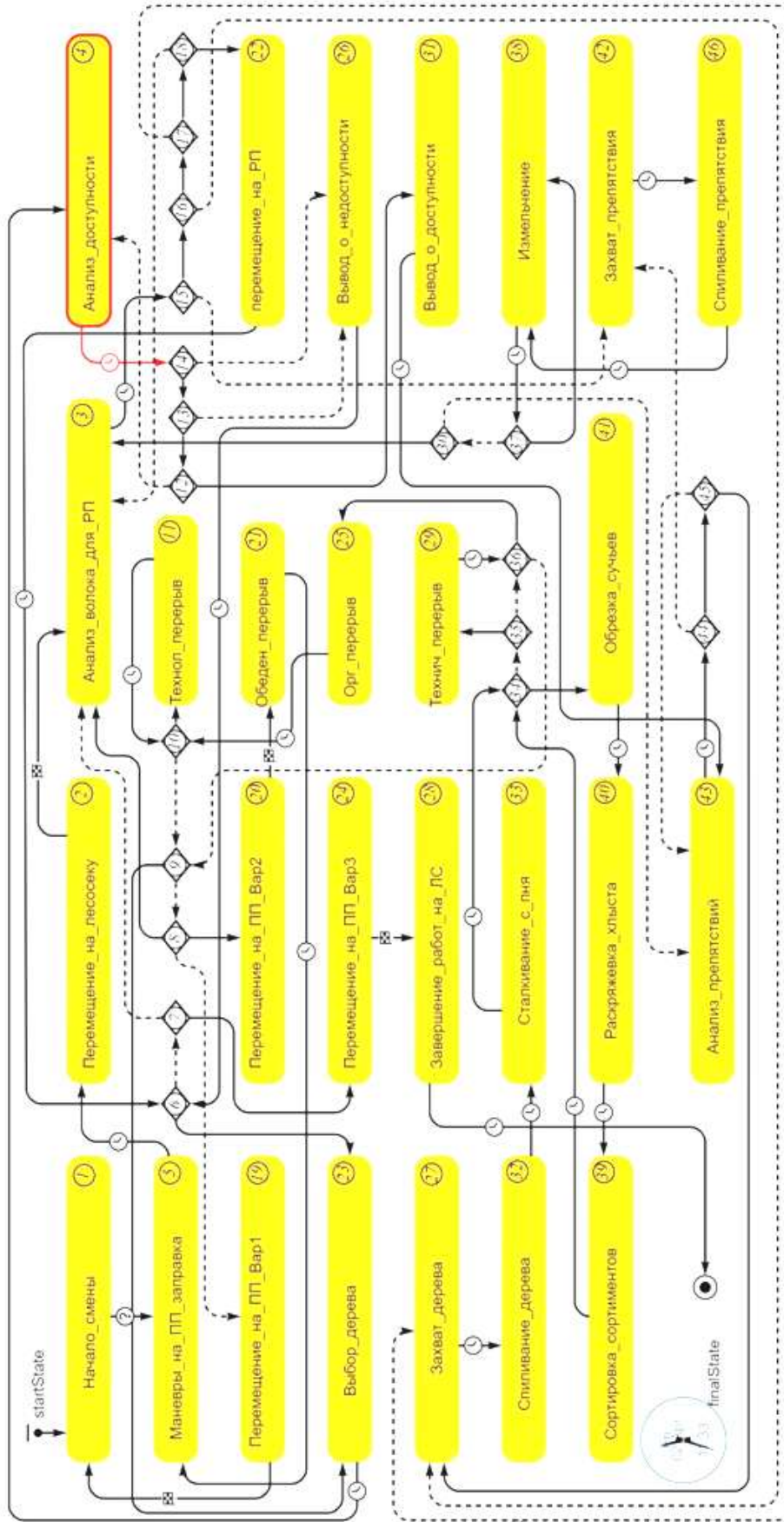


Рис. 2. Алгоритм работы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины. Условные обозначения: ПП — погрузочный пункт; РП — рабочая позиция; — переход по модельному времени; — переход при прибытии агента моделирования

Результаты и обсуждение. Созданная модель для компьютерной симуляции действий валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины в ходе разработки лесосеки позволяет исследователю задать характеристики лесосеки с основными таксационными показателями целевых и нецелевых древесных компонентов на ее территории и обозначить технологическую схему движения по ней лесосечных машин. Абрис лесосеки может быть построен с использованием геоинформационной системы [19; 20], что облегчает работу с привязкой к координатам местности. Деревья с заданными пользователем характеристиками случайным образом размещаются на лесосеке. Модель позволяет анализировать влияние количественных и качественных характеристик древостоя на производительность работающих на лесосеке машин. Входными параметрами могут являться технические характеристики машины и организационно-технологические показатели работы предприятия.

