



## Формирование рациональных структур технологических систем в природообустройстве с помощью агентного имитационного моделирования

© 2026. О. Н. Дидманидзе<sup>1</sup>, Е. П. Парлюк<sup>2</sup>, А. И. Новиченко<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация,

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Российская Федерация

*В природообустройстве актуальной задачей остается разработка научно-методического подхода к проектированию и оптимизации технологических систем. В основе предлагаемого подхода лежит интеграция онтологического проектирования и агентного имитационного моделирования, где интеграция обеспечивает связь между абстрактным описанием и вычислительным экспериментом. Объектами исследования выступали технологические процессы реконструкции напорного трубопровода в закрытой оросительной сети. Именно здесь, при явном недостатке статистических данных, имитационное моделирование становится основным инструментом исследования, которое позволяет изучать возможные производственные сценарии и проводить оптимизацию без масштабных натурных экспериментов. Вместе с тем существует риск расхождения модельных результатов с реальными показателями. Причина такого расхождения кроется в сложности полноценного учета организационно-технологических факторов, где каждый фактор может вносить нелинейные искажения в итоговые оценки. Снять указанное ограничение помогает агентный подход: именно он даёт возможность детально анализировать поведение отдельных компонентов и характер их взаимодействия, а также гибко подстраиваться под меняющиеся условия. К числу ключевых этапов построения такой модели относятся онтологическое описание возможных структур комплексов и определение функциональных связей между активными элементами и локальными процессами – с обязательным учётом условий эксплуатации оборудования. В рамках исследования разработан соответствующий инструментарий, с помощью которого удаётся решать задачи разного уровня сложности и масштабности. Предложен комплексный методологический подход, позволяющий последовательно интегрировать этапы онтологического описания предметной области, формализации функционально-технологических связей и агентного моделирования для задач проектирования технологических систем в природообустройстве. Эффективность предлагаемого подхода апробирована на реальном процессе реконструкции закрытой оросительной системы, предложена Парето-оптимальная область поиска рациональных структур технологических систем.*

**Ключевые слова:** агентное моделирование, технологический комплекс машин, гидромелиорация, техноприродные системы, водохозяйственный комплекс, ресурсоэффективные технологии, метод Монте-Карло

**Благодарности:** работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П., Новиченко А. И. Формирование рациональных структур технологических систем в природообустройстве с помощью агентного имитационного моделирования. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):504–517. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.504-517>

Поступила в редакцию: 05.12.2025

Принята к публикации: 08.04.2026

Поступила после рецензирования: 27.03.2026

Опубликована онлайн: 27.04.2026

## Formation of rational structures of technological systems in environmental management using agent-based simulation modeling

© 2026. Otari N. Didmanidze<sup>1</sup>, Ekaterina P. Parlyuk<sup>2</sup>, Anton I. Novichenko<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

*In environmental management, developing a scientific and methodological approach to the design and optimization of technological systems remains a pressing issue. The proposed approach is based on the integration of ontological design and agent-based simulation modeling, where this integration provides a link between abstract description and computational experimentation. The objects of study were the technological processes of reconstructing a pressure pipeline in a closed irrigation network. It is here, with the obvious lack of statistical data, that simulation modeling becomes a key research tool. It allows for the exploration of possible production scenarios and optimization without large-scale field experiments. However, there is a risk of discrepancies between model results and actual indicators. The reason for this discrepancy lies in the difficulty of fully accounting for organizational and technological factors, each of which can introduce nonlinear distortions into the final*

*estimates. An agent-based approach helps overcome this limitation: it enables detailed analysis of the behavior of individual components and the nature of their interactions, as well as flexible adaptation to changing conditions. Key stages in constructing such a model include an ontological description of possible complex structures and the definition of functional relationships between active elements and local processes, all while taking into account the equipment's operating conditions. As part of the study, a corresponding toolkit was developed that could be used to solve problems of varying complexity and scale. A comprehensive methodological approach is proposed that allows for the consistent integration of the stages of ontological description of a subject area, formalization of functional-technological relationships, and agent-based modeling for designing technological systems in environmental management. The effectiveness of the proposed approach was tested on a real process of reconstruction of a closed irrigation system, and a Pareto-optimal search region for rational structures of technological systems was proposed.*

**Keywords:** agent-based modeling, technological machinery complex, land reclamation and water management, technological systems, water management complex, resource-efficient technologies, Monte Carlo method

**Acknowledgements:** the research was carried out without financial support within initiative theme.

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Didmanidze O. N., Parlyuk E. P., Novichenko A. I. Formation of rational structures of technological systems in environmental management using agent-based simulation modeling. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):504–517. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.504-517>

Received: 05.12.2025

Received: 27.03.2026

Accepted for publication: 08.04.2026

Published online: 27.04.2026

В современных условиях эксплуатации технологических систем в области природообустройства [1] возникает необходимость в эффективных методах управления при ограниченных ресурсах [2]. Обеспечение оптимальной работы таких систем требует глубокого понимания их структурных особенностей и динамических характеристик<sup>1</sup>. Однако сложности учета уникальных особенностей каждого объекта и недостаток статистических данных затрудняют применение традиционных методов моделирования, что обуславливает необходимость внедрения альтернативных подходов [3].

Классические подходы, опирающиеся на усредненные статистические данные и укрупненные математические модели, часто не способны адекватно отразить динамику реальных процессов, где ключевую роль играют локальные взаимодействия между участниками процесса, человеческий фактор, изменчивость внешних условий [4]. Это приводит к значительному несоответствию между проектируемыми и фактическими показателями эффективности технологических систем, росту рисков и неоптимальному использованию ограниченных ресурсов [5].

В этой связи актуальность настоящего исследования обусловлена острой производственной необходимостью в применении методологии синтеза эффективных технологических систем, которая позволила бы:

- преодолеть проблему «черного ящика» классических имитационных моделей за счет явного описания особенностей поведения и логики взаимодействия каждого активного элемента системы;

- проектировать адаптивные и устойчивые производственно-технологические системы, способные эффективно функционировать при изменении внешних и внутренних условий;

- проводить оптимизацию структуры технологических систем в условиях глубокой неопределенности и дефицита данных, исключая дорогостоящие и длительные натурные эксперименты.

Использование агентного подхода (*Agent-Based Modeling*) представляется наиболее перспективным путем решения подобных задач, так как он позволяет декомпозировать сложную систему на интеллектуальные автономные элементы (агенты), наделенные правилами поведения, изучать эмерджентные свойства системы, возникающие в результате их взаимодействия, и перейти к концепции цифровых двойников [6, 7].

Однако вопрос применения методологии функционального моделирования онтологической структуры технологических систем, используемой в парадигме агентного моделирования, остается малоизученным и достаточно перспективным инструментом для использования в отраслевых системах поддержки принятия решений [7].

<sup>1</sup>Р50.1.028–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Изд-во стандартов, 2001. 54 с.  
URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850833.pdf>

*Цель исследования* – разработать научно-методический подход к проектированию и оптимизации эффективных технологических систем в природообустройстве (на примере реконструкции закрытой оросительной сети) на основе интеграции онтологического проектирования и агентного имитационного моделирования.

*Задачи исследования:*

1. Выполнить онтологическое описание технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети с учетом условий реализации и назначения вида технологических машин на отдельных операциях.

