

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОГО ХАРВЕСТЕРА

К.П. Рукомойников<sup>✉</sup>, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, П.Н. Анисимов

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Институт леса и природопользования, Россия, 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

rukomojnikovkp@volgatech.net

Целью работы было создание компьютерной модели, позволяющей воспроизвести технологический процесс лесозаготовки с учетом огромного количества всевозможных условий, способных повлиять на конечный результат работы предприятия, получить данные, необходимые для принятия эффективных управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации. Для этого с помощью метода агентного моделирования в программе AnyLogic была создана имитационная модель производственного процесса. Функционирование предложенной модели осуществляется на основе значимых статистических данных о наиболее важных характеристиках отдельных элементов производственного процесса. В статье приведена демонстрация возможностей моделирования технологических схем работы на лесосеке на этапе проектирования технологической карты без необходимости реальной рубки лесных насаждений. Представлена диаграмма состояний работы харвестера, заложенная в созданную авторами имитационную модель, позволяющая исследователю провести пошаговый анализ работы лесозаготовительной машины. Показана информационно логическая детализация всех блоков диаграммы состояний работы харвестера, позволяющая понять принцип анализа при расчистке площадки для новой рабочей позиции, анализа доступности деревьев на пасеках, обработки стволов деревьев с учетом всех перемещений и организационно-технических простоев в процессе освоения лесосек. Представлена графическая демонстрация выбора деревьев доступных для валки, а также анализа ситуации для перемещения на новую рабочую позицию харвестера. Изложена последовательность ввода данных в модель и принципы фиксации полученных на основе моделирования научных результатов. Созданная имитационная модель позволит лесопользователям осуществлять: сравнение вариантов технологических схем движения харвестера по лесосеке с выбором наилучших организационных и управленческих решений; создание нормативов трудозатрат и нормативов выработки при разработке лесосек в любых природно-производственных условиях для любой модели используемого харвестера в зависимости от вида рубок и породно-качественных характеристик вырубаемых деревьев.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, программное обеспечение, лесозаготовка, лесосека, технологическая карта

**Ссылка для цитирования:** Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

Моделированием технологических процессов, в частности, имитационным моделированием в области лесной промышленности, занимались различные ученые. Были проведены подробные исследования по моделированию объемов выработки лесозаготовительных предприятий и трудозатрат на реализацию отдельных составляющих технологического процесса [1–5], расхода топлива лесозаготовительной техники при выполнении технологического цикла лесосечных работ и перебазировок лесосечных машин [6, 7]. Существуют методические подходы к моделированию технологических процессов при решении транспортных задач по транспортировке заготовленного сырья и готовой продукции [8, 9].

Моделирование технологических процессов широко используется на всех стадиях лесозаготовительного производства. В частности, в своей докторской диссертации Ю.В. Пильник [10] предлагает экономико-математическую модель оптимального распределения грузопотоков лесоматериалов, позволяющую разрабатывать мероприятия по формированию единой лесотранспортной сети при поставке лесоматериалов для условий регионов лесозаготовки. Иванников В.А. [11] делает попытку имитировать рациональные структуры транспортных потоков лесоматериалов и модельного ряда лесовозных автопоездов с разработкой модели мультимодальных грузопотоков. А.П. Соколов и Ю.Ю. Герасимов [12, 13] разработали методику синтеза оптимального лесозаготовительного плана, а также алгоритм его

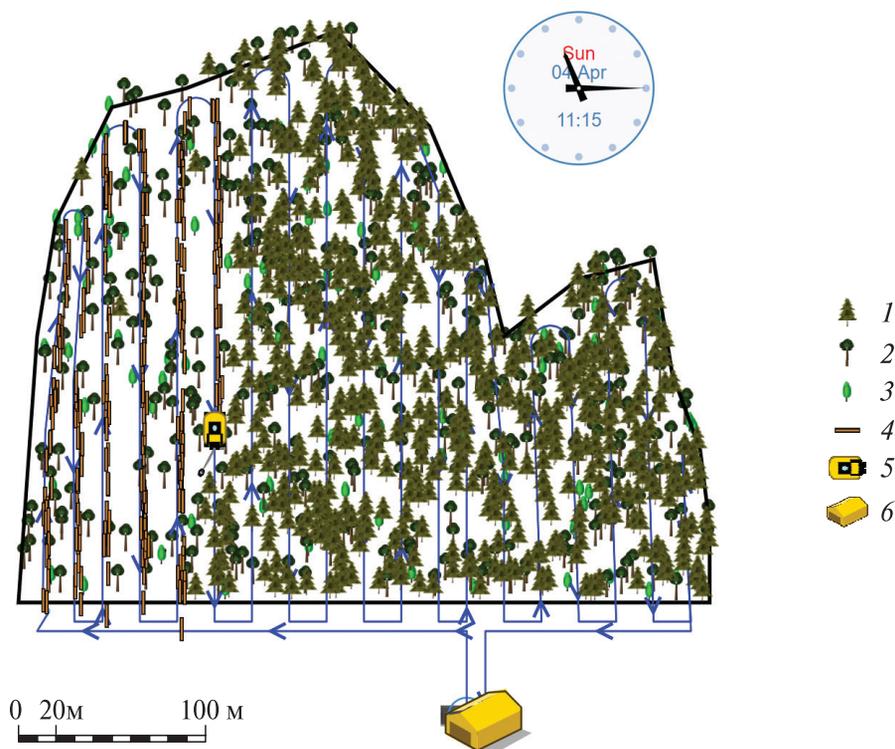
программной реализации в составе компьютерной информационно-вычислительной системы лесозаготовительной логистики. Исследование сотрудников ПетрГУ А.П. Соколова, Е.В. Осипова [14] представляет собой углубленный анализ методов имитационного моделирования. Объектом исследования также являются лесные машины. Для решения поставленной задачи был применен метод дискретно-событийного имитационного моделирования на сетях Петри. Предложенная в работе А.П. Мохирева [15] имитационная модель эффективного планирования деятельности лесозаготовительных предприятий при вывозке древесных ресурсов с лесосек и промежуточных складов отличается возможностью прогнозирования развития технологического процесса комплекса лесотранспортных операций с учетом динамически изменяемых природно-производственных условий многолесных районов РФ.

Имитация технологических процессов лесозаготовительных работ приобретает актуальность при анализе задач применения современной лесозаготовительной техники, на которую в большинстве случаев еще не разработаны нормативы расчета выработки и трудозатрат при планировании

деятельности лесопромышленных предприятий в изменяющихся условиях окружающей среды. Внедрение харвестеров в технологический процесс лесосечных работ предусматривает решение широкого круга задач повышения эффективности их использования [16–18]. Принятие управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации следует компьютеризировать в зависимости от вида рубок, качественных и количественных характеристик древостоя, технических характеристики используемой техники с максимальным учетом случайных природно-производственных факторов [19–22].

