

На правах рукописи



Карсаков Андрей Сергеевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА
ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ
МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в образовании)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: д.т.н.
Бухановский Александр Валерьевич

Официальные оппоненты: **Клименко Станислав Владимирович**
д.ф.-м.н., профессор
Институт физико-технической информатики,
Протвино, генеральный директор

Абрамян Михаил Эдуардович
к. ф.-м.н., доцент
кафедра алгебры и дискретной математики
Южного федерального университета, Ростов-
на-Дону, доцент

Ведущая организация: Институт прикладной математики им.
М.В. Келдыша Российской Академии Наук,
Москва

Защита состоится 26 декабря 2016 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.06 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, конференц-зал ЦИО.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, а также на сайте http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=175180

Автореферат разослан « 15 » ноября 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Холодова С.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью повышения безопасности крупных массовых мероприятий (ММ), в которых могут одновременно участвовать от десятков тысяч до нескольких миллионов человек. К таким мероприятиям относятся, например, государственные праздники, спортивные турниры международного уровня, а также религиозные празднования. Часто крупные ММ носят разовый характер, а большая доля их персонала представлена волонтерами, не имеющими специальных навыков и не знакомыми с местом и инфраструктурой мероприятия. Потому возможности использования ретроспективного опыта проведения аналогичных ММ для обучения волонтеров ограничены, а проведение обучения во время мероприятия нецелесообразно в силу непродолжительного характера ММ. Возможным решением данной проблемы является автоматизация процессов обучения волонтеров с использованием специальных тренажерных систем. В России это направление успешно продвигается научными школами С.В. Клименко, В.А. Галактионова, Сергеева С.Ф., Горбунова А.Л., Даниловой С.К., Борисова В.Г., Федорищева Л.А., Чинакал В.О., Нагаевой И.А., Грибовой В.В. и др. исследователей. Однако существующие в данной области решения ориентированы в основном на индивидуальную навигацию в сложных условиях, они не отражают специфику коллективного поведения самих участников ММ. Как следствие, необходимо развивать новые технологии автоматизации обучения персонала ММ, позволяющие правдоподобно воссоздавать реальные условия еще до начала самого мероприятия с целью освоения волонтерами практических компетенций, связанных с навигацией и управлением движением больших скоплений людей, что и определяет актуальность исследования.

Предметом исследования являются модели, методы, алгоритмы и программные средства автоматизации обучения персонала ММ.

Целью исследования является разработка моделей, методов и средств автоматизации процессов обучения персонала ММ на основе технологий виртуальной реальности и компьютерного моделирования движения больших скоплений людей.

Задачи исследования:

- обоснование требований к средствам автоматизации процессов обучения персонала ММ с использованием технологий виртуальной реальности;
- разработка модели обучения, которая позволяет заблаговременно (до начала мероприятия) вырабатывать у персонала компетенции, связанные с ориентацией в условиях проведения ММ, эффективными перемещениями в плотной толпе и управлением ее движением;
- разработка инфраструктурного обеспечения процесса обучения, включая технологии "погружения" обучаемого в мультиагентную (МА) модель движения больших скоплений людей (с возможностью воздействия на

ситуацию), а также технологии виртуальной реальности для отображения ситуации;

- проектирование и разработка инструментальной среды для построения сценариев обучения, что обеспечит унификацию разработанных решений для широкого диапазона ММ;
- экспериментальное исследование разработанной технологии "погружения" обучаемого в МА-модель движения больших скоплений людей (с возможностью воздействия на ситуацию) и оценка ее применимости для обучения персонала различных ММ.

Методы исследования включают в себя методы научной визуализации и виртуальной реальности, МА-моделирования, инженерии программного обеспечения, управления базами данных, математической статистики и теории планирования эксперимента.

Научная новизна обусловлена моделью обучения персонала ММ (включая волонтеров) с применением технологий виртуальной реальности и мультиагентного моделирования движения больших скоплений людей, которая позволяет заблаговременно (до начала мероприятия) вырабатывать у обучаемых компетенции, связанные с ориентацией в условиях проведения массовых мероприятий, эффективными перемещениями в плотной толпе и управлением движением толпы.

Практическую значимость работы определяют:

- программная реализация модели обучения в форме инструментальной среды, позволяющей конструировать обучающие системы для различных ММ;
- прикладные обучающие системы, созданные на основе инструментальной среды, для разовых ММ, не обеспеченных ретроспективным опытом, включая фестиваль ВКонтакте (Санкт-Петербург) и религиозный праздник Кумбха-Мела (Удджайн, Индия).

На защиту выносятся:

- модель обучения персонала ММ, обеспечивающая интерактивное погружение обучаемых в среду проведения ММ с возможностью скоординированного воздействия на движение больших скоплений людей в целях предотвращения критических ситуаций;
- информационная технология быстрой разработки коллаборативных обучающих систем для персонала различных ММ.

Достоверность научных результатов и выводов определяется корректностью формальных моделей, используемых для автоматизации процесса обучения, возможностью настройки моделей по мере накопления данных эксплуатации системы во время ММ, разнообразием и полнотой проведенных экспериментальных исследований.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении работ по следующим крупным научно-исследовательским проектам: «Методы и технологии моделирования процессов большого города на основе данных индивидуальной мобильности