2. Построить агентную имитационную модель технологической системы в природообустройстве на примере работ по реконструкции закрытой оросительной сети.

3. Реализовать множественный компьютерный эксперимент на агентной имитационной модели технологической системы в природообустройстве.

*Научная новизна* – исследование вносит вклад в теорию имитационного моделирования сложных организационно-технологических систем, предлагая практически применимый инструментарий для перехода от реактивного к проактивному и адаптивному управлению ресурсами в стратегически важной и чувствительной к изменениям сферы природообустройства.

*Материал и методы.* Основным инструментом для исследования и оптимизации технологических систем становится имитационное моделирование, позволяющее исследовать сценарии функционирования без проведения дорогостоящих экспериментов<sup>2</sup>. Тем не менее, традиционные модели часто показывают значительные расхождения с реальной работой технологических систем из-за сложности учета организационно-технологических особенностей, действующих факторов и особенностей взаимодействия элементов описываемой системы [5].

Для устранения этих ограничений принято решение применить агентный подход к процессу формирования имитационной модели, основанный на принципе «снизу вверх». Этот подход позволяет формировать модели, детально анализируя поведение каждого элемента, технологического звена и их взаимодействий. Важными этапами являются

создание онтологических описаний возможных вариантов структур и определение функциональных связей между элементами систем с учетом условий эксплуатации и их эксплуатационных параметров [8, 9].

С точки зрения проектирования сложных производственных систем, использование мультиагентных технологий дает возможность отказаться от классического подхода к моделированию, основанного на едином сложном алгоритме, в пользу множества простых взаимодействующих алгоритмов агентов [10]. Ключевым преимуществом такой архитектуры является декомпозиция программного кода, что приводит к существенному повышению скорости выполнения вычислительных операций в ходе симуляции, а также возможности введения в вычислительный процесс дополнительных агентов или осуществлять перебор вариантов элементов системы.

Использование агентного моделирования способствует выявлению ключевых зависимостей и особенностей поведения элементов системы, что содействует формированию рациональной структуры технологического комплекса. В результате агентного имитационного моделирования достигается максимальное раскрытие потенциала системы при минимальных ресурсных затратах [11].

Проведенный анализ структуры и свойств ключевых параметров технологического процесса создает необходимые предпосылки для построения мультиагентной имитационной модели [12].

Разработка подобной модели должна опираться на ряд фундаментальных методологических принципов:

1. Модель представляет собой совокупность агентов.

2. Агент обладает набором свойств, аналогичных наиболее важным свойствам реального объекта.

3. Имеется набор правил, характеризующих взаимодействия агентов между собой и окружением.

Существенным преимуществом предлагаемой методики разработки имитационных моделей является создание уникального динамического кода, который придает системе ключевое свойство адаптивности [13].

<sup>2</sup>Анисимов А. В., Горностаев В. И., Новиченко А. И., Подхватилин И. М. Обоснование рациональных параметров технологических процессов в мелиоративном строительстве с использованием имитационного моделирования. Мат-лы Международ. научн. конф. молодых учёных и специалистов, посвящ. 160-летию В. А. Михельсона, Москва, 09–11 июня 2020 года. М.: РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2020. Т. 2. С. 381–385.

Таким образом, система приобретает черты интеллектуального инструмента, способного не только отражать, но и адаптироваться к изменчивым условиям, что закладывает основу для создания цифровых двойников, пригодных для оперативного анализа текущей ситуации и поддержки принятия решений в условиях неопределенности [14, 15].

Данный регламентированный подход обладает рядом ключевых преимуществ:

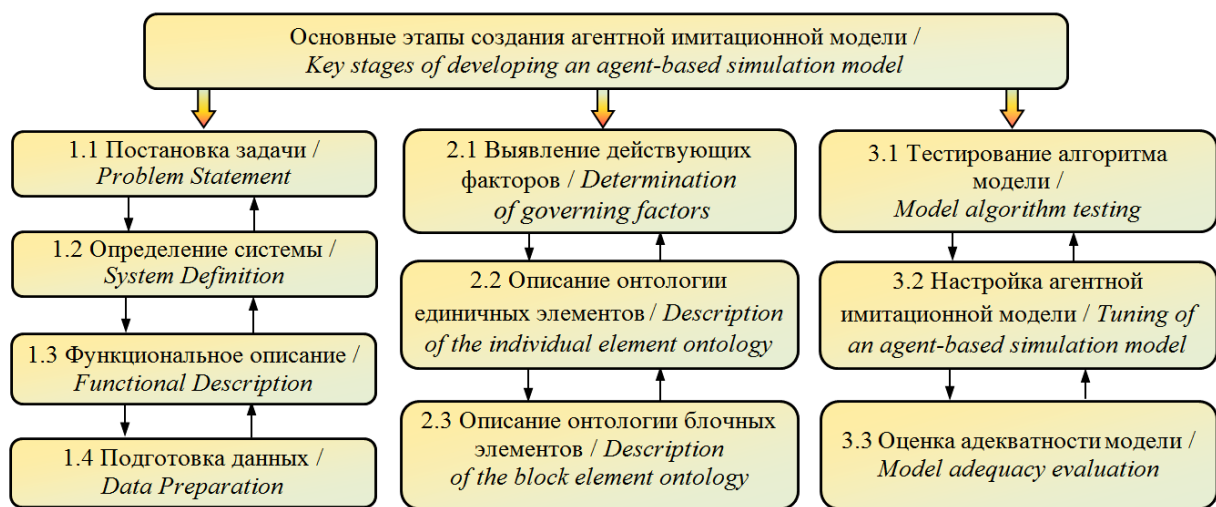
- *комплексность*: методика охватывает все стадии работы, обеспечивая целостность и непротиворечивость конечной модели;

- *структурированность*: четкая последовательность этапов минимизирует ошибки проек-

тирования и позволяет системно управлять процессом разработки;

- *воспроизводимость*: формализация правил гарантирует, что различные исследователи, применяя методику к одной системе, придут к сопоставимым результатам, что является критерием научной обоснованности.

**Результаты и их обсуждение.** Графическое представление полного цикла экспериментальных работ, согласно предлагаемой методике (ее основные стадии, входные/выходные этапы и точки принятия решений), приведено на рисунке 1.



**Рис. 1. Этапы создания агентной имитационной модели технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети /**

**Fig. 1. Development stages of an agent-based simulation model for closed irrigation network reconstruction**

Процедура создания агентной имитационной модели для технологической системы реконструкции закрытых оросительных сетей может быть представлена в виде следующих основных этапов<sup>3</sup>:

1.1. *Постановка задачи.* На этапе постановки задачи формируется фундамент всего исследования, благодаря чему обеспечивается его практическая направленность и измеримость результатов. Здесь соблюдаются несколько важных принципов.

Конкретизация критериев: определяемые показатели снабжаются чёткими алгоритмами расчёта внутри модели (применительно к реконструкции закрытой оросительной сети это не

абстрактная «эффективность», а, скажем, коэффициент равномерности полива либо удельные энергозатраты на единицу орошаемой площади).

Учёт ограничений: с опорой на специфику условий формализуются все ограничивающие факторы (лимиты финансирования, сроки выполнения работ, доступность техники), которые напрямую влияют на пространство возможных решений.