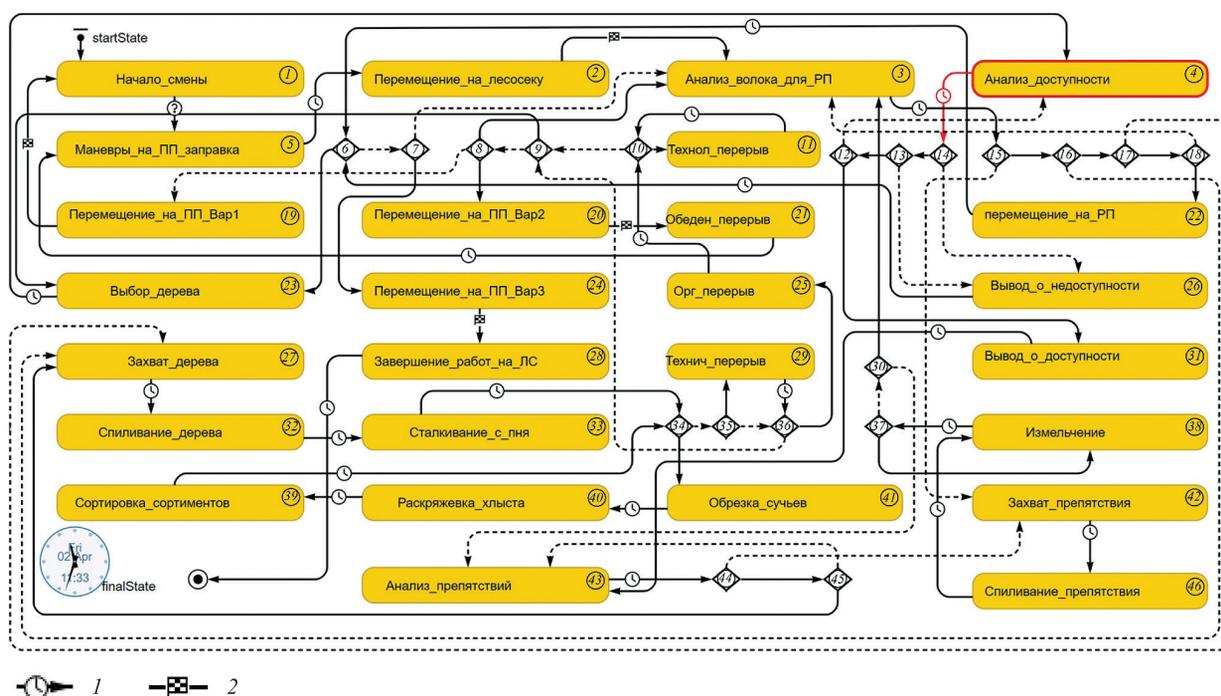
### Цель работы

Цель работы — создание компьютерной модели, позволяющей воспроизвести технологический процесс лесозаготовки с учетом огромного количества всевозможных условий, способных повлиять на конечный результат работы предприятия и получить данные, необходимые для принятия эффективных управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации.



**Рис. 1.** Пример рабочего окна при запуске имитационной модели функционирования харвестера в программной среде AnyLogic: основные агенты моделирования: 1 — деревья для валки; 2 — деревья, оставляемые на доращивание и подрост; 3 — подросток; 4 — сортименты; 5 — лесной харвестер; 6 — погрузочный пункт

**Fig. 1.** An example of the working window when running a simulation model of harvester operations in the AnyLogic software environment: 1 — felling trees; 2 — trees left to complete growing and undergrowth; 3 — undergrowth; 4 — gradings; 5 — forest harvester; 6 — loading point



**Рис. 2.** Диаграмма состояний харвестера в программной среде имитационного моделирования AnyLogic: условные обозначения: 1 — переход по модельному времени; 2 — переход при прибытии агента моделирования; ПП — погрузочный пункт; РП — рабочая позиция харвестера; ЛС — лесосека; Вар1 — вариант первый (для завершения рабочей смены); Вар2 — вариант второй (для обеда); Вар3 — вариант третий (при завершении разработки лесосеки)

**Fig. 2.** Diagram of harvester states in AnyLogic simulation software environment: 1 — transition according to model time; 2 — transition upon model agent arrival; ПП — loading point; РП — harvester work position; ЛС — harvesting area; Вар1 — variant one (to complete work shift); Вар2 — variant two (for lunch break); Вар3 — variant three (to complete harvesting area)

## Материалы и методы

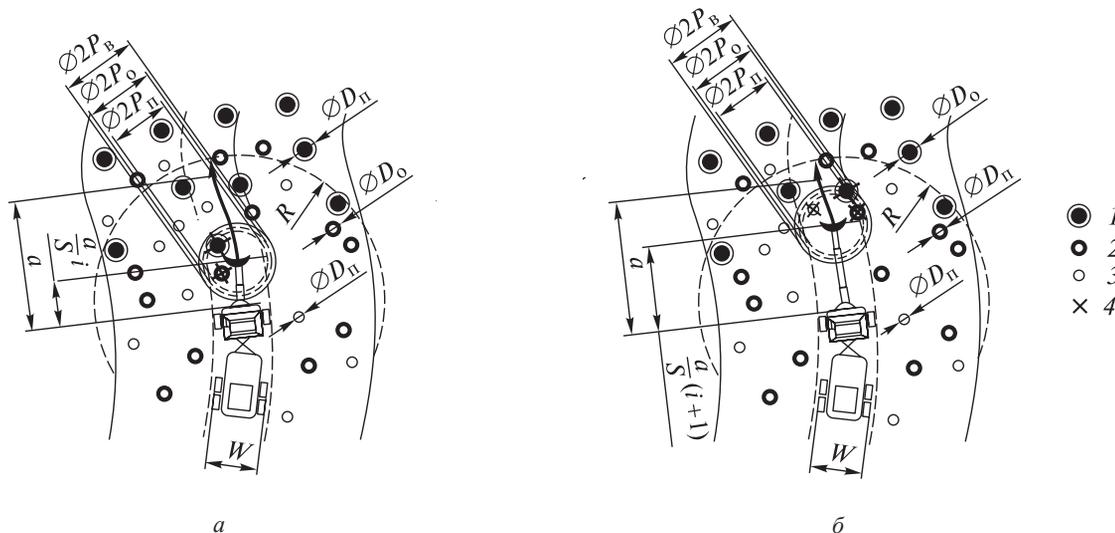
Использование имитационного моделирования как одного из направлений математического моделирования во многих случаях является предпочтительным вариантом анализа технологического процесса реализации исследовательских работ [23]. В описываемом исследовании по разработке имитационной модели работы лесного харвестера выбор среди всех систем имитационного моделирования был сделан в пользу системы компьютерного моделирования AnyLogic [24], позволившей осуществить агентный подход к решению этого вопроса [25] с оценкой действий децентрализованных динамически взаимодействующих агентов технологического процесса, характеризующихся независимым набором параметров и реализацией возможностей системного анализа взаимодействия между ними.