Пример рабочего окна компьютерной симуляции разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин в программной среде *Anylogic* показан на рис. 1. Валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина обрабатывает деревья целевого компонента рубки, оставляя в зоне обработки сортименты. В ходе симуляции разработки лесосеки возможен анализ различных видов рубок путем изменения количественно-качественных показателей и соотношения деревьев целевого и нецелевого компонентов. Алгоритм работы валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин, заложенный в программу, представлен в виде блок-схемы на рис. 2. Детализация информационно-логической составляющей блок-схемы алгоритма показана на рис. 3.

Одной из важных составляющих алгоритма является анализ отсутствия препятствий из числа деревьев

нецелевых компонентов на пути движения манипулятора. Анализ доступности деревьев на полупасеках, в свою очередь, позволяет учесть дополнительное время на обеспечение сохранности оставляемых на доращивание деревьев и удаление препятствий в виде подлеска. При наличии на пути манипулятора деревьев из категории подлесок осуществляются анализ дополнительных затрат времени на их удаление и измельчение на однометровые отрезки.

При наличии на пути манипулятора к дереву на полупасеке каких-либо препятствий в виде оставляемых на доращивание деревьев анализируемое дерево переходит в категорию недоступных и не рассматривается в последующем анализе с этой рабочей позиции. Так, например, в представленной на рис. 4 рабочей позиции дерева, оставляемые на доращивание, не позволяют осуществить захват двух деревьев, назначенных в рубку, что приводит к их переклассификации в категорию недоступных деревьев. При перемещении валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на новую рабочую позицию все признанные недоступными деревья вновь переходят в категорию доступных и учитываются в дальнейшем анализе.

Размерные характеристики заготавливаемых бревен рассчитываются на основе заданных исследователем таксационных характеристик деревьев и определяются с использованием заложенных в программу известных работ предшественников статистических взаимосвязей между ними. При симуляции используется система программного раскряга без анализа качественных признаков сортиментов с отделением 6-, 4- и 2-метровых отрезков. Учитываются характеристики породы и диаметра в местах раскряжки. Вершина измельчается и остается на лесосеке.

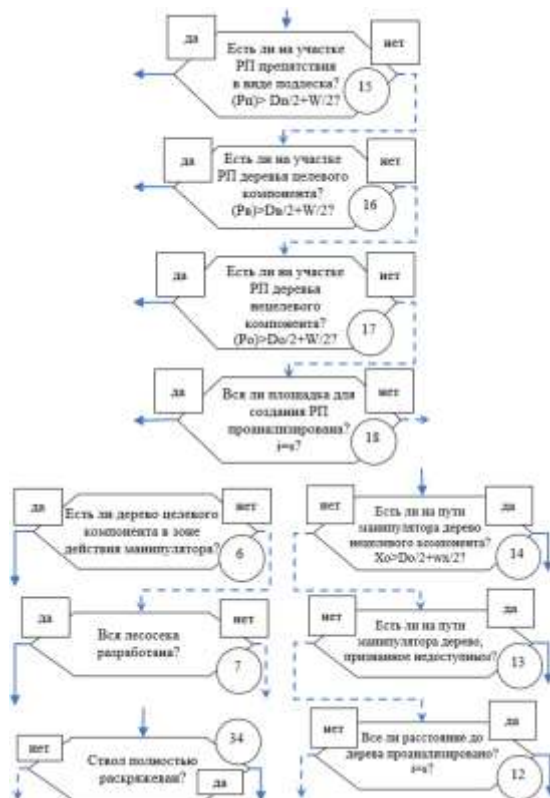


Рис. 3. Детализация информационно-логических блоков алгоритма работы валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин

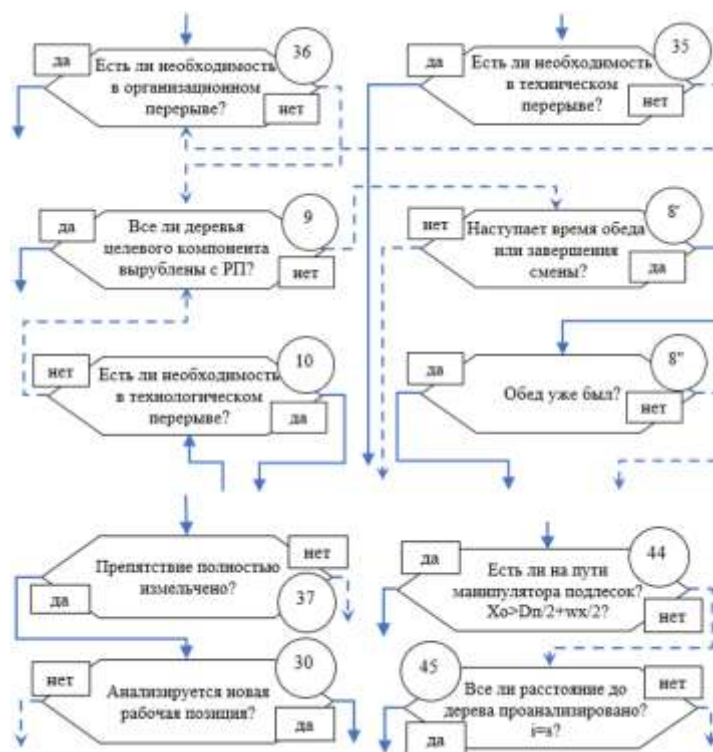


Рис. 3. (продолжение) Детализация информационно-логических блоков алгоритма работы валочно-сучкорезно-раскряжечных машин



Рис. 4. Результаты анализа доступности деревьев на полупасаеках

Заключение. Использование предложенного варианта программного обеспечения позволяет выполнить компьютерную симуляцию разработки всей площади заданной исследователем лесосеки с учетом времени

Литература

1. Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоц. высш. учеб. заведений, 2019. 192 с.
2. Мохирев А.П., Мамматов В.О., Уразаев А.П. Моделирование технологического процесса работы лесозаготовительных машин // Междунар. науч. исследования. 2015. № 3. С. 72-74.
3. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. 2012. № 8-2 (129). С. 49-51.
4. Aigars Strubergs, Andis Lazdins, Linards Sisenis. Use of Stanford 2010 data for determination of effect of harvester

на технические, технологические и организационные перерывы. Появляется возможность реализации имитационного эксперимента при анализе новых технологических схем или оценке степени влияния заложенных в модель факторов окружающей природной среды и технических характеристик машин и механизмов без фактической рубки лесных насаждений. Внедрение полученных результатов может быть полезно научным и научно-производственным организациям при обосновании выбора новой техники и технологии работ в лесу.

Следующим шагом в симуляции технологии работы харвестера должен стать сбор статистических данных для ввода в модель достоверной информации, повышающей эффективность ее работы. В дальнейшем возможна доработка и детализация отдельных составляющих алгоритма с целью более полного соответствия его показателей производственной деятельности того или иного лесозаготовительного предприятия.

- operator periodic training on productivity and fuel economy // 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2021. P. 1163-1167.
5. Alam M., Walsh D., Strandgard M. A log-by-log productivity analysis of two Valmet 475EX harvesters // International Journal of Forest Engineering. 2014. V. 25 (1). P. 14-22.
6. Malinen J., Taskinen J., Tolppa T. Productivity of Cut-to-Length Harvesting by Operators' Age and Experience // Croatian Journal of Forest Engineering. 2018. V. 39 (1). P. 14-22.
7. Wang Jingxin, LeDoux Chris B., Li Yaoxiang. Simulating cut-to-length harvesting operations in Appalachian hardwoods // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 11-27.
8. Kärhä K., Anttonen T., Poikela A., Palander T. Evaluation of Salvage Logging Productivity and Costs in Windthrown Norway Spruce-Dominated Forests // Forests. 2018. № 9 (5).