Связь с валидацией: установленная система показателей в дальнейшем превращается в основу для проверки адекватности модели – именно с ней сравниваются результаты имитации.

<sup>3</sup>Подхватилин И. М., Горностаев В. И., Новиченко А. И. Этапы создания имитационной модели технологической системы с применением мультиагентных технологий. Мат-лы Междунар. научн. конф. молодых учёных и специалистов, посвящ. 150-летию А. В. Леонтовича, г. Москва, 3-6 июня 2019 г. М.: РГАУ-МСХА, 2019. С. 501–506.

Ключевая цель данного этапа заключается в трансформации общей идеи исследования в формализованный набор требований и критериев. Благодаря этому процесс моделирования становится управляемым, а его итоги – верифицируемыми. Этап предполагает чёткое определение целей моделирования и установление системы основных технико-экономических показателей, которые описывают результаты процесса реконструкции. Определение показателей ведётся на основе всей совокупности доступных исходных данных с учётом специфики заданных производственных и ресурсных условий. Адекватность достигается за счёт последовательной детализации – от концептуального описания системы к формализации состояний, событий и переходов для каждого агента. Созданная структурная модель служит тем самым «скелетом», на который впоследствии наращивается алгоритмическая и математическая логика, то есть знаменует переход к этапу параметризации и программирования агентного поведения.

1.2. *Определение системы.* Формализация контекстных границ системы происходит на шаге определения системы. Именно здесь идентифицируются и фиксируются экзогенные факторы вместе с неизменяемыми условиями, потому что они выступают в роли заданных ограничений для всей последующей разработки модели. К таким условиям относятся гидрогеологическая обстановка, климатические характеристики и действующее законодательство. В обеспечении адекватности имитации реальной эксплуатационной обстановки учет этих факторов становится обязательным, где любое упущение ведет к искажению результатов. На практике это означает выявление всех внешних по отношению к управлению процессом факторов. Замкнутый цикл «моделирование – анализ – принятие решений» обслуживается данным функционалом, потому что именно он связывает внешнюю среду с внутренней логикой модели.

Ярким примером является работа на пойменных землях, где ключевым нерегулируемым параметром выступает высокий уровень грунтовых вод. В соответствии с агротехническими и экологическими нормативами это накладывает жёсткое ограничение: траншея не может оставаться открытой продолжительное время. Нарушение данного условия моделирует в системе негативный сценарий – обводнение и заболачивание, что приводит к дополни-

тельным потерям рабочего времени и непроизводительному расходу ресурсов.

Производительность при производстве земляных работ также зависит от особенностей грунтовых и территориальных условий. При проектировании данная зависимость формализуется и принимается во внимание с использованием коэффициента наполнения ковша землеройных машин.

1.3. *Функциональное описание.* Цель этапа – выявить и документировать причинно-следственные связи и потоки между компонентами системы. Применение нотации IDEF0<sup>4</sup> позволяет наглядно отобразить, какие входные данные (ресурсы, информация) необходимы для выполнения каждой функции, какие результаты она производит, что ею управляет (технология, нормативы) и какие механизмы (оборудование, персонал) задействованы. Полученные диаграммы являются «дорожной картой» для программирования логики агентов.

На начальном этапе была сформулирована функциональная модель технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети. На линейно-протяженных объектах это, как правило, зацикленная модель, реализующая основные операции на локальных участках сооружения – «захватках». В упрощенном виде и для удобства восприятия технологический процесс можно представить в виде сгруппированных технологических операций в технологические блоки (рис. 2).

Отличительной особенностью предложенной функциональной модели технологического процесса является разделение на контуры параллельных потоков с различной интенсивностью, которые непрерывно циркулируют в замкнутом цикле алгоритма описания моделируемых технологических блоков, внутри которых также закладывается логика непрерывного циркулирования технологических операций.

Финальным звеном в контуре моделирования выступает интеграция его результатов в экспертно-аналитическую среду. Для этого необходима реализация специализированного шлюза, который обеспечит автоматический сбор сырых выходных данных симуляции, их агрегацию и преобразование в структурированный формат, пригодный для загрузки в базу знаний справочно-информационного модуля. Данный функционал служит ключом к замкнутому циклу «моделирование – анализ – принятие решений».

<sup>4</sup>Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с. URL: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/cheremnykh.pdf>

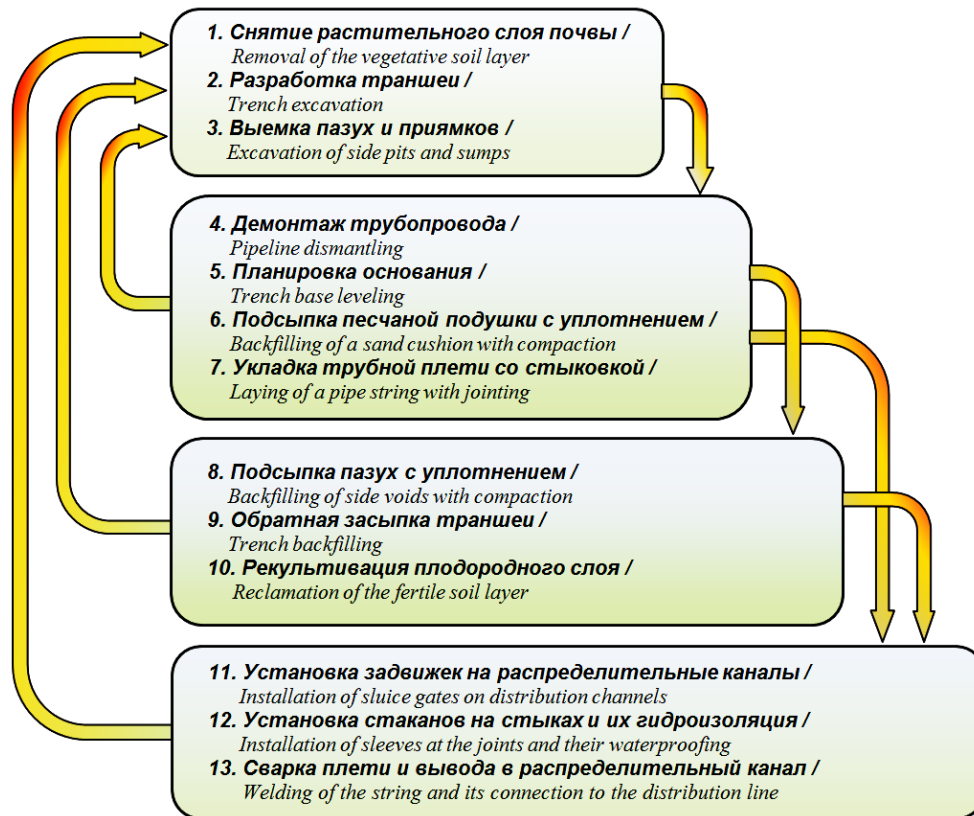


Рис. 2. Функциональная модель сгруппированного технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети /

Fig. 2. Functional model of the grouped technological process for reconstructing a closed irrigation network

1.4. Подготовка данных. Детальная инвентаризация и параметризация всех объектов системы выполняется на этапе подготовки данных. Для технологических машин здесь определяются ключевые атрибуты (мощность, скорость, вместимость ковша), потому что без этих параметров невозможно описать поведение техники. Для операций задаются их алгоритм, длительность, условия начала и завершения. Особое внимание уделяется сбору статистических сведений о внешних факторах и случайных событиях, где к таким событиям относятся время устранения отказа и продолжительность организационных задержек. Именно эти данные в дальнейшем формируют стохастическую составляющую модели.