## Результаты и обсуждение

С использованием функциональных возможностей среды имитационного моделирования AnyLogic, создана имитационная модель работы харвестера на лесосеке. При анализе различных технических, технологических и

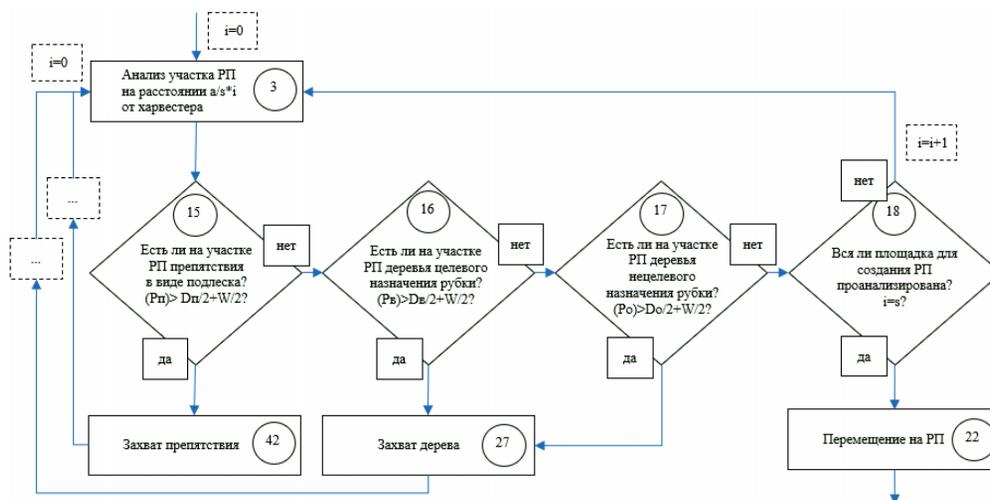
организационных аспектов освоения лесных участков исследователь имеет возможность задать координаты погрузочного пункта, границ лесосеки на карте местности и траекторию движения харвестера, аналогично созданию технологической карты освоения лесосек. Варьируемыми параметрами древостоя на заданной исследователем лесосеке являются количество деревьев целевого компонента рубки на лесосеке, количество деревьев нецелевого компонента рубки (деревья которого должны быть оставлены на дорастивание), и количество деревьев из категории подлесок (деревья, которые могут быть удалены в ходе рубки для повышения доступности деревьев целевого компонента). Размещение всех деревьев на территории лесосеки осуществляется произвольно при каждом запуске программы имитации. Породы и диаметры стволов деревьев всех компонентов распределяются между ними случайным образом на основе указываемых исследователем характеристик формулы породного состава каждого компонента и их размерных параметров.

Пример схемы освоения лесосеки харвестером запущенных в программе имитационного моделирования показана на рис. 1.



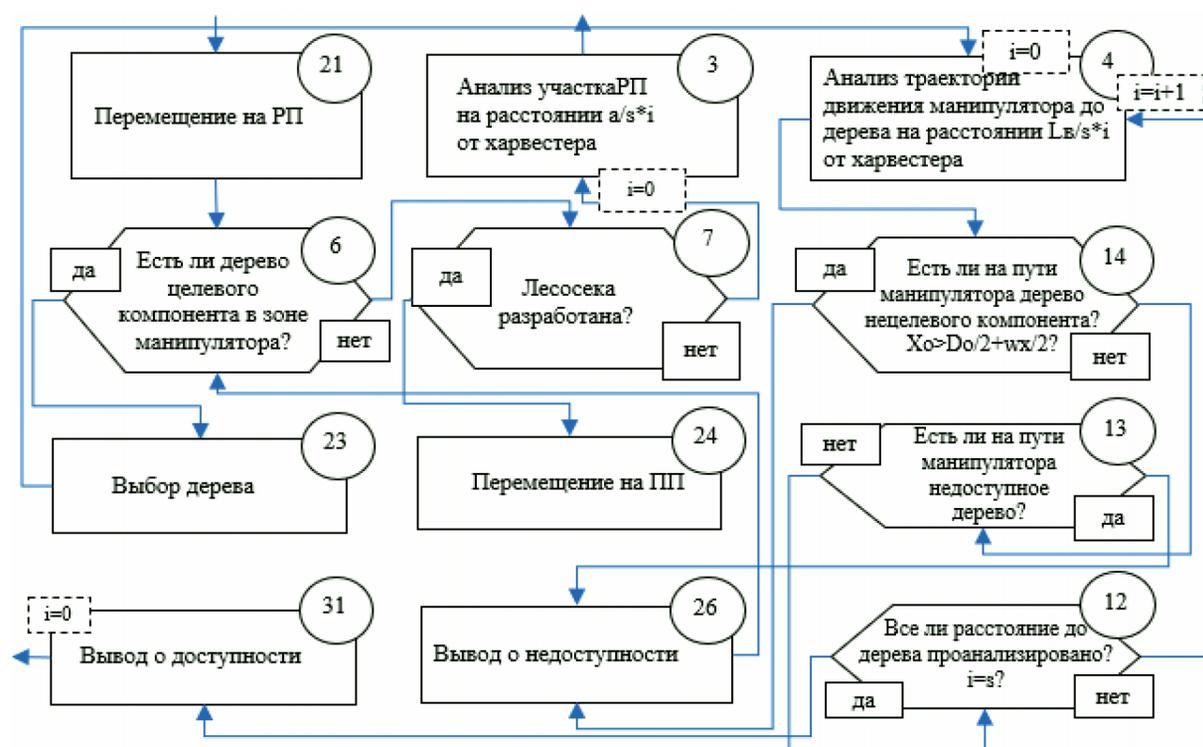
**Рис. 3.** Схема анализа при расчистке новой рабочей позиции харвестера: *a* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* шага пошагового анализа новой рабочей позиции; *б* — визуализация работы харвестера при выполнении *i + 1* шага пошагового анализа новой рабочей позиции;  $D_b, D_o, D_n$  — соответственно диаметры деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м;  $P_b, P_o, P_n$  — соответственно минимально допустимые расстояния от оси харвестерной головки, до осей стволов деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м;  $R$  — эффективный вылет манипулятора харвестера, м;  $a$  — расстояние между рабочими позициями харвестера, м;  $s$  — общее число шагов при пошаговом анализе;  $i$  — порядковый номер шага при пошаговом анализе;  $W$  — ширина харвестера, м.;  $1$  — деревья целевого компонента;  $2$  — деревья нецелевого компонента;  $3$  — подлесок;  $4$  — удаляемые деревья