населения» ТЗ №715784 от 20.04.2015 г., «Информационные технологии поддержки принятия решений по обеспечению комплексной безопасности сверхбольших территориально распределенных массовых мероприятий» Соглашение №14.584.21.0015 от 11.11.2015 г., «Технологии распределенных облачных вычислений для моделирования процессов большого города» Договор № НК 15-29-07034\16 от 19.04.2016 г.; при подготовке интерактивной зоны для научного парка образовательного центра "Сириус" в рамках соглашения о сотрудничестве между Образовательным фондом "Талант и успех" и Университетом ИТМО от 04 мая 2016 г. № 201616; в ходе проведения фестиваля ВКонтакте "VKFEST 2016" в рамках интеллектуального партнерства между Университетом ИТМО и программным комитетом фестиваля.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований представлялись на следующих международных научных конференциях: International Conference on Computational Science (Кэрнс, Австралия, 2014; Рейкьявик, Исландия, 2015; Сан-Диего, США, 2016); International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Астана, Казахстан, 2014); 9th International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems (Лимассол, Кипр, 2014); International Multidisciplinary Scientific GeoConferenc (Албена, Болгария, 2014); Young Science Conference (Афины, Греция, 2015); European Conference on Games-based Learning (Норвегия, 2015); Eurographics (Лиссабон, Португалия, 2016).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 14 – в изданиях из перечня ВАК РФ, а также Web of Science и Scopus, получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в: разработке и специфицировании требований к обучению персонала массовых мероприятий, разработке модели обучения, адаптации методов моделирования динамики толпы для использования в рамках модели обучения, разработке архитектуры программного средства, дизайне интерфейсов человеко-компьютерного взаимодействия, программной реализации ключевых модулей программного средства, постановке и проведении экспериментальных исследований, апробации разработанных решений на краткосрочных и долгосрочных массовых мероприятиях, оценке и обобщении результатов исследований. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, которые соответствуют личному участию автора.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (87 источников) и приложения. Содержит 97 с. текста, включая 31 рисунок и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, описаны положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу предметной области. Рассмотрена классификация ММ, риски, связанные с их проведением, а также существующие решения по обеспечению безопасности участников при подготовке и проведении ММ. В настоящее время однозначной трактовки понятия массовости для ММ не существует, и в различных источниках нижняя граница числа участников варьирует от 1 до 25 тыс. человек. Всемирная организация здравоохранения разделяет ММ на спонтанные и спланированные, в других источниках ММ также классифицируют по цели проведения, геофизическим свойствам местности, по числу участников, по уровню используемых ресурсов и времени, которое занимают предварительное планирование и подготовка. Для всех классов ММ наиболее острой является проблема возникновения давки, среди основных причин которой выделяют: стремление людей как можно скорее попасть в то или иное место, конкуренцию за свободное пространство или бесплатные ресурсы, глобальное распространение новой информации о мероприятии (включая дезинформацию и слухи), панику, в том числе из-за чрезвычайных ситуаций, а также окончание мероприятия. Для крупных ММ масштабом от сотен тысяч до нескольких миллионов человек используются информационные системы, осуществляющие частичный мониторинг и визуализацию ситуации для поддержки принятия решений по управлению мероприятием в «ручном режиме» средствами персонала мероприятия, большую часть из которых традиционно выполняют волонтеры. Важным элементом мотивации волонтеров является получение нового опыта в ходе подготовки и выполнения своих обязательств. Для работы в рамках ММ волонтеров обычно инструктируют и(или) тренируют в идеализированных условиях; однако обеспечить их полноценное обучение действиям в реальных ситуациях сложно из-за уникальности – разового характера – ММ. Как следствие, для воспроизведения условий, приближенных к реальным, необходимо использовать методы компьютерного моделирования больших скоплений людей. В целом программные решения для обучения персонала ММ на основе компьютерного моделирования делятся на две значимые группы. Первая группа (MassMotion, Legion, CrowdSim и др.) полезна на этапе инструктирования: она в основном ориентирована на воспроизведение возможных вариантов процессов эвакуации, в том числе интерактивно управляя толпой в «режиме бога» посредством виртуальных подчиненных (система Crowd Control Trainer компании VStep). Вторая группа включает ряд тренажеров (преимущественно военных – DARWARS, VBS и др.), с использованием игровых технологий и методов геймификации, для коллаборативной подготовки персонала, действующего на местности, однако

без взаимодействия с большими скоплениями людей. Проведенный анализ демонстрирует отсутствие решений, обеспечивающих обучение волонтеров взаимодействию с лицами, принимающими решения по управлению ММ, особенно в экстремальных ситуациях. Это обуславливает необходимость развития технологий автоматизации процессов обучения, позволяющих создать виртуальную среду, отражающую специфику реального мероприятия, и в игровой форме обеспечить погружение в нее как обучаемых, так и обучающего.

Во **второй главе** описана общая постановка задачи исходя из требований, предъявляемых к перспективным обучающим системам персонала ММ, основанным на использовании технологий виртуальной реальности и компьютерного моделирования. Сформулирована методическая составляющая (модель) обучения персонала ММ, предполагающая наличие соответствующей информационной технологии. Описан применяемый математический аппарат мультиагентного (МА) моделирования больших скоплений людей в ходе мероприятия, реализующий механизмы воздействия на движение индивидов путем динамического изменения условий движения. Приведены способы оценки результатов обучения на основе сравнения с эталонными решениями.

На рис. 1 представлена общая информационная модель ММ, связывающая все основные сущности в рамках интерактивного МА-подхода.