2.1. Выявление действующих факторов. На этапе выявления действующих факторов проводится дополнительная формализация и уточнение факторов, влияющих на единичные элементы моделируемой технологической системы. К ним относятся параметры надёжности машин и оборудования, возрастной состав техники, квалификация операторов, уровень производственно-технической эксплуатации

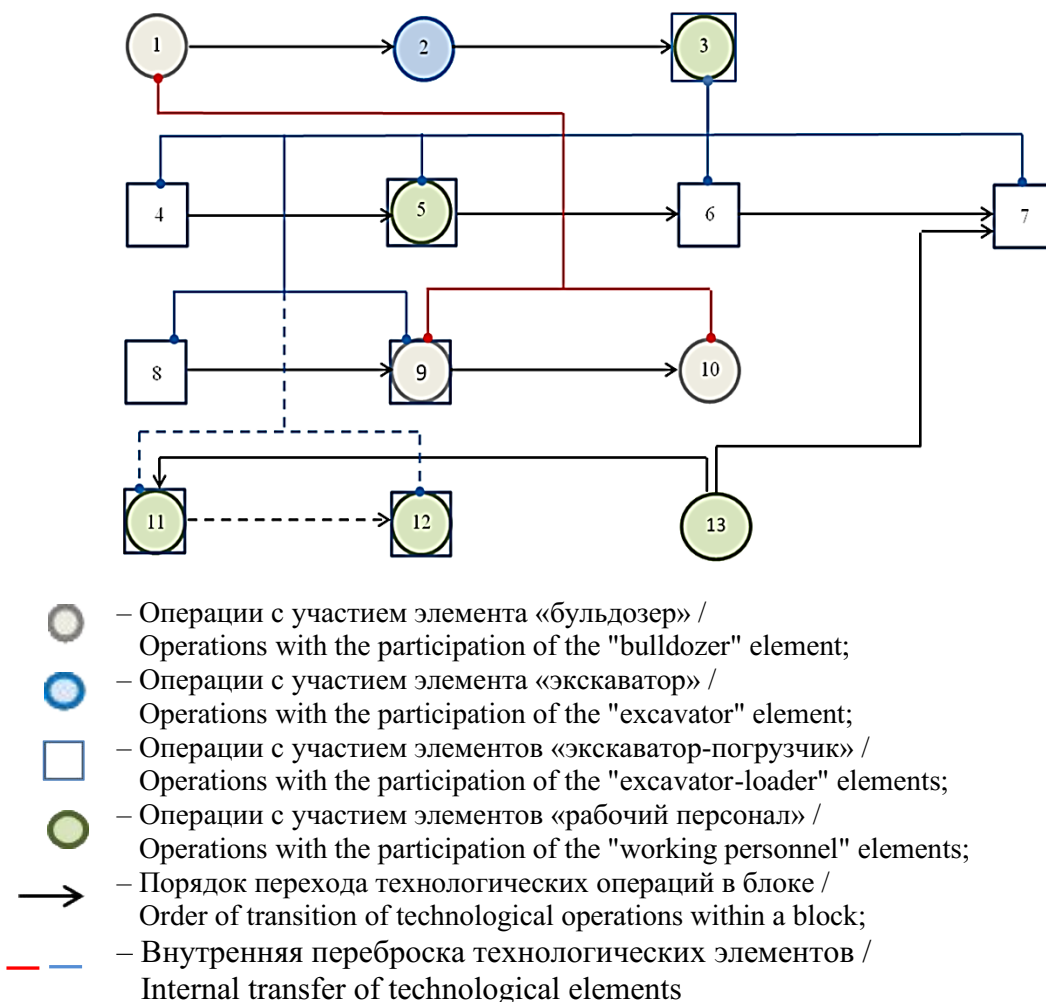
предприятия-подрядчика, а также природно-климатические условия.

2.2-2.3. Описание онтологии единичных и групповых элементов. При описании онтологии единичных и групповых элементов ключевым аспектом становится программирование не только отдельных действий, но и механизмов обратной связи, обеспечивающих адаптивность системы. Пример: агент «подсистема управления», получая данные от агентов «процесс» и «ресурсы», способен динамически перераспределять задания или менять приоритеты. Внешняя среда моделируется как активный агент либо как набор событий, генерирующих стохастические возмущения (изменение погоды, отказы, технологические простои), на которые система должна реагировать. Такой подход позволяет изучать устойчивость и эффективность системы в изменчивых условиях. Использование методологии IDEF0 для описания динамической системы имеет существенное ограничение: она не в полной мере отображает процессы и взаимосвязи, эволюционирующие во времени. Именно поэтому переход к агентной модели оказался уместным и логичным дополняющим решением. Каждый этап на схеме

был преобразован в состояние или действие соответствующего агента, а связи между этапами – в события либо сообщения, инициирующие переходы между состояниями. Предложенная схема напрямую определяет логику диспетчеризации в модели: она диктует, при каких условиях одна операция завершается и начи-

нается следующая, как распределяются машины по захваткам.

Таким образом, схема является визуальным представлением логического ядра имитационного алгоритма, представленного ранее на рисунке 2 (цифровые обозначения технологических операций соответствуют).



**Рис. 3. Схема перемещения технологических машин в процессе выполнения технологического процесса /**

**Fig. 3. Diagram of technological machinery movement during the execution of the technological process**

Применение данной схемы в ходе имитационного моделирования обеспечивает четкую визуализацию логической последовательности технологического процесса, а также позволяет с высокой точностью смоделировать сеть взаимосвязей и временную логику функционирования системы.

Преобразование накопленных эмпирических данных и инженерных знаний в формализованную среду AnyLogic выполняется путем задействования соответствующих готовых компонентов из встроенных библиотек среды имитационного моделирования.

В результате формируется многоуровневая имитационная структура, где нижний уровень представлен взаимодействующими агентами-исполнителями, а верхний – управляющими правилами и сценариями [12]. Такая архитектура отражает организационную структуру реального проекта и одновременно позволяет гибко тестировать различные стратегии управления (достаточно изменить правила в подсистеме управления без перепрограммирования логики отдельных агентов). Тем самым создаётся мощный инструмент для анализа

сценариев «что-если» ещё до этапа практической реализации. Совокупность алгоритмов элементов системы, интегрированная с алгоритмом управляющей подсистемы, формирует интеллектуальный компонент мультиагентной системы. Наличие такого компонента в модели даёт возможность воссоздавать и детально настраивать различные производственные сценарии. Таким образом, представленная методология последовательно решает задачу перехода от концептуального описания сложной стохастической системы (включая внутреннюю переброску технологических элементов) к её работоспособному, адекватному и гибкому имитационному аналогу [16].

