

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры теоретической и математической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») Вирченко Юрия Петровича на диссертацию

Кузнецова Александра Владимировича

«Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов» по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Диссертация Кузнецова А.В. посвящена построению и численному анализу математических моделей, предназначенных для анализа эволюции в различных внешних условиях сложных систем, которые представляются в виде дискретных объектов, с целью разработки математически обоснованных методов принятия решений по влиянию на их движение и, частности, оптимальному управлению этими системами. Понятийный аппарат диссертации основан на теории агентов. Объектом исследования в диссертации являются системы, математические модели которых допускают представление в виде дискретных динамических систем, пространства состояний которых могут быть связаны с клеточными автоматами.

1. Актуальность темы диссертации. Теория многоагентных систем является развивающейся научной областью, которая используется для решения сложных прикладных задач, которые допускают декомпозицию на отдельные задачи. Разработка технологии математического моделирования на основе теоретических представлений теории агентов с целью практического применения является актуальной научно-технической проблемой, решение которой может повысить степень обоснованности решений, принимаемых по отношению к социальным, экономическим и техническим системам, улучшить качество и адекватность математических моделей процессов, связанных с движением дискретных объектов, в частности мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов и т.д.

2. Научная новизна. В результате проведенного исследования, в работе диссертанта получены следующие результаты, обладающие научной новизной.

1. Введено математическое понятие ландшафта для формализованного описания местности, по которой происходит движение агентов, и предложены методы генерации математических моделей случайных ландшафтов с заданными характеристиками.

2. Сконструирована математическая модель движения мобильных агентов в форме клеточного автомата с формализованным описанием среды на основе понятия

ландшафта, которая позволяет на единой основе разрабатывать алгоритмы поведения агентов в среде с препятствиями.

3. Разработан метод формализованного описания группового движения и конфликта системы агентов, соединенной с моделью системы связи.

4. Найдены зависимости характеристик движения агентов и ландшафтных метрик, предложена методика проведения экспериментов, позволяющих описывать закономерности движения агентов.

5. Построена непрерывная нелинейная модель движения агента по пересеченной местности, для которой поставлена задача оптимального управления с нелинейными дифференциальными ограничениями. Показано, что сконструированная модель, с точки зрения решения поставленной задачи об оптимальном управлении, является предельным случаем подходящей дискретной модели.

6. Описан математический механизм самоорганизации системы мобильных агентов, располагающих набором каналов связи, на основе обмена метками и поочередного сканирования каналов в несколько сетей связи.

7. Создана структура программного комплекса «Психоход», предназначенного для математического моделирования и анализа многоагентной системы.

8. Создан метод численного решения задач оптимального управления с нелинейными ограничениями, в которых функционал управления задан неявно, а также предложены способы для определения характеристик многоагентных систем на основе методов математической физики.

3. Обоснованность научных положений и рекомендаций. Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным применением апробированных математических методов, связанных с теорией графов и математической статистики; согласием полученных как теоретических результатов работы, так экспериментальных данных с опубликованными результатами других исследователей; положительными результатами проведенных экспериментов и опытом практической эксплуатации разработанной сети связи, что подтверждается актами о внедрении.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в развитии теории математического моделирования, связанного с движением взаимодействующих агентов, и разработке на основе развитых теоретических положений новых технологий моделирования. Практическое применение результатов диссертации возможно при разработке систем поддержки принятия решений для управления большими группами движущихся объектов, в частности, при управлении роботами, беспилотными летательными аппаратами, при моделировании трафика подвижных агентов, движущихся по местности с препятствиями.

4. Оценка диссертационной работы. В работе впервые приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение научной проблемы моделирования движения на основе клеточных автоматов группы мобильных агентов с учетом их взаимодействия, и поэтому можно считать, что она соответствует п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Соответствие паспорта специальности. Диссертация соответствует следую-

щим пунктам паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации».