**Fig. 3.** Schematic of the analysis when clearing a new working position of the harvester: *a* — visualization of harvester operation when performing *i* step-by-step analysis of the new working position; *б* — visualization of harvester operation when performing *i + 1* step-by-step analysis of the new working position;  $D_b, D_o, D_n$  — diameters of target and non-target component trees and undergrowth, m, respectively;  $P_b, P_o, P_n$  — minimum allowable distances from the axis of the harvester head to the axes of the target and non-target components and undergrowth, m, respectively;  $R$  — effective reach of the harvester arm, m;  $a$  — distance between the working positions of the harvester, m;  $s$  — total number of steps in a step-by-step analysis;  $i$  — sequential number of steps in a step-by-step analysis;  $W$  — harvester width, m;  $1$  — target component trees;  $2$  — non-target component trees;  $3$  — undergrowth;  $4$  — trees to be removed



**Рис. 4.** Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при расчистке площадки для новой рабочей позиции машины: РП — рабочая позиция;  $D_b, D_o, D_n$  — соответственно, диаметры деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м;  $P_b, P_o, P_n$  — соответственно минимально допустимые расстояния от оси харвестерной головки, до осей стволов деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м;  $s$  — общее число шагов при пошаговом анализе;  $i$  — порядковый номер шага при пошаговом анализе;  $W$  — ширина харвестера, м

**Fig. 4.** Detail block diagram of forest harvester operation when clearing a site for a new working position of the machine: РП — working position;  $D_b, D_o, D_n$  — respectively, diameters of trees of target and non-target components and undergrowth, m;  $P_b, P_o, P_n$  — respectively, the minimum allowable distances from the axis of harvester head, to the axes of trunks of trees of target and non-target components and undergrowth, m;  $s$  — total number of steps in step analysis;  $i$  — sequence number of steps in step analysis;  $W$  — harvester width, m



**Рис. 5.** Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе неустранимых препятствий на пути движения харвестерной головки до вырубаемого дерева:  $D_0$  — диаметр деревьев нецелевого компонента, м;  $w_x$  — ширина харвестерной головки, м;  $X_0$  — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м;  $s$  — общее число шагов при пошаговом анализе;  $i$  — порядковый номер шага при пошаговом анализе;  $L_b$  — расстояние до анализируемого дерева, м

**Fig. 5.** Detail block diagram of forest harvester operation when analyzing intractable obstacles on the path of the harvester head to the tree to be felled:  $D_0$  — diameter of trees of non-target component, m;  $w_x$  — width of harvester head, m;  $X_0$  — distance from harvester head axis to the nearest tree of non-target component in each step analysis;  $s$  — total number of steps in step analysis;  $i$  — ordinal number of step in step analysis;  $L_b$  — distance to analyzed tree, m

В разработанной нами модели используются технические характеристики харвестера и квалификации оператора: размеры харвестера и харвестерной головки, скоростные характеристики перемещения харвестера и его манипулятора, параметры вылета манипулятора, скорость протаскивания ствола дерева харвестерной головкой, производительность чистого пиления и некоторые другие параметры.

Исследователь может изменять такие организационные параметры, как сменность работы оператора, продолжительность смены и нормируемых перерывов, а также характерные для того или иного предприятия статистические показатели частоты ненормируемых перерывов в работе: технических и организационных.

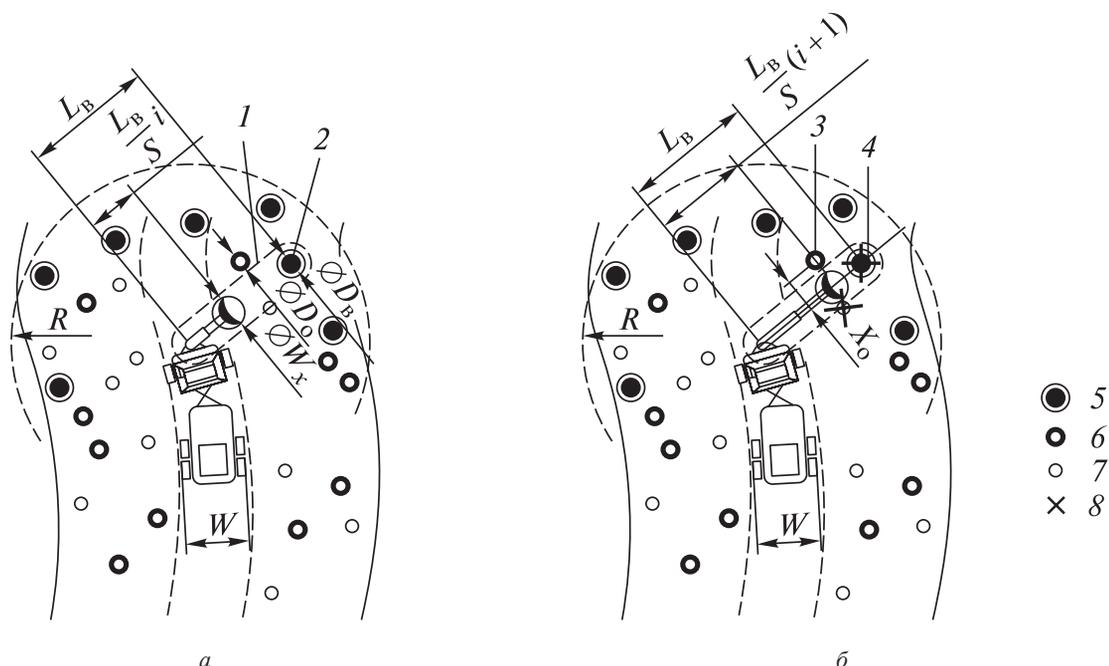
Составлена диаграмма состояний харвестера, позволяющая отслеживать все этапы его работы в программной среде имитационного моделирования (рис. 2).

В процессе работы харвестера обрабатываются деревья целевого компонента с обеспечением сохранности на полупасаках деревьев нецелевого компо-

нента. Таким образом, могут имитироваться сплошные рубки с сохранением и без сохранения подроста, а также различные виды выборочных рубок.

Одним из основных этапов действий харвестера является анализ доступности вырубаемых деревьев. Такой анализ проводится неизменно при перемещениях на новую рабочую позицию и последующем определении с выбранной рабочей позиции доступности или недоступности находящихся вблизи харвестера деревьев. Согласно схеме, анализ при расчистке рабочих позиций для перемещения харвестера (рис. 3) осуществляется на расстоянии эффективного вылета манипулятора от него. Это расстояние соответствует эффективному вылету его манипулятора. Текущая рабочая позиция харвестера не позволяет далее осуществлять рубку деревьев с одного места и требуется перемещение на новую рабочую позицию с вырубкой всех деревьев, оказавшихся на пути его движения.