Решающим фактором успеха является итеративный процесс, сочетающий формализацию структурных и функциональных связей, агентную декомпозицию и строгую параметрическую настройку на основе объективных данных. Полученная модель является не итогом, а началом аналитического этапа, открывая возможности для глубокого исследования, оптимизации и повышения надежности проектов в области природообустройства. Данный подход позволяет рассматривать разработанную модель в качестве прототипа цифрового двойника технологической системы.

### 3.1. Тестирование алгоритма модели.

После серии тестовых прогонов выполняется анализ полученных данных и графиков с целью подтверждения внутренней согласованности модели. Убедительным доказательством корректности является стабильность системы при длительных запусках, логичная реакция на граничные значения технологических параметров.

Итеративный характер тестирования позволяет не только выявлять программные ошибки, но и калибровать модель. На начальных этапах, при изолированном тестировании отдельных агентов и простых связей, валидируется корректность базовой логики и распределения атрибутов. Например, проверяется, корректно ли агент «экскаватор» изменяет свое состояние при получении задания, и соответствует ли расход ресурсов заданным математическим зависимостям.

По мере усложнения тестов до уровня взаимодействия подсистем, ключевым объектом анализа становится соответствие динамики

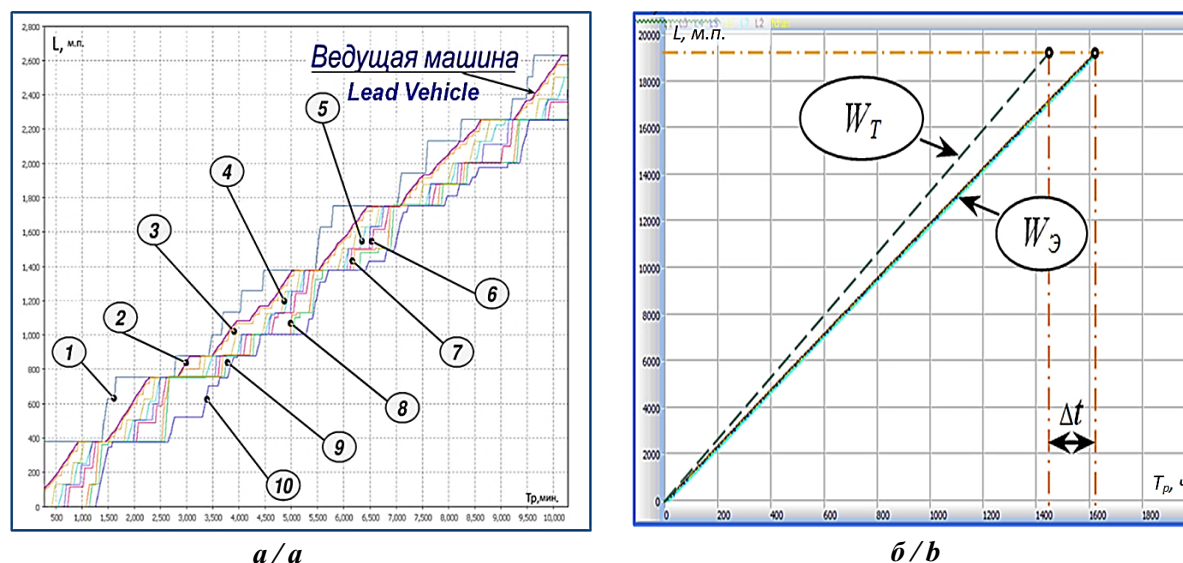
выходных показателей модели ожидаемому системному поведению. Наблюдение за графиком выполнения работ (рис. 4) в реальном времени служит мощным диагностическим инструментом.

Нелинейность графика, его «ступенчатый» характер и вариативность при повторных запусках перестают быть артефактом, а становятся ожидаемым проявлением стохастической природы системы, подтверждая адекватность заложенных вероятностных распределений (времени операций, простоев) и логики принятия решений агентами в условиях неопределенности. Следовательно, при каждом новом прогоне модели, учитывающей стохастическую природу этих факторов, будут достигаться различные результаты, что позволит по итогам множественного компьютерного эксперимента определить математическое ожидание искомых параметров моделируемого процесса (производительность системы, продолжительность работ, суммарные и приведенные затраты).

При этом математическое ожидание значения эксплуатационной производительности технологической системы  $W_3$  будет значительно отличаться от технической производительности технологической системы  $W_m$ , определяемой аналитическими расчетами по параметрам работы ведущей машины, что обусловлено учетом в процессе имитационного моделирования влияния внешних и внутренних факторов, взаимного влияния участников технологического процесса (см. рис. 4, б).

Эта вариативность, будучи артефактом сознательного включения в модель случайных величин и системных ограничений, подтверждает ее способность генерировать правдоподобные, а не детерминированные сценарии.

После проведения серии валидационных прогонов, в ходе которых была подтверждена высокая степень соответствия функциональных зависимостей модели реальным процессам, обоснованно принимается решение о переходе к следующей фазе – проведению имитационного эксперимента. Данный эксперимент нацелен на исследование системы в условиях, максимально приближенных к параметрам реального технологического процесса [17]. Тем самым он знаменует собой переход к заключительному этапу разработки агентной имитационной модели.



- ① – **Операция 1:** Снятие растительного слоя почвы / **Operation 1:** Removal of the vegetative soil layer
- ② – **Операция 2:** Разработка траншеи / **Operation 2:** Trench excavation
- ③ – **Операция 3:** Выемка пазух и приямков / **Operation 3:** Excavation of side pits and sumps
- ④ – **Операция 4:** Демонтаж трубопровода / **Operation 4:** Pipeline dismantling
- ⑤ – **Операция 5:** Планировка основания траншеи / **Operation 5:** Trench base leveling
- ⑥ – **Операция 6:** Подсыпка песчаной подушки с уплотнением / **Operation 6:** Backfilling of a sand cushion with compaction
- ⑦ – **Операция 7:** Укладка трубной плети со стыковкой / **Operation 7:** Laying of a pipe string with jointing
- ⑧ – **Операция 8:** Подсыпка пазух с уплотнением / **Operation 8:** Backfilling of side voids with compaction
- ⑨ – **Операция 9:** Обратная засыпка траншеи / **Operation 9:** Trench backfilling
- ⑩ – **Операция 10:** Рекультивация плодородного слоя / **Operation 10:** Reclamation of the fertile soil layer

Рис. 4. Диаграмма реализации имитационной модели функционирования технологической системы реконструкции закрытой оросительной сети: а – на отдельном участке объекта; б – на всей протяженности объекта /

Fig. 4. Fragment of the simulation model execution graph for the technological system of closed irrigation network reconstruction: a – on a separate section of the facility; b – along the entire length of the facility

### 3.2. Настройка имитационной модели.

Заключительный этап – финальная калибровка и валидация модели. В отличие от верификации, которая подтверждает, что модель технически работает «как задумано», валидация отвечает на вопрос, насколько точно модель отражает реальную систему. Этот процесс включает в себя два взаимосвязанных направления:

- *параметрическая калибровка:* точная настройка внутренних параметров модели (например, коэффициентов производительности, законов распределения времени операций, вероятностей событий) для минимизации расхождений между выходными показателями модели и историческими или эталонными данными;

- *валидация адекватности:* оценка способности модели не только воспроизводить известные данные, но и давать правдоподобные прогнозы в новых, неиспытанных условиях.