Предлагаемые в диссертации методы построения и тестирования алгоритмов группового движения агентов с использованием наборов случайных ландшафтов с фиксированными характеристиками соответствует п.2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Основанный на модели клеточного автомата метод математического описания движения группы агентов по пересеченной местности с учетом их взаимного влияния и в условиях, когда такому движению препятствуют имеющиеся на этой местности случайным образом расположенные препятствия, соответствует п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Доказательство теоремы о том, что кратчайший по времени путь агента в виде ломаной, полученный с помощью клеточного автомата, является приближенным решением непрерывной оптимизационной задачи поиска кратчайшего по времени пути в области, в каждой точке которой задано ограничение на максимальный модуль скорости агента соответствует п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Оценка точности аппроксимации пути агента на местности, связанной с выбором величины размера клетки соответствует п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Построение клеточного автомата, моделирующего сеть связи движущихся по местности с препятствиями иерархически организованных агентов соответствует п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Разработка алгоритма автоматической организации сетей связи соответствует п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Создание программной среды «Психолод», в рамках которой были произведены исследования диссертации, соответствует п.5 «Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Общая характеристика работы. Диссертация общим объемом 268 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 157 наименований. Во *введении* сформулирована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, обоснована научная новизна, прак-

тическая и теоретическая значимость, представлены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

Основным объектом исследования диссертации является многоагентная система, которая приспособлена для математического моделирования поведения на местности с заданным количеством случайных препятствий разных типов сложно организованных групп агентов. В изучаемой в диссертации системе присутствуют несколько видов агентов и несколько типов взаимодействия.

В *первой главе* диссертации приведен обзор существующих работ по многоагентным системам, описывающий основные направления многоагентного моделирования, что дает представление о современном состоянии этого научного направления. В главе приводятся применения многоагентных систем, в особенности, таких которые функционируют в дискретном пространстве и времени.

Во *второй главе* строится формализованное описание предлагаемой автором многоагентной системы на основе представлений теории клеточных автоматов. При этом формализуются: создание ландшафтов и движения по нему, задание целей управления многоагентной системой, взаимодействие агентов. На этом пути вводится формализованное понятие ландшафта и рассматриваются способы генерации тестовых ландшафтов, исследуются различные числовые характеристики ландшафтов и их связи. Конструируется модель движения агента по пересеченной местности и описывается класс клеточных автоматов, моделирующих этот процесс. На основе таких автоматов строятся клеточные автоматы, описывающие коллективное движение взаимодействующих многих агентов, исследуются характеристики таких автоматов. Здесь выявлен ряд таких закономерностей коллективного поведения агентов, которые позволяют исследовать поведение системы агентов с помощью стандартных методов решения уравнений в частных производных для уравнений конвекции-диффузии. Вычислены функция плотности распределения времени прихода в конечную точку маршрута и функция плотности распределения отклонения координат маршрута от оптимального значения.

В *третьей главе* конструируется модель связи между агентами в многоагентной системе, а также моделируется процесс возникновения самоорганизации в такой составной системе. При этом возникает необходимость в формализации и решении задачи об автоматическом распределении частот в сложно организованной системе радиосвязи. Установлено, что задача самоорганизации в сети связи сводится к исследованию клеточного автомата Шеллинга, который возникает при моделировании процессов социального поведения.

В *четвертой главе* исследуется связь модели дискретного движения агента по пересеченной местности, реализованной в виде клеточного автомата и модели его непрерывного движения. На этом пути получены оценки дискретного приближения непрерывной траектории и доказаны теоремы существования решения. В этом случае сконструированный клеточный автомат, моделирующий движение агентов, может рассматриваться метод приближенного решения непрерывной оптимизационной задачи многоагентного поиска кратчайшего пути. На основе предложенного клеточного автомата построен алгоритм численного решения задачи о нахождении наибо-

лее быстро проходимого маршрута на основе приближения непрерывного гладкого маршрута агента посредством ломаной. При этом функции расположения препятствий моделируются ступенчатой функцией. Показано, что, при определенных условиях, полученные приближения сходятся к оптимальному маршруту.

В пятой главе описывается разработанная диссертантом программная среда «Психоход», применяемая для постановки вычислительных экспериментов, которые связаны с результатами диссертации. Результаты проведенных экспериментов полностью подтверждают теоретические положения диссертации.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленная диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно. Диссертация написана на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы, приводится сравнительная оценка с известными решениями. Диссертационная работа обладает внутренним единством, по каждой главе и работе в целом приводятся аргументированные выводы, достаточно полно представлена информация о рекомендациях использования результатов диссертационного исследования. Диссертация оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к оформлению текстов докторских диссертаций грамотно написана, аккуратно оформлена. Автореферат диссертации правильно отражает её содержание. Публикации автора, представленные в приложенном к основному тексту диссертации списке научных работ автора, отражают основное содержание диссертации.