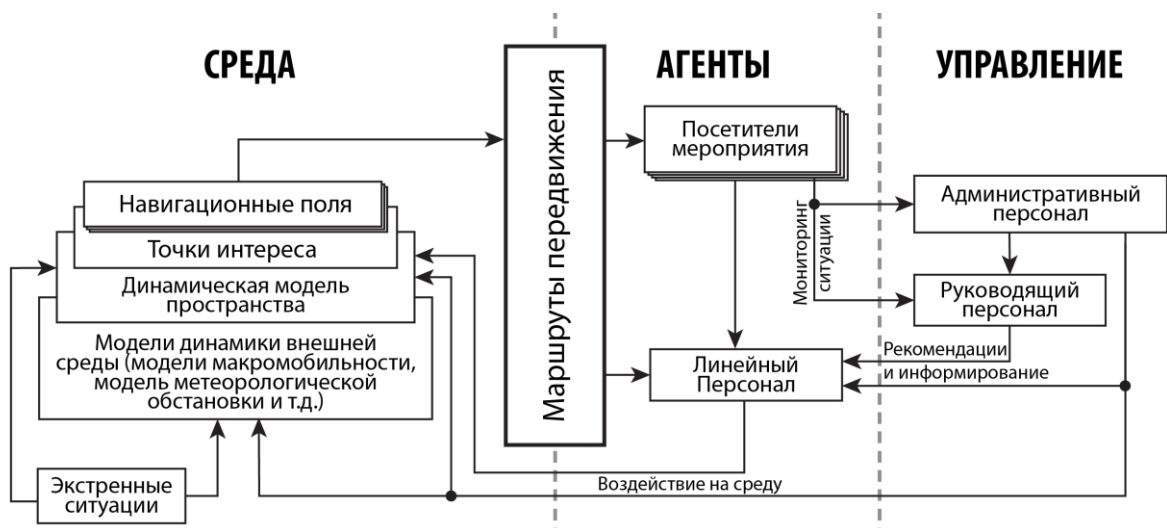


Рисунок 1 – Информационная модель массового мероприятия

В рамках информационной модели агент-посетитель ММ представлен как нематериальное тело; он описывается кортежем $A = \{(x, y, k), P, M(ROI_i^{in}, ROI_j^{out})\}$, где (x, y, k) – координаты агента; k – номер этажа, на котором находится агент (может быть нулевым в случае одноуровневого мероприятия); P – уникальные свойства агента: возраст, пол, физические характеристики; M – функция, определяющая путь агента между начальной и конечной точками интереса (места паломничества, определенные стенды и т.п.). Путь может динамически меняться в зависимости от внешних условий, в том числе по указанию персонала ММ. При этом все агенты обладают

сенсорами реакции на информирование участников мероприятия, реакции на толпу и реакции на возникновение опасности. Помимо агентов, представляющих участников ММ, используется агент типа «персонал», имеющий схожее с агентом-посетителем визуальное представление в виртуальном пространстве, однако управление им передано напрямую обучаемому. Выделено три основные роли (уровня иерархии) персонала: административный (лица, принимающие решения, представители организаторов мероприятия); руководители (подразделений служб безопасности и волонтерских отрядов); исполнители (рядовые представители служб безопасности, волонтеры).

На рис. 2 представлена общая информационная модель обучения, включающая в себя все основные сущности и процессы, составляющие процедуру обучения всех уровней иерархии персонала ММ. Организатор ММ составляет план текущего мероприятия, по которому формулируются сценарии обучения и настраивается сама обучающая система. В настройку входит: создание модели места проведения ММ, сценариев перемещения посетителей и других сопроводительных данных для моделирования мероприятия, всей сопроводительной информации относительно места и самого ММ. Согласно плану мероприятия составляются инструкции для персонала. Согласно составленным документам проводится инструктаж обучающихся, после чего они приступают к отработке сценариев на обучающей системе. При отработке сценариев в системе производится МА-моделирование с сохранением данных о ходе выполнения сценария. На основании сохраненных данных оцениваются результаты обучения персонала, принимается решение о расположении персонала во время ММ, а также определяется необходимость дополнительного инструктирования.

Обучение может проводиться как для каждой роли по отдельности, так и для всех трех одновременно. При этом действует иерархический принцип коллаборативного взаимодействия между персоналом:

- администрация обеспечивает общий контроль за ситуацией на всей территории ММ (в том числе за макропараметрами) и имеет возможности глобального воздействия на среду обучения (изменять внешние условия, ограничивать входы/выходы и т.д.) и выдачи рекомендаций и указаний руководителям;
- руководители обеспечивают контроль за вверенной им территорией (здание, площадь и т.д.), получают указания и рекомендации от администрации и могут воздействовать на среду только непрямым способом – через указания к действиям исполнителям «на месте»;
- исполнители находятся «на местах», управляя агентами-персоналом, получают рекомендации и указания к действиям внутри среды от руководителей/администрации и реагируют на возникающие ситуации самостоятельно.