Для этого применяются такие методы, как сравнение поведения модели с экспертной оценкой, анализ чувствительности ключевых выходных параметров к изменению входных и проверка на экстремальных (стрессовых) сценариях.

3.3. *Оценка адекватности.* Здесь результаты модели сравнивают с натурными исследованиями, чтобы понять, можно ли модель применять или её надо корректировать.

Сравнение проводят, анализируя расхождения между выходными данными модели и статистикой реальной технологической системы. Главный анализируемый показатель – дисперсия этих расхождений.

Модель принимается, если фактические статистические параметры системы укладываются в доверительный интервал, найденный по формуле.

Модель принято считать адекватной при выполнении выражения:

$$y_f \in [y_{mod} - t_\alpha \cdot \sigma_{mod}; y_{mod} + t_\alpha \cdot \sigma_{mod}],$$

при  $x_{mod} = x_f$ ,

где  $y_f$ ,  $y_{mod}$  – результат реальной системы и моделируемой соответственно;  $x_f$ ,  $x_{mod}$  – входные данные реальной системы и моделируемой соответственно;  $t_\alpha$  – критерий Стьюдента;  $\sigma_{mod}$  – среднеквадратичное отклонение моделируемых показателей.

Завершающим шагом настройки является дополнительная аналитическая обработка статистических данных для всех стохастических величин, используемых в модели. В ходе этого процесса производится уточнение законов их распределения с последующим внедрением уточнённых параметров в модель и в электронный паспорт соответствующего агента. При этом важно отметить следующее: чрезмерная детализация способна снизить практическую вычислительную эффективность модели. Введение более сложных законов распределения для величин с незначительным влиянием на процесс относится к такой детализации, потому что вычислительные затраты не окупаются приростом точности. В ситуациях избыточности модели исследователь вправе принять решение об упрощении её структуры. Агрегирование малозначимых параметров в группы или сокращение диапазона варьирования стохастических величин до фиксированного (среднего) значения достигается на этом пути, где упрощение становится осознанной стратегией. В силу стохастической природы результатов моделирование данного технологического процесса не допускает однократной настройки.

Для решения задач, связанных со случайными величинами, эффективно применяется метод Монте-Карло [18], использование которого обладает рядом специфических особенностей [19].

Представленный график диаграммы хода реконструкции позволяет выявить важную особенность модели: процесс на каждой захватке протекает уникально, без чёткого шаблонного повторения. Это свидетельствует о том, что перед нами динамическая и стохастическая система. Её поведение не задано жёстко, а формируется в реальном времени как реакция на непрерывно меняющуюся совокупность параметров среды и состояния самой

системы – и именно это учитывается в модели. Проведённый системный анализ позволил установить существенную зависимость технологического процесса от воздействия стохастических факторов. Данное ключевое свойство было заложено в основу имитационной модели, что обуславливает принципиальную невозможность гарантировать полное воспроизведение результатов при повторном запуске. Для получения статистически надёжных выводов необходимо проводить серии имитационных экспериментов с последующей агрегацией и анализом полученных данных.

Учёт случайных величин и событий в модели был реализован целенаправленно, что исключает детерминированность выходных данных. Следовательно, результат единичного вычислительного эксперимента следует рассматривать как одну из возможных реализаций процесса, а не как однозначный прогноз.

Наиболее эффективным методом для исследований в подобных условиях является метод статистических испытаний (Монте-Карло), который получил широкое распространение в имитационном моделировании сложных систем, подверженных влиянию случайности.

Ключевой особенностью применения метода Монте-Карло является определение оптимального числа итераций (повторов опыта), необходимого для достижения статистически значимых результатов. Несмотря на значительный рост вычислительных мощностей, сделавший метод массово доступным, проблема обоснования требуемого количества прогонов для конкретного эксперимента не имеет универсального аналитического решения. Этот параметр зависит от дисперсии моделируемых величин и требуемой точности, что обуславливает необходимость использования эмпирических подходов к его определению в каждом конкретном случае.

На рисунке 5 представлен результат множественного компьютерного эксперимента на агентной имитационной модели технологической системы (в системе Сроки/Затраты). Модель последовательно перебирала 135 вариантов комплектования технологического комплекса машин с различной производительностью и надёжностью техники и производила моделирование каждого варианта с необходимым для достаточной точности моделирования числом итераций (не менее 1000 прогонов).

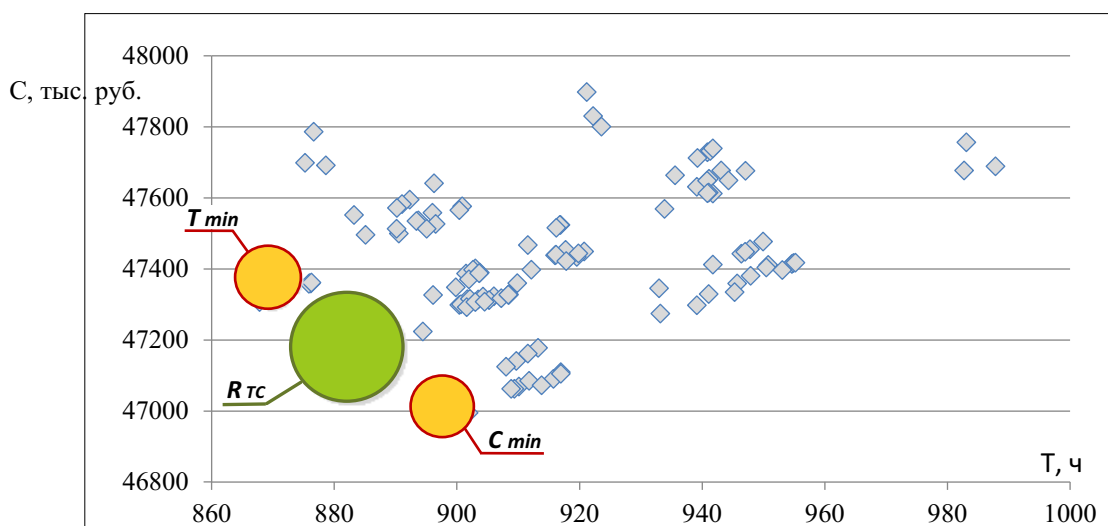


Рис. 5. Пример результатов агентного имитационного моделирования функционирования технологической системы в природообустройстве /

Fig. 5. An example of the results of agent-based simulation modeling of the functioning of a technological system in environmental management

Кластер откликов модели  $T_{min}$  обозначает область наилучших вариантов структуры технологической системы по критерию минимума общей продолжительности ведения работ (сроки). Кластер  $C_{min}$  обозначает область наилучших вариантов структуры технологической системы по критерию минимума общих эксплуатационных затрат на реализацию проекта. Кластер откликов модели  $R_{тс}$  обозначает область рациональных вариантов структур технологической системы, одновременно учитывая приемлемые значения эксплуатационных затрат и сроков выполнения работ [20].

В случае производственной необходимости ЛППР имеет возможность корректировать эксплуатационные показатели технологической системы с помощью изменения состава технологического комплекса машин или коррекции параметров технологического процесса, что позволяет организовать более гибкие и адаптивные методы управления производственной деятельностью природообустроительной организации [21, 22].