На рис. 4. представлена информационно-логическая детализация блоков диаграммы состояний при расчистке рабочих позиций харвестера, позволяющая оценить варианты развития этапов



**Рис. 6.** Схема пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках. Анализируемое дерево доступно ( $X_0 > D_0/2 + w_x/2$ ): *a* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* шага пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках; *б* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* + 1 шага пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках;  $L_b$  — расстояние до анализируемого дерева, м;  $S$  — общее количество шагов при анализе,  $I$  — номер шага при анализе,  $X_0$  — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м;  $D_0$  — диаметр ближайшего к харвестерной головке дерева нецелевого компонента, м;  $w_x$  — ширина харвестерной головки, м;  $W$  — ширина харвестера, м;  $I$  — зона, ограничивающая доступность дерева; 2, 4 — анализируемое дерево; 3 — ближайшее дерево нецелевого компонента; 5 — деревья целевого компонента; 6 — деревья нецелевого компонента; 7 — подлесок; 8 — удаляемые деревья

**Fig. 6.** Schematic of a step-by-step analysis of tree availability at half-points. The tree being analysed is available ( $X_0 > D_0/2 + w_x/2$ ): *a* — visualization of the harvester operation when performing *i* step of the step-by-step analysis of tree availability on the half-lots; *б* — visualization of the harvester operation when performing *i* + 1 step of the step-by-step analysis of tree availability on the half-lots;  $L_b$  — distance to the analyzed tree, m;  $S$  — total number of steps in the analysis,  $I$  — number of steps in the analysis,  $X_0$  — distance from the harvester head axis to the nearest tree of a non-target component in each analysis step, m;  $D_0$  — diameter of the tree nearest to the harvester head of the non-target component, m;  $w_x$  — width of the harvester head, m;  $W$  — width of the harvester, m;  $I$  — area limiting tree availability; 2, 4 — tree to be analysed; 3 — nearest tree of non-target component; 5 — trees of target component; 6 — trees of non-target component; 7 — undergrowth; 8 — trees to be removed

анализа в различных ситуациях. Нумерация блоков на этом и последующих рисунках соответствует нумерации соответствующих блоков исходной диаграммы состояний (см. рис. 2), что позволяет исследователю получить более подробное представление о заложенных в имитационную модель принципах функционирования отдельных ее элементов.

Разработана информационно-логическая детализация блоков диаграммы состояний работы харвестера при анализе неустранимых препятствий на пути движения манипулятора (рис. 5), а также схема (рис. 6) работы харвестера, позволяющая понять принцип анализа доступности деревьев, заложенных в процесс пошаговой имитации технологического процесса. В тех случаях, когда на траектории движения манипулятора от харвестера к дереву отсутствуют другие деревья нецелевого компонента, дерево переходит в категорию доступных для валки.

Вырубаемые деревья, признанные недоступными с анализируемой рабочей позиции харвестера, переводятся в категорию «недоступные деревья» и впоследствии не подвергаются анализу. После перемещения на новую рабочую позицию все недоступные ранее деревья признаются доступными и в отношении них производится повторный анализ.

Следующие блоки диаграммы реализуют дальнейший анализ подлеска на пути движения харвестерной головки к дереву. Если такие деревья существуют, то осуществляется их удаление с последующим измельчением.

Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод о недоступности с текущей рабочей позиции двух деревьев целевого компонента, так как на пути движения манипулятора встречаются деревья нецелевого компонента рубки, которые следует оставить на дорастивание. При этом отмечается доступность пяти деревьев целевого компонента,

Рис. 7. Итоговые результаты анализа доступности деревьев целевого компонента и выбора удаляемых деревьев: 1 — деревья целевого компонента; 2 — деревья нецелевого компонента; 3 — подросток; 4 — удаляемые деревья; 5 — недоступные деревья

Fig. 7. Summary results of target component tree availability analysis and selection of trees to be removed: 1 — target component trees; 2 — non-target component trees; 3 — undergrowth; 4 — trees to be removed; 5 — inaccessible trees

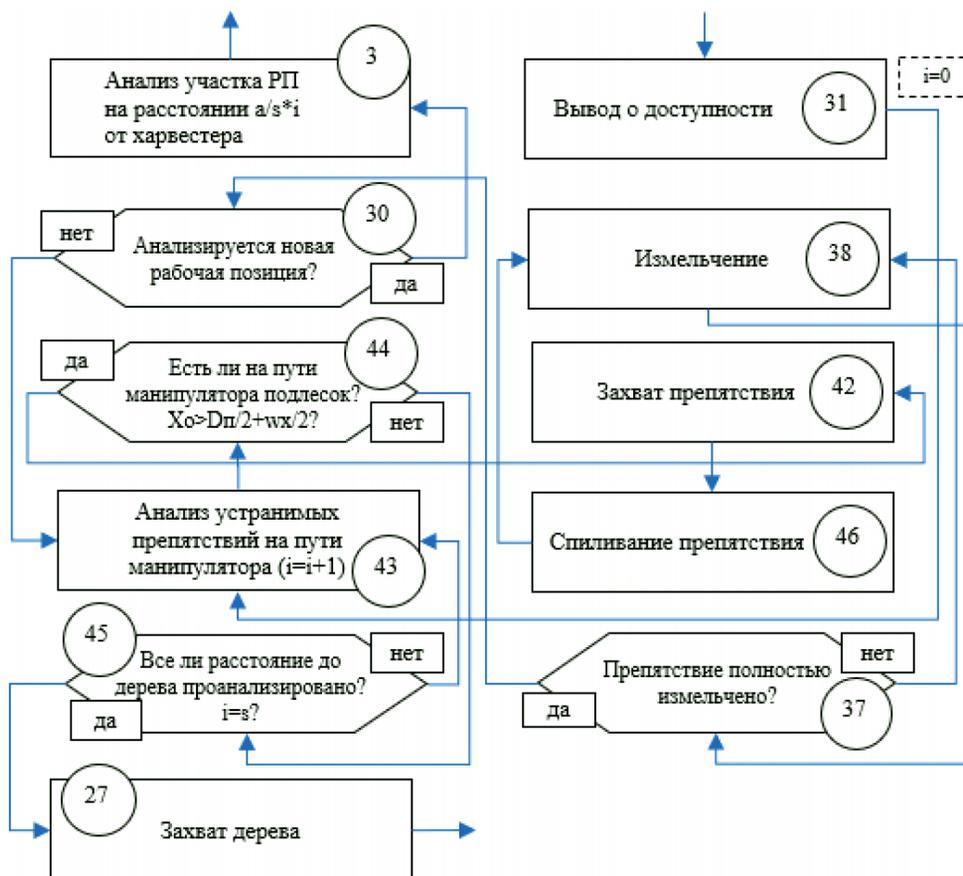
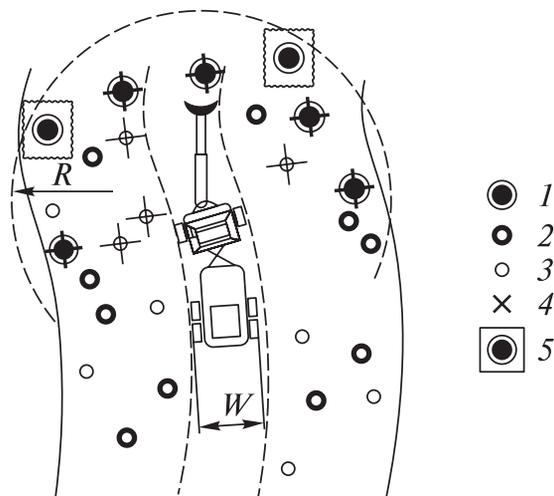