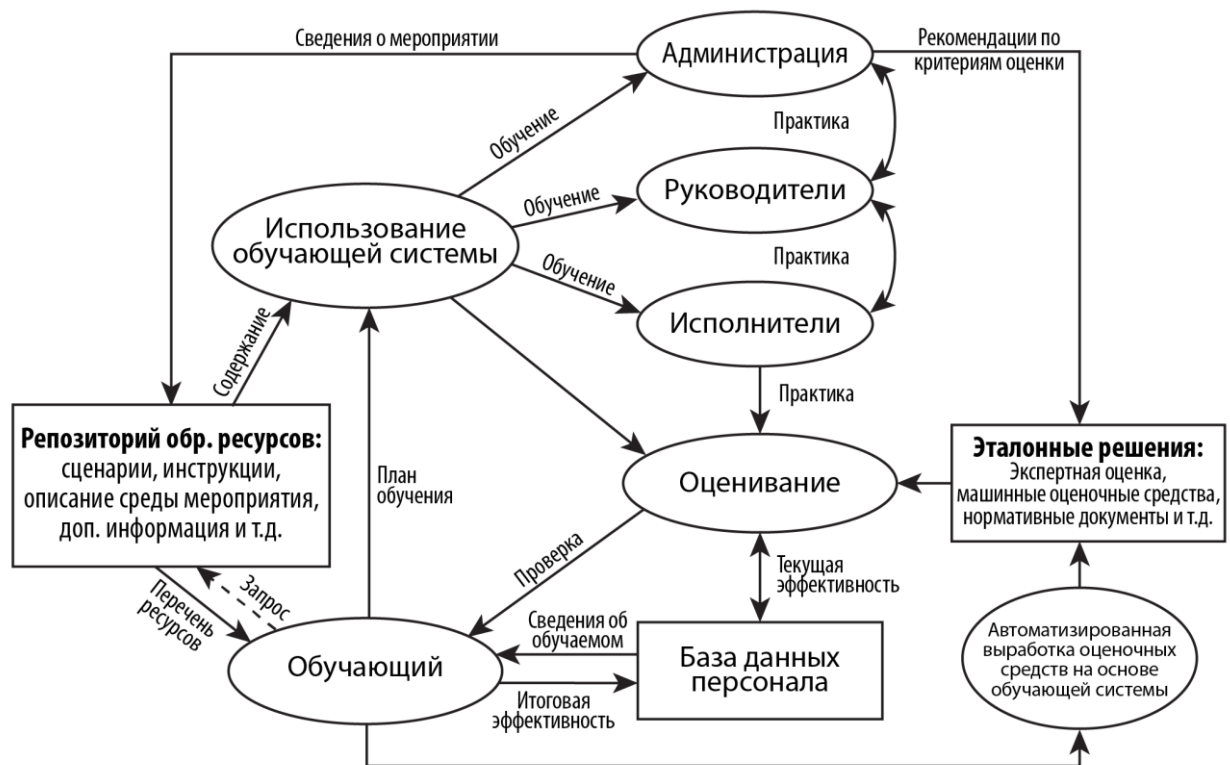


Рисунок 2 – Общая информационная модель обучения персонала ММ

До проведения тренировки персонала ММ обучаемые должны обладать базовыми компетенциями: знать тематику мероприятия, его целевую аудиторию и временные рамки. Эта информация может быть получена через инструктаж либо из раздаточных материалов. В табл. 1 приведена компетентностная модель обучения персонала ММ (рис. 2):

- (К-1) Способен осуществлять коммуникацию на языке собеседника,
- (К-2) Способен осуществлять коммуникацию с незнакомыми людьми,
- (К-3) Способен читать схемы,
- (К-4) Способен находить запрашиваемый объект,
- (К-5) Способен четко формулировать задачи для исполнителей на ММ,
- (К-6) Способен прогнозировать наступление критических ситуаций, связанных с движением больших толп людей,
- (К-7) Способен дать краткую инструкцию по пути к месту следования,
- (К-8) Способен анализировать информацию на месте и выдавать общее заключение для вышестоящего персонала,
- (К-9) Способен принимать решение по управлению толпой с учетом возможных последствий,
- (К-10) Способен формировать задачи для других членов коллектива с учетом имеющихся у них возможностей управления толпой,
- (К-11) Способен осуществлять управление группой лиц за счет личного примера или целеуказания,
- (К-12) Способен планировать мероприятия по управлению толпой на месте,

- (К-13) Способен оптимизировать процессы по управлению толпой на месте,
- (К-14) Способен ориентироваться на месте проведения ММ.

Таблица 1 – Компетентностная модель обучения персонала ММ

Уровень персонала ММ	Компетенции		
	базовые	приобретаемые	целевые
Исполнитель	К-1, К-2	К-3, К-4	К-9, К-6, К-7, К-8, К-14
Руководитель	К-11	К-8, К-9, К-10	К-5, К-7, К-9
Администратор	К-11, К-12	К-6, К-13	К-3, К-5, К-9, К-10

Для имитации поведения толпы выбрана МА-модель на основе социальных сил (social force). В ней скорости $\vec{v}_i$ перемещения каждого i -го агента в пространстве вычисляются с использованием уравнения:

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_i(t) + \vec{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\vec{\varepsilon}$ – случайное отклонение, связанное с неоднородностью поведения агентов, а $\vec{F}_i$ – результирующая сила, действующая на i -го индивида:

$$\vec{F}_i(t) = \frac{v_0 \vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau} + \sum_j \vec{F}_{ij}(\vec{e}_i, \vec{r}_i - \vec{r}_j) + \sum_n \vec{F}_{in}(\vec{e}_i, \vec{r}_i - \vec{r}_n^i), \quad (2)$$

$\vec{e}_i$ – желаемое направление движения агента, первое слагаемое отвечает за собственное ускорение агента, $\vec{F}_{ij}$ – сила отталкивания между агентами i и j , $\vec{F}_{in}$ – сила отталкивания между агентом i и препятствием n . Если на пути следования интересующего агента отсутствуют какие-либо препятствия, то он перемещается в направлении к цели $\vec{e}_i(t)$ со скоростью $\vec{v}_0$. Различие между реальной $\vec{v}_i(t)$ и оптимальной $v_0 \vec{e}_i(t)$ скоростью, обусловленное необходимостью изменения скорости или коррекции маршрута из-за помех, сводится к появлению ненулевого времени релаксации τ . Отталкивание агентов описывается следующим выражением:

$$\vec{F}_{ij}(\vec{e}_i, \vec{r}_i - \vec{r}_j) = -\omega(\vec{e}_i, -\vec{f}_{ij}) \vec{\nabla}_{\vec{r}_{ij}} V_{ij}(b(\vec{r}_{ij})), \quad (3)$$

где

$$\omega(\vec{e}_i, -\vec{f}_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \vec{e}_i \vec{f}_{ij} \leq |\vec{f}_{ij}| \cos \varphi, \end{cases} \quad (4)$$

c – коэффициент влияния, $c \in (0; 1)$. Второй множитель – потенциал влияния – представлен в следующем виде:

$$\vec{\nabla}_{\vec{r}_{ij}} V_{ij}(b(\vec{r}_{ij})) = A \exp\left(-\frac{b(\vec{r}_{ij})}{B}\right) \frac{|\vec{r}_{ij}| + |\vec{r}_{ij} - \vec{y}_{ij}|}{4b(\vec{r}_{ij})} \left(\frac{\vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|} + \frac{\vec{r}_{ij} - \vec{y}_{ij}}{|\vec{r}_{ij} - \vec{y}_{ij}|} \right), \quad (5)$$