**Заключение.** В процессе разработки научно-методического подхода к проектированию и оптимизации эффективных технологических систем в природообустройстве (на примере реконструкции закрытой оросительной сети) получены следующие результаты:

- предложен комплексный методологический подход, позволяющий последовательно интегрировать этапы онтологического описания предметной области, формализации функционально-технологических связей и агентного

моделирования для задач проектирования технологических систем в природообустройстве;

- разработана оригинальная онтология блочных элементов технологических систем в области природообустройства, которая формализует не только статическую структуру (оборудование, ресурсы), но и динамические сценарии их взаимодействия с учетом вероятностного воздействия эксплуатационной среды, а также организационно-технологические ограничения;

- создана и апробирована адаптивная агентная модель, в которой активными элементами (агентами) выступают не только технические единицы (машины, оборудование, бригады), но и ключевые технологические процессы, воздействия системы производственно-технической эксплуатации и управляющие решения. Это позволило учесть ранее игнорируемые факторы, такие как вариабельность квалификации персонала, уровень технической эксплуатации, совершенство и техническое состояние средств механизации, характер отказов машин и оборудования, изменение погодных условий, непосредственно влияющее на логистику и графики работ;

- продемонстрирована эффективность предлагаемого подхода на реальном кейсе реконструкции напорного трубопровода закрытой оросительной системы, где инструментарий позволил не только симулировать различные сценарии функционирования технологической системы при рассмотрении различных структур и форм организации производства работ, но и выявить критические зависимости между

уровнем организационно-технологического обеспечения работ, составом технологического комплекса машин и совокупной производительностью всей технологической системы, предложив Парето-оптимальные (рациональные) решения.

Разработанный научно-методический подход призван обеспечить формирование рациональных, адаптивных и ресурсоэффективных структур технологических систем в условиях ограниченной статистической информации и высокой изменчивости эксплуатационной среды.

Комбинирование имитационного моделирования и агентных методов представляет собой достаточно мощный инструмент для разработки и эксплуатации эффективных технологических систем в области природообустройства. Такой подход способен обеспечить повышение надежности и эффективности технологической системы, а также способствует адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, что особенно актуально при ограниченных ресурсах и изношенном оборудовании.

#### *Список литературы*

1. Муравьева М. В., Глебов И. П. Экономические проблемы ресурсного обеспечения орошаемого земледелия России. Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023;(12):39–48. DOI: <https://doi.org/10.33938/2312-39> EDN: LKVMLN
2. Акупиан О. С., Заворотин Е. Ф., Здоровец Ю. И. Анализ государственного финансирования развития мелиоративного комплекса России: региональный аспект. Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023;(10(104)):69–77. DOI: <https://doi.org/10.33938/2310-69> EDN: HUKWA
3. Кодирова А. С. Цифровая трансформация сельского хозяйства: направления «зелёной революции» и управления отраслью. АПК: экономика, управление. 2024;(6):119–124. DOI: <https://doi.org/10.33305/246-119> EDN: BDUCFP
4. Горностаев В. И., Новиченко А. И., Подхвятилин И. М. Системный подход в исследовании технологических процессов в сфере механизации сельского хозяйства. Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящ. 150-летию А. В. Леонтовича. Москва, 03–06 июня 2019 года. М.: РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева, 2019. С. 494–496.
5. Подхвятилин И. М., Новиченко А. И., Горностаев В. И. Мультиагентное имитационное моделирование технологических систем в природообустройстве с учетом условий их эксплуатации. Доклады ТСХА: Международ. научн. конф., посвящ. 125-летию со дня рождения В. С. Немчинова, Москва, 03–05 декабря 2019 года. М.: РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. Вып. 292, Ч. I. С. 551–555.
6. Лобачевский Я. П., Миронов Д. А., Кислицкий М. М., Миронова А. В. Эффекты от применения цифровых двойников в сельском хозяйстве. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2023;(103):71–78. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-103-71-78> EDN: TLGOWG
7. Ламм А. К., Расулов Р. К. Обобщённая концепция технико-экономического обоснования разработки цифровых двойников в сельском хозяйстве. Экономика сельского хозяйства России. 2023;(11):74–79. DOI: <https://doi.org/10.32651/2311-74> EDN: ERLUCK
8. Шиловский В.Н., Скобцов И.Г., Конанов Д.Г. Оценка факторов эксплуатационной технологичности машин методом регрессионного анализа. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022;(240):163–174. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.163-174> EDN: NTALGN
9. Дидманидзе О. Н., Карелина М. Ю., Сидоров Б. Б. Методика управления возрастной структурой машино-тракторного парка на базе дискретных форм представления показателей ТО и ТР. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2024;16(1):95–100. DOI: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.82.94.013> EDN: GGSJJJ
10. Речинский А. В., Семенов К. К., Сушников В. А., Черненькая Л. В., Черненький А. В. Инструментальные средства систем имитационного моделирования. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024;(4):122–129. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-122-123> EDN: BIKWZS
11. Евграфов В. А., Новиченко А. И., Горностаев В. И., Подхвятилин И. М., Анисимов А. В. Применение мультиагентного подхода при формировании оптимального состава парка машин в среде имитационного моделирования AnyLogic. Научное обозрение. 2015;(24):123–127. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25602057> EDN: VOGMQZ
12. Акбердина В. В., Шориков А. Ф. Иерархическая агентно-ориентированная модель управления промышленным комплексом. Управление. 2022;13(6):2–14. DOI: <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1> EDN: WNQLUI
13. Принев М. А., Леденева Т. М., Гаршина В. В. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию. (Часть 2). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024;(4):167–190. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190> EDN: KJBPCG
14. Большаков В. Э., Сакулин С. А., Алфимцев А. Н. Мультиагентное обучение с подкреплением с использованием коллективной внутренней мотивации. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2023;(4(145)):61–85. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-61-84> EDN: WCRTDW

15. Листопад С. В., Кириков И. А. Анализ подходов к идентификации структуры проблемы в гибридных интеллектуальных многоагентных системах. Системы и средства информатики. 2024;34(3):35–47. DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527240304> EDN: RSLMXC
16. Словохотов Ю. Л., Новиков Д. А. Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 1. Основные характеристики и простейшие формы. Проблемы управления. 2023;(5):3–22. DOI: <https://doi.org/10.25728/ru.2023.5.1> EDN: CFQKJZ
17. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Россюшанская Е. А., Дорошенко Т. А., Самсонова Н. А. Проблемы стандартизации описания агент-ориентированных моделей и возможные пути их решения. Вестник Российской академии наук. 2023;93(4):362–372. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587323040059> EDN: SCIOKT
18. Бекетов С. М., Гинцяк А. М., Дергачев М. В. Алгоритм оценки сходимости стохастической Парето-оптимизации. Информационные технологии и вычислительные системы. 2024;(4):91–99. DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632240409> EDN: HBLXQQ
19. Демиденко О. М., Борчик Е. М., Якимов А. И. Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в процессе производства готовой продукции. Проблемы физики, математики и техники. 2022;(3(52)):90–96. DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2022\\_3\\_52\\_90](https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_90) EDN: HPJWKR
20. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. Записки Горного института. 2020;241:10–21. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10> EDN: EUEOIJ
21. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A survey. IEEE Access. 2018;6:28573–28593. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228>
22. Tsyplakov A. A., Melnikova L. V., Ibragimov N. I. Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences 2021;14(12):1910–1919. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869> EDN: HWZUDG