Рис. 8. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе и удалении устранимых препятствий на пути движения манипулятора до вырубаемого дерева: РП — рабочая позиция;  $a$  — расстояние между рабочими позициями харвестера, м;  $s$  — общее число шагов при пошаговом анализе;  $i$  — порядковый номер шага при пошаговом анализе;  $D_n$  — диаметры подростка, м;  $w_x$  — ширина харвестерной головки, м;  $X_o$  — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м

Fig. 8. Detail of forest harvester operation status diagram blocks when analyzing and removing removable obstacles in the path of manipulator movement to the tree to be felled: РП — working position;  $a$  — distance between working positions of harvester, m;  $s$  — total number of steps in step-by-step analysis;  $i$  — ordinal number of step in step-by-step analysis;  $D_n$  — undergrowth diameters, m;  $w_x$  — width of harvester head, m;  $X_o$  — distance from harvester head axis to the nearest tree of non-target component in each analysis step, m

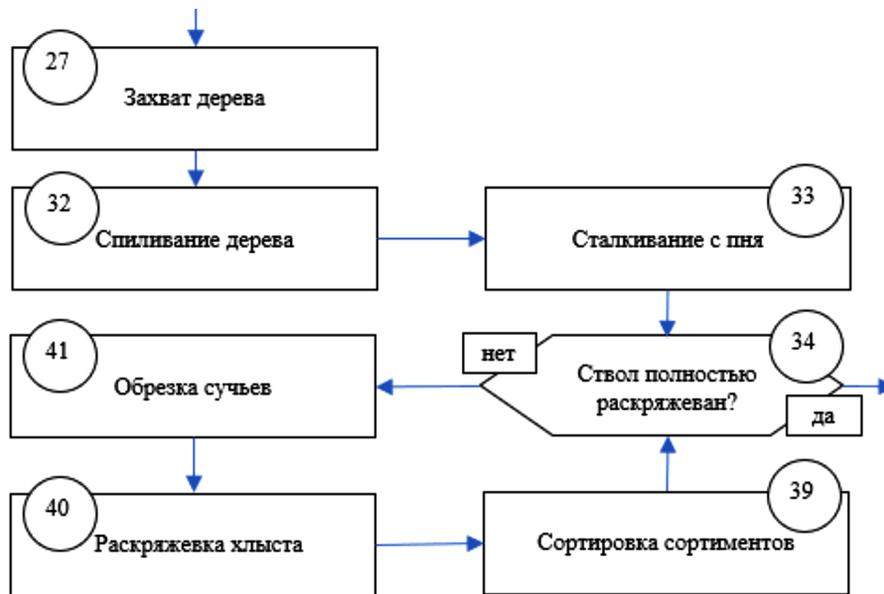


Рис. 9. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при имитации процесса обработки ствола дерева  
 Fig. 9. Detail block diagram of forest harvester operation state diagram when simulating process of tree trunk processing

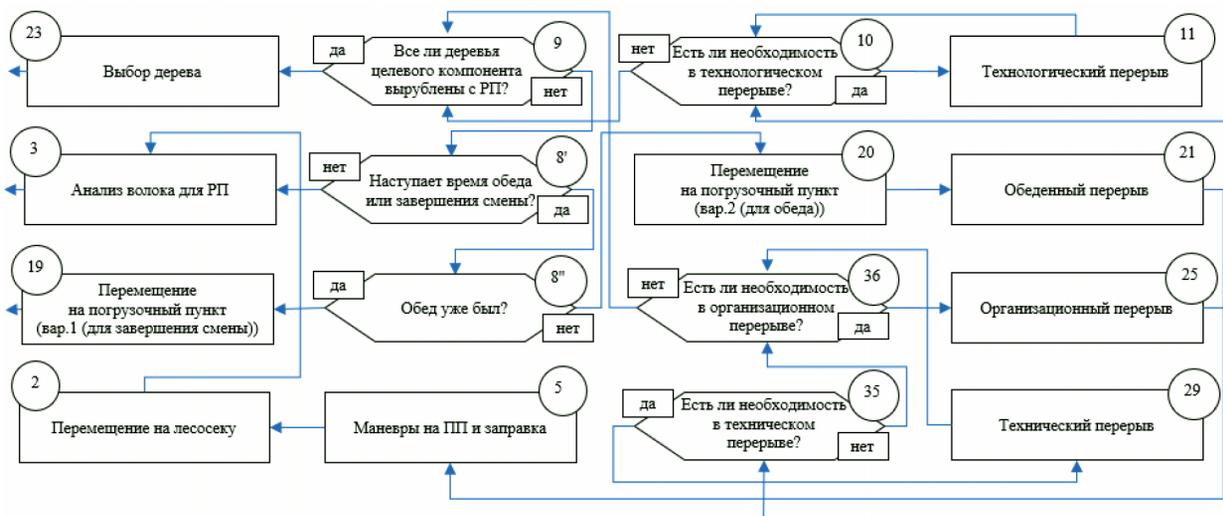


Рис. 10. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе перемещений и организационно-технических простоев в процессе разработки лесосеки  
 Fig. 10. Detail of the forest harvester operation status diagram blocks when analyzing movements and organizational and technical downtime in the process of timber harvesting

для валки которых необходимо удалить четыре дерева, относящиеся к категории «подлесок».

Разработана информационно-логическая детализация имитации блоков диаграммы состояний работы харвестера при анализе и удалении устранимых препятствий в виде подлеска на пути движения харвестерной головки (рис. 8) и детализация процесса обработки ствола дерева (рис. 9).

В имитационной модели анализируется раскряжевка первоначально на шестиметровые сортименты, а когда это становится невозможным, то последовательно на четырех- и двухметровые

отрезки без учета их качественных признаков. Основные параметры сортиментов определяются с использованием заложенных в модель известных статистических зависимостей [26].

Полученные в результате обработки ствола сортименты переводятся в категорию «бревна» в системе имитационного моделирования с параметрами, автоматически определяемыми в процессе отделения от дерева каждого нового бревна. При этом фиксируется их порода и осуществляется расчет длины сортиментов и диаметров ствола в месте поперечной распиловки. Вершинная часть

измельчается на однометровые отрезки, остающиеся на лесосеке для укрепления волока или на перегнивание. Пересчет общего заготовленного объема бревен выполняется после отделения от ствола каждого нового бревна.

Имитационный процесс анализа перемещений и простоев харвестера представлен в виде информационно-логической детализации блоков диаграммы состояний работы харвестера на рис. 10.

В результате создания описанной имитационной модели авторским коллективом получено свидетельство Российской Федерации на регистрацию программы моделирования работы харвестера [27].