Публикация основных результатов. Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 статьях в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, которые либо индексируются в базах данных Web of Science: Core Collection (6 работ), базе данных Scopus (1 работа), базах данных MathSciNet, zbMath (2 работы), либо в иных журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России (10 работ), а также в 13 докладах на международных конференциях. Получено два патента на изделия, реализующие алгоритмы, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Таким образом, работа соответствует пп.11-13 Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Характеристика источников результатов. В диссертационной работе и автореферате содержатся необходимые обязательные ссылки на источники заимствования. Таким образом, работа соответствует п.14 Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Замечания. Отмечая в целом высокий научный уровень проведенного исследования, результаты которого изложены в диссертационной работе, считаю необходимым сделать следующие замечания, связанные с имеющимися, по моему мнению, недостатками при оформлении диссертации и автореферата:

1. В главе 4, стр.199, при исследовании простейшего случая оптимизационной задачи, не приведено никаких конкретных примеров функции непроходимости u (плоскость, поверхность второго порядка, «шапочка»). У меня создалось впечатление, что такие конкретные примеры, хотя бы учебного характера, можно было легко бы разо-

брать в тексте диссертации.

2. Результаты, получаемые в главе 4, основаны на том, что функция непроходимости $u > \varepsilon > 0$. Возникает как это условие применять на практике, то есть из каких соображений нужно выбирать значение ε . Естественнее было считать, что функция непроходимости подчинена более слабому условию $u > 0$ и проводить исследования при таком ограничении. При этом, возможно, придется выбирать область определения функции u с подходящим образом вырезанными участками, где $u = 0$. Однако, этот вопрос в диссертации не рассматривается.

3. В тексте встречаются непоследовательность в применяемых обозначениях при изложении материала. Например, на стр. 113 вероятность обозначается посредством буквы \mathbb{P} ажурного шрифта, а на стр. 194 – посредством буквы жирного шрифта \mathbb{P} . Иногда агенты обозначаются как ag посредством шрифта «италик», а иногда как посредством шрифта «жирный италик» ***ag***.

4. В разделе 2.7 на стр.122, где исследуется модель конвекции-диффузии для числа агентов естественно было бы дать вывод уравнения на основе понятия конфликта агентов, используя более модель более высокого уровня, описывающую динамику системы в терминах среднего числа агентов.

5. Несколько непривычным является структурирование математической части текста диссертации. А именно, желательно было отделить друг от друга рассуждения, которые составляют построения каких-то математических конструкций или которые носят идеологический характер, от чисто математических доказательств и вычислений. Желательно также было сделать более четкими с математической точки зрения даваемые автором определения понятий. Так, например, Определение 7 такого важного для автора понятия, как понятие *ландшафта*, данное на стр. 59 в тексте диссертации, или его же Определение 3 в тексте автореферата диссертации страдает некоторой неопределенностью.

Высказанные по диссертационной работе замечания носят рекомендательный характер и не снижают ее научной ценности и практической значимости.

Наконец, отмечу недостатки оформления текста диссертации, которые не связаны с ее научной значимостью.

1. Так, при оформлении оглавления диссертации только одна строчка переместилась на стр.6, которая оказалась, таким образом, практически пустой.

2. Имеются страницы, в которых формулы значительно вышли за установленные для текста поля. Таковыми являются стр. 79, 82, 87, 107, 125 и т.д., порядка десятка страниц имеют указанный недостаток.

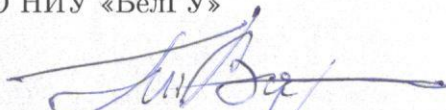
3. Отмечу недостаточно высокое качество рисунков 3.16, 3.17.

Однако, все отмеченные недостатки, в совокупности, не влияют как на общую положительную оценку диссертации в целом, так и на достоверность полученных в ней результатов. Таким образом, работа соответствует п.10 Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Считаю, что диссертационная работа Кузнецова Александра Владимировича «Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов» на соискание ученой степени доктора

физико-математических наук отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, согласно разделу II Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации».

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры теоретической и математической физики
ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ»



Ю.П. Вирченко

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Контактная информация:
308015, Россия, Белгород,
ул. Победы, 85,
корп. 17, к.4-24
тел.: (4722) 30-18-29
E-mail: virch@bsu.edu.ru

«21» августа 2019

Личную подпись
удостоверяю
Документовед
управления
по развитию
персонала и
кадровой работе

Вирченко
21