- Р. 280. URL: <https://doi.org/10.3390/f9050280> (дата обращения: 25.04.2022).
9. Palander T., Ovaskainen H., Tikkanen L. An adaptive work survey method for identifying the human factors that influence the performance of a human-machine system // *Forest Science*. 2012. № 58 (4). P. 377-389.
 10. Лаурила Я., Кучин А.В., Лебедев В.Д., Елепов А.А., Варакин М.Ю., Тадиашвили И.Р. Лесозаготовительные машины PONSSE. 2-е изд. Архангельск: Изд-во Васильев, 2020. 144 с.
 11. Mattias Eriksson, Ola Lindroos. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets // *International Journal of Forest Engineering*. 2014. № 25:3. P. 179-200. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.974309> (дата обращения: 25.04.2022).
 12. Kalle Kärhä, Heikki Ovaskainen, Teijo Palander. Decision-Making Among Harvester Operators in Tree Selection and Need for Advanced Harvester Operator Assistant Systems (AHOASs) on Thinning Sites COFE-FORMEC // *Forest Engineering Family: Growing Forward Together - September 2021*. Corvallis, 2021. P. 27-30.
 13. Официальный сайт Национального общества имитационного моделирования [Электронный ресурс]. URL: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения: 14.03.2022).
 14. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // *Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестник*. 2013. № 3. С. 154-158.
 15. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // *Лесотехнический журнал*. 2017. Т. 7. № 3. С. 307-314.
 16. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А. Моделирование работы специализированных лесосечных машин на базе форвардера // *Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: материалы четвертой респ. науч.-практической конф. молодых ученых, аспирантов, докторантов (20 мая 2013 г.)*. Петрозаводск: ПетрГУ, 2013. С. 38-41.
 17. Официальный сайт компании The AnyLogic Company производителя инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 14.03.2022).
 18. Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, Boero R. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
 19. Gerasimov Y.Y., Karjalainen T., Sokolov A. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2008. № 2. P. 163-175.
 20. Mokhiev A., Medvedev S. Assessment of road density in logging areas using geographical information systems // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. № 507. P. 12-22.
 4. Aigars Strubergs, Andis Lazdins, Linards Sisenis. Use of Stanford 2010 data for determination of effect of harvester operator periodic training on productivity and fuel economy // *20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 2021. P. 1163-1167.
 5. Alam M., Walsh D., Strandgard M. A log-by-log productivity analysis of two Valmet 475EX harvesters // *International Journal of Forest Engineering*. 2014. V. 25 (1). P. 14-22.
 6. Malinen J., Taskinen J., Tolppa T. Productivity of Cut-to-Length Harvesting by Operators' Age and Experience // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2018. V. 39 (1). P. 14-22.
 7. Wang Jingxin, LeDoux Chris B., Li Yaoliang. Simulating cut-to-length harvesting operations in Appalachian hardwoods // *International Journal of Forest Engineering*. 2005. № 16 (2). P. 11-27.
 8. Kärhä K., Anttonen T., Poikela A., Palander T. Evaluation of Salvage Logging Productivity and Costs in Windthrown Norway Spruce-Dominated Forests // *Forests*. 2018. № 9 (5). P. 280. URL: <https://doi.org/10.3390/f9050280> (дата обращения: 25.04.2022).
 9. Palander T., Ovaskainen H., Tikkanen L. An adaptive work survey method for identifying the human factors that influence the performance of a human-machine system // *Forest Science*. 2012. № 58 (4). P. 377-389.
 10. Laurila YA., Kuchin A.V., Lebedev V.D., Elepov A.A., Varakin M.YU., Tadiashvili I.R. PONSSE Forest Machines. 2-е изд. Архангельск: Изд-во Васильев, 2020. 144 п.
 11. Mattias Eriksson, Ola Lindroos. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets // *International Journal of Forest Engineering*. 2014. № 25:3. P. 179-200. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.974309> (дата обращения: 25.04.2022).
 12. Kalle Kärhä, Heikki Ovaskainen, Teijo Palander. Decision-Making Among Harvester Operators in Tree Selection and Need for Advanced Harvester Operator Assistant Systems (AHOASs) on Thinning Sites COFE-FORMEC // *Forest Engineering Family: Growing Forward Together - September 2021*. Corvallis, 2021. P. 27-30.
 13. Official website of the National Society for Simulation Modeling [Elektronnyj resurs]. URL: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения: 14.03.2022).
 14. Rukomojnikov K.P. Simulation modeling of mutually coordinated operation of sets of adaptive-modular forest machines // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik*. 2013. № 3. P. 154-158.
 15. Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation modeling of the production process of wood harvesting using Petri nets // *Forestry Engineering Journal*. 2017. V. 7. № 3. P. 307-314.
 16. Suhanov YU.V., Seliverstov A.A. Simulation of the operation of specialized logging machines based on a forwarder // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa Respubliki Kareliya: materialy chetvertoj rесп. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh, aspirantov, doktorantov (20 maya 2013 g.)*. Petrozavodsk: PetrGU, 2013. P. 38-41.
 17. The official website of The AnyLogic Company, a manufacturer of simulation tools and business applications [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 14.03.2022).
 18. Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, Boero R. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
 19. Gerasimov Y.Y., Karjalainen T., Sokolov A. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2008. № 2. P. 163-175.
 20. Mokhiev A., Medvedev S. Assessment of road density in logging areas using geographical information systems // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. № 507. P. 12-22.

References

1. Kunickaya O.A., Chernuckij N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Machine harvesting of wood using Scandinavian technology. SPb.: Izdatel'skopoligraficheskaya assoc. vyssh. ucheb. zavedenij, 2019. 192 p.
2. Mohiev A.P., Mammatorov V.O., Urazaev A.P. Modeling of the technological process of timber harvesting machines // *International scientific researches*. 2015. № 3. P. 72-74.
3. Suhanov YU.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syunev V.S. Simulation modeling of harvester operation: algorithms and implementation // *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2012. № 8-2 (129). P. 49-51.