## Выводы

Разработанная имитационная модель работы харвестера на базе метода агентного моделирования процессов в системе AnyLogic позволяет проводить симуляцию производственных процессов и оценивать значимость их влияния на результаты функционирования производственных систем, переходя от показателей микроуровня к показателям макроуровня.

Модель предоставляет широкие возможности для анализа эффективности работы харвестера без необходимости реальной рубки лесных насаждений. Следующим этапом моделирования будет являться постановка имитационного эксперимента на описанной модели. При этом возможен анализ влияния на результаты работы как природно-производственных, так и технических и технологических факторов.

Планирование эксперимента на модели предусматривает выделение основных факторных признаков насаждений, влияние которых существенно сказывается на выработке харвестеров. Среди основных признаков окружающей среды, выбранных для дальнейшего анализа, можно выделить необходимость оценки влияния на производительность машин общего запаса леса на одном гектаре, влияния доли вырубаемого компонента и наличия на лесосеке подроста хозяйственно-ценных пород древесины. Экспериментальные исследования на модели также могут быть направлены на выявление степени влияния технических характеристик харвестеров и квалификации операторов на результаты работы и финальный объем заготовленной продукции. Среди основных признаков технического состояния машин, оценку которых выполняют с помощью подготовленного программного обеспечения можно выделить скоростные характеристики движения машины по лесосеке и работы ее манипулятора, характеристики эффективного вылета манипулятора и габаритные параметры харвестера и харвестерной головки.

Созданная программа имитационного моделирования может быть эффективно использована научными и научно-производственными организациями при анализе работы лесных машин, а также производственными предприятиями при выборе техники и технологии для организации работы в лесу.

## Список литературы

- [1] Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 4. С. 94–107. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2019.4.94
- [2] Mokhiev A., Rukomojnikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of the logging process in the natural and production conditions of the Krasnoyarsk region // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 817 (1), 2020, p. 012025. DOI:10.1088/1757-899X/817/1/012025
- [3] 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, no. 1, pp. 89–105.
- [4] Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series 1108, 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012030
- [5] Шегельман И.Р., Васильев А.С. Использование базы знаний как инструмента синтеза патентоспособных решений, повышающих эффективность возобновления леса сеянцами и саженцами лесных культур // Инженерный вестник Дона, 2020. № 7 (67). С. 206–215.
- [6] Рукомойников 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-раскряжевых машин // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 2 (54). С. 108–113.
- [7] Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3(375). С. 117–127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [8] Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 226, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
- [9] Gerasimov Y.Y., Sokolov A.P., Karjalainen T. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia // Croatian J. of Forest Engineering, 2008, v. 29, iss. 2, pp. 163–175.
- [10] Пильник Ю.Н. Методы и алгоритмы синтеза организационных структур формирования сетевых грузопотоков лесоматериалов многоуровневых транспортно-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2019. 340 с.
- [11] Иванников В.А. Совершенствование системы формирования грузопотоков лесоматериалов на смежных видах транспорта: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2019. 340 с.
- [12] Герасимов Ю.Ю., Катаров В.К., Ковалёва Н.В., Рожин Д.В., Соколов А.П., Слюнёв В.С. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2013. № 8 (137). С. 70–76.

- [13] Соколов А.П. Комплексное освоение лесосырьевых баз: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2015. 329 с.
- [14] Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 307–314. DOI: 10.12737/article\_59c2140d704ae5.63513712
- [15] Мохирев А.П. Обоснование доступности древесных ресурсов путем моделирования структуры лесотранспортных потоков (на примере Красноярского края РФ): дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Красноярск, 2021. 402 с.
- [16] 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 ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [17] Лаурила Я., Кучин А.В., Лебедев В.Д. Лесозаготовительные машины PONSSE. Архангельск: Изд-во И.А. Васильев, 2020. 144 с.
- [18] Будник П.В. Синтез технико-технологических решений комплексного освоения ресурсов древесины: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2021. 469 с.
- [19] Национальное общество имитационного моделирования URL: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения 01.12.2021).
- [20] Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 2005, 4166, 144 p. URL: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166> (дата обращения 18.02.2022).
- [21] 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, v. 27, no. 1, pp. 56–73. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335> (дата обращения 16.02.2022).
- [22] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Уч. зап. Петрозаводского государственного университета, 2012. № 8–2(129). С. 49–51.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Dissertations Forestales, 2009, 79 p. URL: <http://www.metla.fi/dissertations/df79.htm> (дата обращения 28.02.2022).
- [24] The AnyLogic Company. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения 25.02.2022).
- [25] Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
- [26] Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесная пром-сть, 1990. 392 с.
- [27] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М. Анисимов С.Е., Комисар В.П. Программа моделирования работы харвестера. Свидетельство о государственной регистрации компьютерной программы, №2022614531, РФ, 2022.

## Сведения об авторах

**Рукомойников Константин Павлович**  — д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», [rukomojnikovkr@volgatech.net](mailto:rukomojnikovkr@volgatech.net)

**Сергеева Татьяна Владиславовна** — аспирант Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», [sergeeva2010t@mail.ru](mailto:sergeeva2010t@mail.ru)

**Гилязова Татьяна Аркадьевна** — аспирант Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», [tat-gilyazova@yandex.ru](mailto:tat-gilyazova@yandex.ru)

**Царев Евгений Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», [CarevEM@volgatech.net](mailto:CarevEM@volgatech.net)

**Анисимов Павел Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», [AnisimovPN@volgatech.net](mailto:AnisimovPN@volgatech.net)

Поступила в редакцию 17.03.2022.

Одобрено после рецензирования 17.08.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

## MODELING OPERATION OF FOREST HARVESTER IN ANYLOGIC SIMULATION SYSTEM

K.P. Rukomoynikov✉, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, E.M. Tsarev, P.N. Anisimov

Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, 424000, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russia

rukomojnikovkp@volgatech.net

The purpose of the work is to create a computer model that allows to reproduce the technological process of logging, taking into account a huge number of various conditions that can affect the final result of the enterprise, to obtain the data necessary for making effective managerial and organizational decisions on labor standardization and the preparation of regulatory documentation. To do this, using the agent-based modeling method, a simulation model of the production process was created in the AnyLogic program. The functioning of the proposed model is carried out on the basis of significant statistical data on the most important characteristics of individual elements of the production process. The article demonstrates the possibilities of modeling technological schemes of work at the cutting site at the design stage of the technological map without the need for real felling of forest plantations. The diagram of the conditions of the harvester's work is presented, embedded in the simulation model created by the authors, which allows the researcher to conduct a step-by-step analysis of the work of the logging machine. An information-logical detailing of all blocks of the harvester work state diagram is shown, which allows understanding the principle of analysis when clearing the site for a new working position, analyzing the availability of trees in apiaries, processing of tree trunks, taking into account all movements and organizational and technical downtime in the process of developing forest cuttings. The reader is presented with a graphical demonstration of the choice of trees available for felling, as well as an analysis of the situation for moving to a new working position of the harvester. The sequence of data entry into the model and the principles of fixing the scientific results obtained on the basis of modeling are outlined. The created simulation model will allow forest users to compare the options for the technological schemes of the harvester's movement along the forest cutting with the choice of the best organizational and management solutions; creation of labor standards and production standards for the development of forest cuttings in any natural and production conditions for any model of the harvester used, depending on the type of felling and the species and quality characteristics of the felled trees.