$\vec{y}_{kj} = v_k \vec{e}_k \Delta t$, а b определяется выражением

$$b(\vec{r}_{kj}) = \frac{1}{2} \sqrt{(|\vec{r}_{kj}| + |\vec{r}_{kj} - v_k \vec{e}_k \Delta t|)^2 - (v_j \Delta t)^2}. \quad (6)$$

Отталкивание между агентом i и ближайшей точкой n препятствия вычисляется аналогично взаимодействию между агентами в предположении, что препятствие неподвижно и $v_n = 0$ и $\vec{e}_n = \vec{0}$.

Для построения маршрутов движения агентов использован механизм навигационных полей, поскольку пересчет пути агентов на каждом шаге не

нужен. Навигационные поля представляют собой регулярную сетку, хранящую значения векторов направления движения в каждой ячейке до точек интереса (ТИ), в данной работе используется индивидуальное навигационное поле для каждой ТИ. Если возникают новые ТИ (например, за счет реализации компетенции К-7), или планируемый маршрут невозможен (в силу реализаций компетенций К-11), то навигационные поля пересчитываются полностью.

Использование модели (1)–(6) совместно с механизмом навигационных полей обеспечивает воспроизведение среды, в которой обучаемый может выполнять различные связанные с навигацией по местности и управлением толпой действия, направленные на приобретение компетенций (К-3, К-4, К-6, К-8, К-9, К-10, К-13). При оценке результатов обучения принимаемые решения сопоставляются (качественно и количественно) с эталонными решениями, выработанными экспертно и сформулированными администрацией. Такой подход имеет как достоинства (он соответствует ожиданиям администрации), так и недостатки (руководитель не всегда может предложить оптимальное решение). Поэтому дальнейшим развитием данного направления должно быть использование эталонных решений, сгенерированных на основе оптимизации самих модельных сценариев.

В третьей главе рассматривается общая архитектура инструментального средства для разработки обучающих систем, обоснован выбор технических решений для реализации инструментальной среды, дано подробное описание технической реализации ключевых особенностей конечных систем, включая использование технологий виртуальной реальности.

В рамках создания инструментальной среды были разработаны следующие программные модули, в целом позволяющие строить различные поведенческие сценарии: сборщик данных из внешних источников; управляющий серверный элемент, отвечающий за моделирование процесса; распределенная система визуализация результатов моделирования. Общая архитектура инструментальной среды (рис. 3) содержит следующие основные элементы: система визуализации, конфигуратор сценариев, подсистема моделирования, подсистема оценки, база знаний, система предобработки данных, база данных, система сбора данных и внешние источники данных.

Обучающее приложение на основе этой архитектуры может работать в трех режимах: демонстрация (воспроизведение типовых сценариев для ознакомительного просмотра), обучение (воспроизведение сценариев с интерактивным взаимодействием с системой для приобретения новых компетенций) и тренировка (отработка и закрепление приобретенных компетенций).

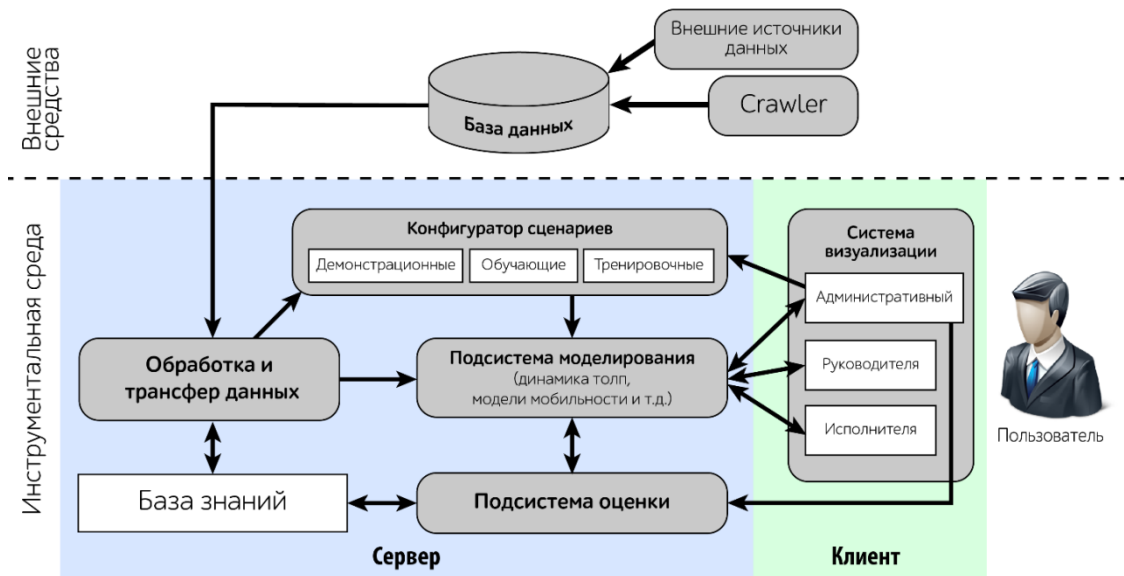


Рисунок 3 – Общая архитектура инструментальной среды для создания средств автоматизации процесса обучения персонала при подготовке и проведении ММ

Реализация модели (1)–(6) выполнена на основе фреймворка моделирования городского пространства PULSE¹ (Pulse Urban Life Simulation Environment). Данный фреймворк позволяет воспроизводить динамику толпы, используя различные поведенческие модели. Для создания системы визуализации использован графический движок Fusion Engine², интегрированный с платформой PULSE «из коробки» и поддерживающий множество необходимых технологических возможностей: современное графическое API DirectX11; встроенный ГИС-инструментарий; гибкое подключение новых устройств ввода-вывода; расширяемость программными модулями; гибкие инструменты создания пользовательского интерфейса; поддержка различных режимов 3D- (стерео-) визуализации.

На основе выбранных технических средств разработано три типа клиентских приложений, соответствующих ролям обучающихся: административный клиент, рекомендательный клиент, а также клиент виртуальной реальности (КВР). Административный клиент предназначен для мониторинга и управления процессом моделирования в рамках воспроизводимого сценария поведения агентов. В момент установки соединения с сервером клиент получает информацию о местоположении агентов в пространстве и характеристики МА-модели. Для управления МА-моделью у административного клиента есть доступ к набору инструментов на сервере, позволяющих регулировать параметры модели (например, поток агентов, силу их взаимодействия между собой и т.д.). Несколько клиентов данного типа одновременно могут взаимодействовать с сервером и наблюдать за происходящим. Функциональность рекомендательного клиента схожа с функциональностью административного, но первый не может

^{1,2} Разработано и эксплуатируется научной школой, к которой принадлежит диссертант

непосредственно влиять на среду и объекты моделирования. С помощью этого клиента можно только наблюдать за ходом сценария во вверенной области, выдавать рекомендации и указания к действию исполнителям «на местах» посредством передачи рекомендательного сообщения на сервер, откуда оно рассылается всем подключенным клиентам. КВР предназначен для обучения исполнителей «на местах» и представляет собой систему, с помощью которой пользователь может погрузиться в виртуальный мир (при наличии гарнитуры виртуальной реальности), чтобы ознакомиться с территорией, на которой будет происходить мероприятие, и обрабатывать указания рекомендательных и административных клиентов.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований решений, представленных в главе 3, а также рассматриваются различные прикладные задачи, связанные с использованием разработанной технологии обучения. Экспериментально определяются границы применимости разработанного программного средства для ММ различного масштаба.

В ходе экспериментальных исследований анализировались три характеристики инструментальной среды и конечных обучающих систем: ресурсоемкость задач моделирования ММ; масштабируемость системы визуализации при увеличении числа агентов; реактивность конечной системы при визуализации высоконагруженной задачи. При оценке ресурсоемкости МА-моделирования ММ было установлено, что ограничением для практического использования системы является размер толпы порядка 25 тыс. человек. Однако на практике сверхбольшие мероприятия допускают декомпозицию на отдельные сектора, каждый из которых является зоной ответственности выделенных групп волонтеров. Таким образом, поведение толпы в этом случае можно моделировать параллельно и объединять в логике многомасштабного подхода.

Для анализа масштабируемости системы работы с КВР была рассмотрена задача визуализации моделирования поведения толпы. Определялось, сколько агентов система может отобразить в пределах видимости обучаемого.

В качестве главного показателя производительности используется число кадров в секунду (FPS). Для моновизуализации удовлетворительным считается 24 FPS, для стереовизуализации (при использовании гарнитуры виртуальной реальности) минимальным показателем является 45 FPS. Технические характеристики испытательного стенда: Intel Core i7-3930K, 32.0 Гб RAM, NVidia GeForce GTX1070, Oculus Rift CV1 (для стереорежима).

Как видно из табл. 2, на указанном аппаратном обеспечении в стереорежиме система может визуализировать максимум 2500 агентов, при этом выводимое изображение не будет вызывать чувство дискомфорта у пользователя. Для монорежима максимальное количество агентов – порядка 10 000.

Таблица 2 – Зависимость производительности системы визуализации при МА-моделировании от числа агентов, находящихся в кадре

Характеристика, FPS	Число агентов в кадре					
	700	1500	2500	6400	10000	12100
Стерео	90	63	45	30	22	18
Моно	114	89	69	39	27	23

Также был проведен эксперимент по определению реактивности системы визуализации в стереорежиме путем измерений временного интервала между действием пользователя (вращением головой) и реакцией системы на это действие. Задержка реакции системы (ЗРС) визуализации складывается из задержек различных программных и аппаратных компонентов: сенсор Oculus Rift, определяющий положение очков Oculus; USB-провода и USB-порты; драйвер Oculus Rift; программный компонент системы визуализации; драйвер видеокарты. Измерения ЗРС проводились с помощью записи видео на высокоскоростную камеру GoPro Hero4 при параметрах 1280x720p на скорости 240 FPS, что позволило замерить ЗРС с погрешностью 4.167 мс. Всего было выполнено две серии замеров с различной частотой обновления системы визуализации при 90 и 45 FPS. По результатам эксперимента ЗРС в первом случае составила $\approx(0,033-0,046)\pm 0,004$ с, во втором – $\approx(0,038-0,063)\pm 0,004$ с.

С целью оценки эффективности использования обучающей системы для подготовки персонала к работе на незнакомой территории было проведено экспериментальное исследование в рамках Дня открытых дверей Университета ИТМО. Для этого была создана обучающая система на основе разработанной инструментальной среды; она развернута на интерактивном стенде, функционировавшем во время мероприятия. Задание для участников состояло в поиске за кратчайшее время пути до двух контрольных точек (аудиторий). Участники были распределены по трем группам: хорошо знакомые со зданием; малознакомые/не знакомые со зданием и проходящие обучение на разработанной системе; малознакомые/не знакомые со зданием и прошедшие типовое инструктирование (контрольная группа). Каждый участник проходил по зданию произвольным образом от начальной до конечной точки. Время прохождения фиксировалось с помощью секундомера, учитывалось время достижения обеих контрольных точек. По окончании эксперимента участникам предлагалось пройти анкетирование, касающееся как программного средства, так и пройденного маршрута. На рис. 4 проиллюстрированы примеры проведения обучения и инструктирования с помощью разработанной обучающей системы.



Рисунок 4 – Обучение (а) и инструктирование (б) участника экспериментального исследования посредством обучающей системы

Результаты эксперимента показали, что участники, прошедшие обучение, взаимодействуют со средой и ориентируются в окружающей обстановке со скоростью, сравнимой со скоростью людей, не один год знакомых с территорией. 44 % участников, прошедших обучение, показали время, соответствующее времени группы людей, досконально знающих особенности здания (рис. 5).

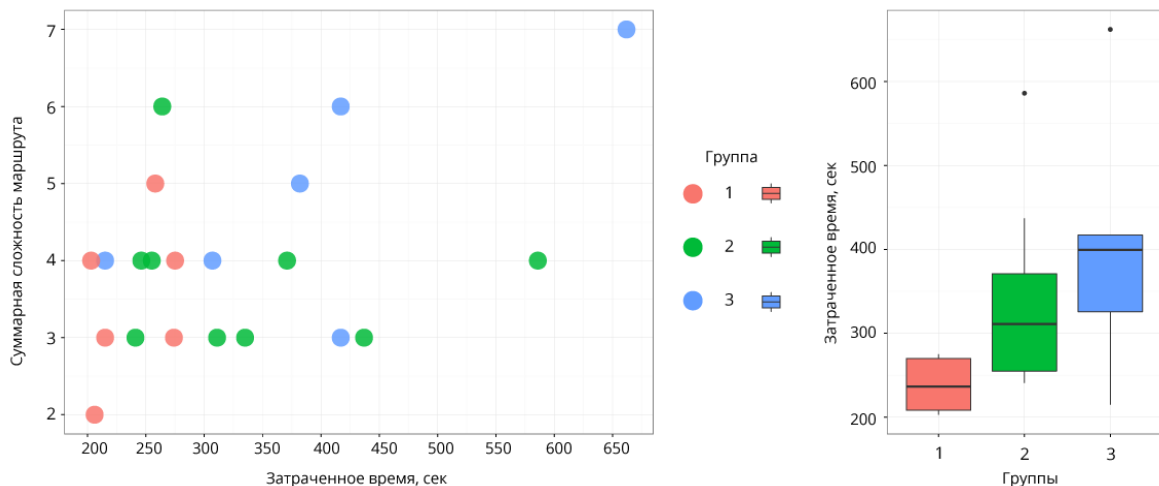


Рисунок 5 – Зависимость времени прохождения и суммарной оценки сложности маршрута (а); время прохождения маршрута по группам (б)

С целью изучения применимости систем на основе инструментальной среды при планировании и проведении краткосрочных массовых мероприятий был разработан интерактивный стенд для фестиваля ВКонтакте (в 2016 году в течение двух дней мероприятие посетило около 100 000 человек). В рамках системы, работавшей во время фестиваля, был реализован потоковый сбор данных из социальных сетей с возможностью их интерактивного анализа. Посетители и персонал мероприятия могли самостоятельно получать информацию о ходе и ситуации на фестивале, изучая собранные (и отображаемые) данные из социальных сетей непосредственно "на месте". На основе собранных данных и отзывов персонала/организаторов были выбраны

варианты использования инструментальной среды (системы) во время крупного городского фестиваля. К ним относятся: (1) апробация предварительных вариантов планировки территории и размещения ключевых объектов с помощью комбинирования методов МА-моделирования и участия самих обучаемых в виртуальной среде, создание систем для предсказания потенциальных мест скопления людей и возникновения очагов давки, создание обучающих систем для основного персонала ММ; (2) использование системы для обучения волонтеров и персонала подрядчиков “на местах” даже во время проведения мероприятия.

С целью изучения применимости к долгосрочным ММ разработана коллаборативная система для отработки сценариев, связанных с фестивалем Кумбха-Мела (г. Удджайн, Индия), включающая в себя все три типа возможных клиентов, работающих распределенно. В рамках этой системы была реализована возможность динамического взаимодействия со средой – пользователь КВР может свободно перемещать временные ограждения, тем самым влияя на направление движения потока людей. Агенты в системе динамически учитывают новые препятствия и стараются их обойти. При обучении с использованием такого типа системы возможно не только найти места образования заторов, но и коллаборативно разработать оптимальные решения для их ликвидации.

В ходе апробации разработанной технологии были выработаны направления использования подобных систем, созданных на ее основе, руководителями персонала ММ для обеспечения лучшего понимания процессов, происходящих на местах, а также для выработки оптимальных стратегий как для регулярных процессов, так для чрезвычайных ситуаций заранее, а также для подготовки специалистов непосредственно для работы в толпе. Такие специалисты, будучи частью потока, должны направить людей в нужную сторону, избежав возникновения давки. Это возможно при тесном сотрудничестве с персоналом, отвечающим за внешнее управление потоками, а также при понимании различных вариантов движения потоков людей.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

- обоснованы требования к средствам автоматизации процессов обучения персонала ММ с использованием технологий математического моделирования и виртуальной реальности;
- разработана модель обучения, которая позволяет заблаговременно (до начала мероприятия) вырабатывать у обучаемых компетенции, связанные с ориентацией в условиях проведения ММ, эффективными перемещениями в плотной толпе и управлением движением толпы;
- разработано инфраструктурное обеспечение процесса обучения, включая технологии "погружения" обучаемого в МА-модель движения больших скоплений людей (с возможностью воздействия на ситуацию), а также технологии виртуальной реальности для отображения ситуации;

- спроектирована и разработана инструментальная среда для построения сценариев обучения, что обеспечивает унификацию разработанных решений для широкого диапазона ММ;
- проведены экспериментальные исследования разработанной технологии, оценена возможность ее применения для обучения персонала различных ММ на примере Дня открытых дверей в Университете ИТМО, фестиваля ВКонтакте (Санкт-Петербург) и фестиваля Кумбха-Мела (Удджайн, Индия).

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Загарских А.С., Карсаков А.С., Иванов С.В., Бухановский А.В.* Инструментальная оболочка для создания геоинформационных систем управления урбанизированными территориями // Динамика сложных систем - XXI ВЕК. 2013. Т. 7. № 3. С. 68–72. Объем: 0,313 п.л. (авторский вклад 0,16 п.л.).
2. *Безгоднов А. А., Есин Д. В., Карсаков А. С., Нечаев Ю. И., Иванов С. В.* Графическая инструментальная оболочка для создания виртуальных полигонов моделирования сложных систем: применение в морских исследованиях и разработках // Динамика сложных систем - XXI ВЕК. 2013. Т. 7. № 3. С. 28–34. Объем: 0,44 п.л. (авторский вклад 0,09 п.л.).
3. *Zagarskikh A., Karsakov A., Tchurov T.* The Framework for Problem Solving Environments in Urban Science // *Procedia Comput. Sci.* 2014. Vol. 29. P. 2483–2495. Объем: 0,81 п.л. (авторский вклад 0,41 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
4. *Zagarskikh A., Karsakov A., Karbovskii V., Kashirin V., Tchurov T.* Scenario-Based Simulations within the System of Coupled Urban Models // *Proceedings SGEM-2014*. P. 761–768. Объем: 0,5 п.л. (авторский вклад 0,1 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
5. *Karsakov A., Bilyatdinova A., Hoekstra A.G.* 3D virtual environment for project-based learning // 2014 IEEE 8th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). IEEE, 2014. P. 1–5. Объем: 0,31 п.л. (авторский вклад 0,19 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
6. *Bezgodov A., Karsakov A., Zagarskikh A., Karbovskii V.* The Framework for Rapid Graphics Application Development: The Multi-scale Problem Visualization // *Procedia Comput. Sci.* 2015. Vol. 51. P. 2729–2733. Объем: 0,31 п.л. (авторский вклад 0,19 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
7. *Zagarskikh A., Karsakov A., Bezgodov A.* Efficient Visualization of Urban Simulation Data Using Modern GPUs // *Procedia Comput. Sci.* 2015. Vol. 51. P. 2928–2932. Объем: 0,31 п.л. (авторский вклад 0,16 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
8. *Karbovskii V., Voloshin D., Karsakov A., Bezgodov A., Zagarskikh A.* Multiscale Agent-based Simulation in Large City Areas: Emergency Evacuation use Case // *Procedia Comput. Sci.* 2015. Vol. 51. P. 2367–2376. Объем: 0,63 п.л. (авторский вклад 0,13 п.л.). **(индексируется в Scopus)**

9. *Karsakov A., Bilyatdinova A., Bezgodov A.* Improving Visualization Courses in Russian Higher Education in Computational Science and High Performance Computing // *Procedia Comput. Sci.* 2015. Vol. 66. P. 730–739. Объем: 0,63 п.л. (авторский вклад 0,56 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
10. *Zagarskikh A., Karsakov A., Mukhina K., Nasonov D., Bezgodov A.* An Efficient Approach of Infrastructure Processing Visualization Within Cloud Computing Platform // *Procedia Comput. Sci.* 2015. Vol. 66. P. 705-710. Объем: 0,38 п.л. (авторский вклад 0,19 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
11. *Bezgodov A., Karsakov A., Mukhina K., Egorov D., Zakharchuk A.* Learning AI techniques through bot programming for a turn-based strategy game // *Proceedings of the European Conference on Games-based Learning*. Vol. 2015. P. 66-74. Объем: 0,56 п.л. (авторский вклад 0,11 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
12. *Bilyatdinova A., Karsakov A., Bezgodov A., Dukhanov A.* Virtual Environment for Creative and Collaborative Learning // *Advances in Intelligent Systems and Computing*.: Springer-Verlag, 2016. P. 371–381. Объем: 0,69 п.л. (авторский вклад 0,34 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
13. *Karsakov A., Moiseev A., Mukhina K., Ankudinova I.N., Ignatieva M.A., Krotov E., Karbovskii V., Kovalchuk S.V., Konradi A.O.* Toolbox for Visual Explorative Analysis of Complex Temporal Multiscale Contact Networks Dynamics in Healthcare // *Procedia Comput. Sci.* 2016. Vol. 80. P. 2107-2118. Объем: 0,75 п.л. (авторский вклад 0,23 п.л.). **(индексируется в Scopus)**
14. *Karbovskii V., Karsakov A., Rybokonenko D., Voloshin D.* Short-term Multiagent Simulation-based Prediction in Mass Gatherings Decision Support System // *Procedia Comput. Sci.* 2016. Vol. 80. P. 2119-2127. Объем: 0,56 п.л. (авторский вклад 0,06 п.л.). **(индексируется в Scopus)**

Прочие публикации по теме диссертации

1. *Bilyatdinova A.Z., Karsakov A.S., Bezgodov A.A., Dukhanov A.V.* Virtual Environment for Creative and Collaborative Learning // *Proceedings of the 9th International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems*, 2014. P. 313–320. Объем: 0,5 п.л. (авторский вклад 0,35 п.л.).
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613327 «Инструментальная оболочка для создания геоинформационных систем управления урбанизированными территориями UrbanVision» / *А.С. Загарских, А.С. Карсаков, С.В. Иванов, А.В. Бухановский*. 25.03.2014 г.