#### References

1. Muravyova M. V., Glebov I. P. Economic problems of resource supply for irrigated agriculture in Russia. *Ekonomika, trud, upravleniye v selskom khozyaystve*. 2023;(12):39–48. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33938/2312-39>
2. Akupiyan O. S., Zavorotin E. F., Zdorovets Yu. I. Analysis of state financing of Russian land reclamation complex development: regional aspect. *Ekonomika, trud, upravleniye v selskom khozyaystve*. 2023;(10(104)):69–77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33938/2310-69>
3. Kodirova A. S. Digital transformation of agriculture: directions of the "green revolution" and industry management. *APK: ekonomika, upravleniye*. 2024;(6):119–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33305/246-119>
4. Gornostayev V. I., Novichenko A. I., Podkhvatilin I. M. A systematic approach to the study of technological processes in the field of agricultural mechanization. Proceedings of the International scientific conference of young scientists and specialists, dedicated to 150th anniversary of A. V. Leontovich. Moscow, June 03-06, 2019. Moscow: *RGAU–MSKHA im. K. A. Timiryazeva*, 2019. pp. 494–496.
5. Podkhvatilin I. M., Novichenko A. I., Gornostayev V. I. Multi-agent simulation of technological systems in environmental management, taking into account their operating conditions. TLCA reports: International scientific conference, dedicated to 125th anniversary of V. S. Nemchinov, Moscow, December 03-05, 2019. Moscow: *RGAU – MSKHA im. K. A. Timiryazeva*, 2020. Iss. 292, Ch. I. pp. 551–555.
6. Lobachevsky Ya. P., Mironov D. A., Kislitsky M. M., Mironova A. V. Digital twins use effects in agriculture. *Trudi Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;(103):71–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-103-71-78>
7. Lamm A. K., Rasulov R. K. Generalized concept of feasibility study for the development of digital twins in agriculture. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii = Economics of Agriculture of Russia*. 2023;(11):74–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32651/2311-74>
8. Shilovsky V. N., Skobtsov I. G., Konanov D. G. Estimation of forest machine operational efficiency factors by regression analysis. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*. 2022;(240):163–174. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.163-174>
9. Didmanidze O. N., Karelina M. Yu., Sidorov B. B. Method of managing the age structure of the machine and tractor fleet based on discrete forms of representation of maintenance and tractor indicators. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kosticheva = Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev*. 2024;16(1):95–100. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.82.94.013>
10. Rechinskiy A. V., Semenov K. K., Sushnikov V. A., Chernenkaya L. V., Chernenkii A. V. Tools of simulation modeling systems. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*. 2024;(4):122–129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-122-123>
11. Evgrafov V. A., Novichenko A. I., Gornostaev V. I., Podkhvatilin I. M., Anisimov A. V. Usage of multiagent approach in forming the optimal composition of machine fleet in AnyLogic imitation modeling environment. *Nauchnoye obozreniye*. 2015;(24):123–127. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25602057>
12. Akberdina V. V., Shorikov A. F. Managing industrial complexes: a hierarchical agent-oriented model. *Upravlenets = The Manager*. 2022;13(6):2–14. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1>
13. Prinev M. A., Ledeneva T. M., Garshina V. V. Multi-agent systems: a review of modern approaches to modeling and projecting (Part 2). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemy analiz i informatsionniye tekhnologii*. 2024;(4):167–190. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190>

14. Bolshakov V. E., Sakulin S. A., Alfimtsev A. N. Multi-agent reinforcement learning using the collective intrinsic motivation. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Priborostroyeniye* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2023;(4(145)):61–85. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-61-84>
15. Listopad S. V., Kirikov I. A. Analysis of approaches to problem structure identification in hybrid intelligent multiagent systems. *Sistemi i sredstva informatiki* = Systems and Means of Informatics. 2024;34(3):35–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527240304>
16. Slovkhotov Yu. L., Novikov D. A. Distributed intelligence of multi-agent systems. Part 1: basic features and simple forms. *Problemi upravleniya*. 2023;(5):3–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25728/pu.2023.5.1>
17. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Rossoshanskaya E. A., Doroshenko T. A., Samsonova N. A. Problems of standardizing agent-based model description and possible ways to solve them. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023;93(4):362–372. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587323040059>
18. Beketov S. M., Gintsyak A. M., Dergachev M. V. Algorithm for estimating the convergence of stochastic pareto optimization. *Informatsionniye tekhnologii i vichislitelniye sistemi* = Information Technologies and Computing Systems. 2024;(4):91–99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632240409>
19. Demidenko O. M., Borchik E. M., Yakimov A. I. Multi-criterial optimization of resource distribution in the process of finished products. *Problemi fiziki, matematiki i tekhniki* = Problems of Physics, Mathematics and Technics. 2022;(3(52)):90–96. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2022\\_3\\_52\\_90](https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_90)
20. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute. 2020;241:10–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10>
21. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A survey. *IEEE Access*. 2018;6:28573–28593. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228>
22. Tsyplakov A. A., Melnikova L. V., Ibragimov N. I. Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences* 2021;14(12):1910–1919. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869> EDN: HWZUDG

**Вклад авторов:** все авторы статьи внесли значимый вклад в проведение научных исследований и подготовку материалов к публикации, который выражается в разработке общей концепции и формировании плана исследования (Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П., Новиченко А. И.), проведении анализа данных (Парлюк Е. П., Новиченко А. И.), подготовке структуры и смысловом наполнении рукописи (Дидманидзе О. Н., Новиченко А. И.).

#### **Сведения об авторах**

**Дидманидзе Отари Назирович**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: [info@rgau-msha.ru](mailto:info@rgau-msha.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

**Парлюк Екатерина Петровна**, доктор техн. наук, профессор кафедры колесных машин, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 105005, e-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0691-3487>

✉ **Новиченко Антон Игоревич**, кандидат техн. наук, доцент кафедры технического сервиса машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: [info@rgau-msha.ru](mailto:info@rgau-msha.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4834-7700>, e-mail: [novichenko@rgau-msha.ru](mailto:novichenko@rgau-msha.ru)

**Author contributions:** All authors made a significant contribution to the scientific research and preparation of materials for publication, which is expressed in the development of the general concept and the formation of the research plan (Didmanidze O. N., Parlyuk E. P., Novichenko A. I.), conducting data analysis (Parlyuk E. P., Novichenko A. I.), preparing the structure and semantic content of the manuscript (Didmanidze O. N., Novichenko A. I.).

#### **Information about the authors**

**Otari N. Didmanidze**, DSc in Engineering, professor, academician of RAS, Head of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: [info@rgau-msha.ru](mailto:info@rgau-msha.ru), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

**Ekaterina P. Parlyuk**, DSc in Engineering, professor at the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Baumanskaya st. 2-ya, 5, b. 1, Moscow, Russian Federation, 105005, e-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0691-3487>

✉ **Anton I. Novichenko**, PhD in Engineering, associate professor, the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: [info@rgau-msha.ru](mailto:info@rgau-msha.ru), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4834-7700>, e-mail: [novichenko@rgau-msha.ru](mailto:novichenko@rgau-msha.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author