**Keywords:** simulation, software, logging, felling area, chart

**Suggested citation:** Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesyiny na primere lesnogo kharvestera* [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

### References

- [1] Rukomoynikov K.P., Mokhired A.P. *Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy lesozagotovitel'nykh rabot putem sozdaniya dinamicheskoy modeli funktsionirovaniya predpriyatiya* [Substantiation of the technological scheme of logging operations by creating a dynamic model of the functioning of the enterprise]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, no. 4, pp. 94–107. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2019.4.94
- [2] Mokhired A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of the logging process in the natural and production conditions of the Krasnoyarsk region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 817 (1), 2020, p. 012025. DOI:10.1088/1757-899X/817/1/012025
- [3] 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, no. 1, pp. 89–105.
- [4] Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil. *IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series* 1108, 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012030
- [5] Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. *Ispol'zovanie bazy znaniy kak instrumenta sinteza patentosposobnykh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' vozobnovleniya lesa seyantsami i sazheritsami lesnykh kul'tur* [Using the knowledge base as a tool for the synthesis of patentable solutions that increase the efficiency of reforestation with seedlings and saplings of forest crops]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2020, no. 7 (67), pp. 206–215.
- [6] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. *Komp'yuternaya simulyatsiya razrabotki lesoshek s ispol'zovaniem valочно-suchkorezno-raskryazhevochnykh mashin* [Computer simulation of the development of cutting areas using felling-lopping-cutting machines]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2022, no. 2 (54), pp. 108–113.
- [7] Rukomoynikov K., Kuptcova V. Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [8] Mokhired A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, v. 226, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
- [9] Gerasimov Y.Y., Sokolov A.P., Karjalainen T. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2008, v. 29, iss. 2, pp. 163–175.
- [10] Pil'nik Yu.N. *Metody i algoritmy sinteza organizatsionnykh struktur formirovaniya setevykh gruzopotokov lesomaterialov mnogourovnevnykh transportno-tekhnologicheskikh sistem* [Methods and algorithms for the synthesis of organizational structures for the formation of network cargo flows of timber in multilevel transport and technological systems]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.)* 05.21.01. Voronezh, 2019, 340 p.

- [11] Ivannikov V.A. *Sovershenstvovanie sistemy formirovaniya gruzopotokov lesomaterialov na smeznykh vidakh transporta* [Improving the system of formation of cargo flows of timber on adjacent modes of transport]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh, 2019, 340 p.
- [12] Gerasimov Yu.Yu., Katarov V.K., Kovaleva N.V., Rozhin D.V., Sokolov A.P., Syunev V.S. *Sovershenstvovanie sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesnykh avtomobil'nykh dorog* [Improving the system of optimal design of the network of forest roads]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta], 2013, no. 8 (137), pp. 70–76.
- [13] Sokolov A.P. *Kompleksnoe osvoenie lesosyr'evykh baz: obosnovanie tekhnologiy i parametrov protsessov na osnove logisticheskogo podkhoda* [Comprehensive development of timber bases: substantiation of technologies and process parameters based on a logistic approach]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk, 2015, 329 p.
- [14] Sokolov A.P., Osipov E.V. *Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennogo protsessa zagotovki drevesiny s pomoshch'yu setey Petri* [Simulation modeling of the production process of wood harvesting using Petri nets]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, v. 7, no. 3 (27), pp. 307–314. DOI: 10.12737/article\_59c2140d704ae5.63513712
- [15] Mokhiev A.P. *Obosnovanie dostupnosti drevesnykh resursov putem modelirovaniya struktury lesotransportnykh potokov (na primere Krasnoyarskogo kraya RF)* [Justification of the availability of wood resources by modeling the structure of forest transport flows (on the example of the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation)]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Krasnoyarsk, 2021, 402 p.
- [16] Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood according to Scandinavian technology]. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019, 192 p.
- [17] Laurila Ya., Kuchin A.V., Lebedev V.D. *Lesozagotovitel'nye mashiny PONSSE* [PONSSE forestry machines]. Arkhangel'sk: I.A. Vasiliev Publishing House, 2020, 144 p.
- [18] Budnik P.V. *Sintez tekhniko-tekhnologicheskikh resheniy kompleksnogo osvoeniya resursov drevesiny: obosnovanie tekhnologiy i parametrov protsessov na osnove logisticheskogo podkhoda* [Synthesis of technical and technological solutions for the integrated development of wood resources: substantiation of technologies and process parameters based on a logistic approach]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk, 2021, 469 p.
- [19] *Natsional'noe obshchestvo imitatsionnogo modelirovaniya* [National Society for Simulation]. Available at: <http://simulation.su/ru.html> (accessed 01.12.2021).
- [20] Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 2005, 4166, 144 p. Available at: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166> (accessed 18.02.2022).
- [21] 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, v. 27, no. 1, pp. 56–73. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335> (accessed 16.02.2022).
- [22] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syunev V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation modeling of the harvester operation: algorithms and implementation]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 8–2(129), pp. 49–51.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*, 2009, 79 p. Available at <http://www.metla.fi/dissertationes/df79.htm> (accessed 28.02.2022).
- [24] The AnyLogic Company. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (accessed 25.02.2022).
- [25] Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. *Agent-based models of the Economy: from theories to applications*. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
- [26] Kochegarov V.G., Bit Yu.A., Men'shikov V.N. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Moscow: Lesnaya prom-st', 1990, 392 p.
- [27] Rukomoynikov K.P., Sergeeva, T.V., Gilyazova, T.A., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Komisar V.P. *Programma modelirovaniya raboty harvestera* [Harvester Simulation Program]. Certificate of state registration of the computer program, no. 2022614531, Russian Federation, 2022.

## Authors' information

**Rukomoynikov Konstantin Pavlovich**✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, [rukomojniovkp@volgatech.net](mailto:rukomojniovkp@volgatech.net)

**Sergeeva Tat'yana Vladislavovna** — pg., Volga State University of Technology, [sergeeva2010t@mail.ru](mailto:sergeeva2010t@mail.ru)

**Gilyazova Tat'yana Arkad'evna** — pg., Volga State University of Technology, [tat-gilyazova@yandex.ru](mailto:tat-gilyazova@yandex.ru)

**Tsarev Evgeniy Mikhaylovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, [CarevEM@volgatech.net](mailto:CarevEM@volgatech.net)

**Anisimov Pavel Nikolaevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Volga State University of Technology, [AnisimovPN@volgatech.net](mailto:AnisimovPN@volgatech.net)

Received 17.03.2022.

Approved after review 17.08.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest