

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ (НА ПРИМЕРЕ XXII ЗИМНИХ ОЛИМПИЙСКИХ ИГР 2014)

В.К. Абросимов,

доктор технических наук, старший научный сотрудник,
начальник отдела компании «Стэп Лоджик»

В.В. Лебидько,

кандидат физико-математических наук,
ведущий аналитик компании «Стэп Лоджик»

E-mail: v_abrosimov@step.ru, v_lebidko@step.ru

Адрес: г. Москва, ул. Полковая, д. 3, стр. 3

Рассмотрены основные положения моделирования организации массовых мероприятий с использованием многоагентной технологии. Выделены характерные особенности массовых мероприятий, показана практическая значимость моделирования. Посетители массовых мероприятий и обслуживающий персонал представлены как агенты, проявляющие в процессе достижения целей свойство коллективного поведения с учетом собственной автономности. На примере модели посещения спортивного мероприятия на Олимпийском стадионе в г. Сочи продемонстрированы возможности имитации последствий возникновения различных критических ситуаций.

Ключевые слова: моделирование, массовое мероприятие, многоагентный подход, Олимпийские игры, Сочи, очередь, толпа.

1. Общая задача моделирования подготовки и проведения массовых мероприятий

Во многих практических случаях возникают задачи оперативного обслуживания значительного количества людей ограниченной группой обслуживающих лиц. Как правило, такие задачи связаны с организацией целенаправленного

управления поведением больших групп людей. Но при объединении людей в группы спонтанно возникает эффект так называемого коллективного поведения — образуются формальные и неформальные лидеры, проявляется эффект толпы, повышается влияние внутренних социальных установок и др. В силу многочисленных особенностей процессы моделирования поведения значительных групп людей очень редко могут быть описаны в строгой ма-

тематической форме. Такие попытки предпринимались (см, например, [1]), однако любые строгие закономерности должны находиться в соответствии с адекватными реальности законами поведения групп людей, что сделать достаточно проблематично в силу общей неформализуемости таких процессов.

К числу основных задач моделирования, возникающих при организации массовых мероприятий, следует отнести имитацию прохождения потоков людей через различные ограничители движения (препятствия). К числу таких препятствий можно отнести металлорамки, различные турникеты, даже обычные двери (например, при входе в метрополитен) и др. К классу своего рода препятствий при моделировании можно отнести и кассы для продажи билетов, где посетители мероприятий должны эти билеты приобретать, полицейских, регулирующих (направляющих) поток людей при его движении. При проведении таких массовых мероприятий, как XXII зимние Олимпийские игры 2014 в г. Сочи (далее, Олимпийские игры), для оказания помощи посетителям активно будут привлекаться волонтеры, в этой связи их нахождение на территории Олимпийского парка также будет являться препятствием, замедляющим движение посетителя к цели, которое также можно моделировать.

Наряду с моделированием препятствий целесообразно также рассматривать и моделировать классы событий, возникновение которых может существенно изменить как порядок проведения мероприятия, так и направление движения людей. К наиболее типичным событиям можно отнести внезапный отказ от проведения мероприятия (перенос сроков проведения или полная отмена), прекращение мероприятия в процессе проведения, последствия террористических актов и др. Эти задачи относятся к классу задач «моделирование толпы», в результате решения которых получены достаточно интересные результаты [2 - 4 и др.].

Выделим некоторые характерные особенности процессов организации массовых мероприятий:

- ♦ посетители массовых мероприятий должны иметь некоторые удостоверяющие их намерения документы (например, билет на спортивное соревнование), позволяющие пройти на мероприятие с обеспечением требований по безопасности;

- ♦ отсутствие статистических характеристик поступления заявок на обслуживание в практических задачах приводит к необходимости рассматривать данные процессы как, с одной стороны, случайные

с неизвестным законом распределения, а с другой – как, своего рода, нечеткие;

- ♦ в процессе движения к цели посетитель может столкнуться с рядом ограничений, связанных, главным образом, с ограниченными возможностями ответственных лиц обслужить потоки с высокой интенсивностью поступления «заявок» или с конструктивными особенностями помещений;

- ♦ в процессе подготовки и проведения мероприятия возможно возникновение некоторых событий, существенно меняющих стратегии поведения посетителей.

Основным методом исследования ситуаций организации массовых мероприятий в этом контексте является имитационное моделирование. Наиболее теоретически обоснованной и практически используемой в задачах, сущность которых составляют процессы обслуживания клиентов, считается теория массового обслуживания. При этом посетителей массовых мероприятий можно рассматривать как своего рода «заявки» на обслуживание, а турникеты, металлорамки, кассиров, волонтеров и полицейских можно рассматривать как «приборы», обрабатывающие «заявки». Массивы «заявок», находящиеся в ожидании обработки «прибором» («приборами») образуют «очереди». Время «жизни» «очереди» определяется скоростью обработки «заявки» «прибором» и своевременным покиданием «заявки» данной конкретной «очереди». Момент покидания «очереди» определяется фактом полного обслуживания «заявки». В случае если «заявка» обработана «прибором» не полностью, возникает накопление «очереди», последствия влияния которой на моделируемую систему определяются связью с остальными элементами системы. Тем самым, основными параметрами несущими элементы недетерминированности и случайности в построенной модели являются поток (плотность и скорость потока) «заявок» (посетителей Олимпийских игр) и продолжительность (время) их «обслуживания».

2. Агентный подход к моделированию подготовки и проведения массовых мероприятий

В настоящей работе предполагаются реализуемыми две основных гипотезы.

Первая гипотеза. Группы движущихся к единой цели людей имеют возможность активно обмениваться информацией друг с другом относительно изменений окружающей среды, своего целеполагания и поведения.

Вторая гипотеза. Поведение групп людей, движущихся к единой цели, определяется не заранее определенным планом, а управляется происходящими в процессе движения событиями.

По существу, обмен сообщениями между движущимися к цели людьми изменяет их поведение, влияя как на состоявшееся событие, участниками которого они являются, так и на ещё не наступившее. Анализируя условия решения таких задач, можно прийти к выводу, что для их решения необходимо использовать понятия, которые находятся как бы «над» традиционными подходами к их решению. Как показывает исследование различных парадигм представления и описания поведения активных объектов в изменяющихся внешних средах (адаптивные, самоорганизующиеся системы, конечные автоматы и др.), целесообразно для моделирования таких ситуаций использовать парадигму агентно-ориентированных систем, использующих понятие «интеллектуальный агент», как высокоуровневую абстракцию для формализации сложных недоопределенных ситуаций [5]. При этом организацию коллективного движения целесообразно описывать как перемещение в пространстве так называемых «интеллектуальных агентов».

Интеллектуальные агенты — есть новый класс некоторых программно-аппаратных сущностей, которые действуют от имени пользователя, чтобы находить и обрабатывать информацию, поддерживать решение трудных задач, вести самостоятельные переговоры в программных системах, автоматизировать выполнение рутинных операций и сотрудничать с другими программными агентами при возникновении сложных проблем, снимая тем самым с человека избыточную информационную нагрузку [5-8].

В нашем случае под агентом мы будем понимать лицо, стремящееся посетить массовое мероприятие (посетителя), обладающего возможностью оценивать возникающую ситуацию, взаимодействовать с другими посетителями и принимать самостоятельные решения. Зафиксируем также способность агента перемещаться в пространстве в соответствии с собственными целями, критериями и предпочтениями, в зависимости от складывающейся ситуации в соответствии с информацией, имеющейся в собственной базе знаний, полученной от других агентов, либо с учетом их мнения.

Задача такого агента состоит в том, чтобы:

- ◆ двигаясь в группе себе подобных агентов,
- ◆ по заданной начальной позиции (прибытие в район стадиона, например),

- ◆ конечной цели (проход на мероприятие),
- ◆ при использовании собственной базы знаний об окружающей среде (необходимость иметь билет, иные документы),
- ◆ потенциальных пространственно-временных ограничений (необходимо пройти через металлодетекторы и турникеты в условиях, когда время до начала мероприятия ограничено),
- ◆ с учетом мнения других агентов, выполняющих аналогичные задачи (например, информации об отмене мероприятий, образовании очереди, предложениях о покупке/продаже билетов и др.)

построить оптимальную пространственно-временную траекторию движения к цели, избежав возможных очередей.

Будем считать, что движение агента не зависит от его ориентации, пройденного пути, но существенно зависит от возможных конструктивных и организационных ограничений на движение. Математической формой агента может быть просто точка в четырехмерном пространстве Минковского (определяющем 3 пространственные координаты и одну временную), для простоты моделирования преобразованном в трехмерное пространство. В качестве определяющей концепции поведения агента будем закладывать концепцию рациональности. Рациональный агент действует «правильно», то есть с максимальной эффективностью. Оценка же рациональности зависит от показателей эффективности его движения (прежде всего вероятности достижения цели), его знаний о среде (прежде всего, ограничений на движение), оценки текущей ситуации (прогноза последствий) и собственных решений. При этом агент выбирает решения на основе только текущей ситуации, не игнорируя предварительно закладываемые в базу знаний данные, использования on-line информации о состоянии среды.

3. Посетитель Олимпийских игр, как интеллектуальный агент

Примером такой задачи может являться обслуживание гостей Олимпийских игр в период подготовки и проведения спортивных мероприятий. Априори ясно, что создание разнообразных моделей (Олимпийского парка, Олимпийской деревни, трафика в информационных сетях, транспорта и др.) занимает важное место в общих процессах подготовки и проведения игр. Так, например, при проведении Летних Олимпийских игр в Лондоне (2012 год) по данным средств массовой информации, ор-

ганизаторы, построив необходимые компьютерные модели с мощными средствами визуализации, отвели моделированию сотни тысяч часов (разумеется, при пересчёте модельного, значительно меньшего времени, фигурирующего в имитационных экспериментах в реальные астрономические часы).

Организаторы Игр в Российской Федерации уделяют большое внимание удобству посетителей Игр: наличию возможности как заблаговременно приобрести электронный или обычный билет, получить его по результатам аукциона, приобрести его перед началом соревнования. При этом значительное внимание уделяется вопросам безопасности. Так, организаторы Игр в Сочи для этих целей разрабатывают так называемую единую идентификационную систему (ЕИС), которая призвана не только обеспечить совершенно новый уровень технологических сервисов для клиентов олимпийского проекта, но также и решать вопросы безопасности, разграничения доступа, получения электронных билетов, навигации, получения информации об Играх и др. [2]. Очевидно, что в рамках реализации ЕИС должно быть предусмотрено создание необходимого количества центров выдачи карт ЕИС (в настоящее время имеет название паспорт болельщика), размещаемых в удобных для зрителей местах. Заметим при этом, что время выдачи таких карт существенно превышает время приобретения билета, так как связано с разнообразными временными процедурами.

Описание элементов системы *посетитель Игр – персонал, обслуживающий Игры – олимпийский объект* и их взаимодействий друг с другом выглядит следующим образом. Все посетители массового спортивного мероприятия образуют по пути на олимпийский объект квазинепрерывный поток. Объектами моделирования являются группы людей, следующих на мероприятие (посетители) и обслуживающих его. При этом выделяются следующие два корневых класса активных объектов.

Первый класс – *посетители Игр*, в котором есть условно представители трех групп:

Группа K_{11} , имеющих билет и карту ЕИС;

Группа K_{12} , имеющих билет, но не имеющие карту ЕИС;

Группа K_{13} , не имеющих и билета, и карты ЕИС.

Второй класс – *обслуживающие Игры лица*, в котором также есть условно представители трех групп:

Группа K_{21} – волонтеры;

Группа K_{22} – кассиры;

Группа K_{23} – сотрудники службы ЕИС.

В наиболее общем случае i -го агента j -го класса можно определять вектором состояния вида:

$$A_{ij} = \{B_{ij}, G_{ij}, S_{ij}, N_{ij}, U_{ij}, E_{ij}\}, i=1, j=1, 2$$

где j – номер корневого класса;

B_{ij} – база знаний i -го агента;

G_{ij} – множество целей (желаний) агента;

S_{ij} – множество стратегий поведения агента;

N_{ij} – структура намерений агента (подмножество множества S_{ij} ($N_{ij} \subset S_{ij}$), то есть совокупность стратегий поведения, выбираемых i -тым агентом для достижения цели gs из множества G_{ij});

U_{ij} – структура обязательств агента (подмножество множества G_{ij} ($U_{ij} \subset G_{ij}$), то есть совокупность целей gk из множества G_{ij} , которые могут корректироваться i -тым агентом по результатам взаимодействия с другими агентами для достижения общей цели);

E_{ij} – многомерная матрица, определяющих описание внешних связей i -того агента с другими агентами j -того класса, включая их состояние, цели, намерения и др.

Каждый агент из соответствующего корневого класса имеет собственные значения параметров, собственное поведение, функционирует с одной стороны независимо от других объектов и экземпляров, имея цель (попасть на соревнование), с другой – зависимо от внешней среды и эффекта «толпы». Вместе с тем, многие характеристики и поведение агентов группы в выбранном классе одинаковы по своей сути, так как цели преследуются по существу одинаковые. Параметрами агента в данной постановке является только его принадлежность к определенному классу, из чего вытекает стратегия его поведения.

Модельное время здесь рассматривается как непрерывное. Для спецификации действий агента используются таймеры, запускаемые на определенный интервал времени и по окончании этого интервала выполняющие определенное действие. Так, по таймеру в модели предусматривается фиксация некоторого события (например, начало продажи билетов на соревнование). Таймеры в модели также запускают изменение поведения людей в зависимости от времени начала мероприятия (например, за 15 минут до начала мероприятия скорость движения людей увеличивается).

Выше отмечалось, что агенты могут взаимодействовать с окружением – другими агентами своего класса или с агентами других классов. Агенту из среды, в которой он определен, можно послать сообщение, и по-

лучить ответ, что оно получено. Это взаимодействие определяется так называемыми стейчартами. Они в данной постановке определяют действия агента (его поведение) во время посещения спортивного мероприятия, правила его перемещения или переходы в другое состояние (состояние имеющих и не имеющих: билетов на Игры, карт ЕИС и др.) во времени под воздействием событий и условий.

Рассмотрим свойства посетителя массового мероприятия Игр, как интеллектуального агента.

1. База знаний агента (только по вопросам прохода на стадион) содержит заранее полученную информацию, определяющую его поведение:

- ◆ необходимо получить карту ЕИС, в противном случае на Игры посетители не допускаются;
- ◆ можно задавать вопросы волонтерам и полиции, по ответам которых корректировать свое поведение;
- ◆ при отсутствии очередей и форс-мажорных обстоятельств требуемое время получения необходимых документов и прохода на стадион не превышает 20 минут.

2. Множество целей агента вырождается в 4 элемента: купить билет, получить карту ЕИС, продать лишний билет, пройти на соревнование.

3. Множество стратегий поведения агента вырождается в следующие производственные правила:

- ◆ если нет билета, найти кассу и купить его;
- ◆ если нет карты ЕИС, то найти пункт выдачи карт ЕИС и получить карту;
- ◆ если есть и билет, и карта ЕИС, то пройти на стадион;
- ◆ если есть небольшая очередь, то встать в нее и дожидаться своей очереди.

При этом при затруднении реализации стратегии используются следующие средства:

- задать вопрос волонтеру;
- получить информацию из инфомата;
- общаться с другими агентами для получения информации устно (обмен сообщениями);
- обратиться к полицейскому с сигналом «тревога» в случае ЧП и, получив помощь, продолжать выполнение цели.

4. В данной постановке упростим задачу — намерения агента и его обязательства по отношению к другим агентам в своем классе и по отношению к другим классам будем считать отсутствующими.

В таких допущениях и предположениях была создана условная модель организации проведения

спортивного мероприятия. Модель разработана на основе программного продукта AnyLogic 6 компании XJTechnologies (Санкт-Петербург) с использованием так называемой «пешеходной библиотеки». Результаты моделирования приведены как экранные скриншоты рабочей области модели (рис. 1–3) с соответствующими пояснениями.

Модель отражает движение посетителей Олимпийских Игр в Сочи-2014 на центральный стадион Олимпийского парка.

Посетители прибывают группами (форма группы — групповой поток). Каждая группа посетителей прибывает согласно заданной интенсивности прибытия (эквивалентной экспоненциально распределенному времени между прибытиями со средним значением, равным 1/интенсивность). Максимальная интенсивность прибытия группы посетителей в единицу времени (группы формируются из двух/трех человек) задана как 300 групп/час. Время между прибытиями посетителей, входящих в состав одной группы удовлетворяет экспоненциальному распределению и составляет $\exp(10/\text{сек.})$. Задается скорость, с которой посетитель будет комфортно двигаться при отсутствии внешних факторов (в модели — 0,5 м/с). Модельное время составляет 1 час. Случайные процессы (обращение к волонтеру за информационной услугой, приход в кассу за билетом и др.) моделируются различными законами распределения (равномерный, Пуассона и др.).

Предполагается, что посетитель может столкнуться с пятью видами потенциальных ограничений: прохождение через металлорамку, встреча для получения информации с волонтером, получение билета на мероприятие, получение карты ЕИС, турникеты стадиона. По всем ограничениям задается закон распределения времени задержки и допускается вариация его параметров. Так, например, максимальная интенсивность прохождения посетителей через объект «металлорамки» составляет 30 чел/мин, время обслуживания агента волонтером — 20 секунд, кассиром — 3 минуты и др.

В зависимости от статуса посетителя, задаваемого так называемым коэффициентом предпочтения, посетители следуют на один из пяти выходных «портов»: проходя через металлодетектор (в виде рамки), двигаются по направлению к турникетам, расположенным возле входа на стадион, либо приобретают необходимые разрешительные документы (билет на мероприятие и карту ЕИС).

В модели по определенному таймеру реализуется ряд событий. К числу важнейших отнесены следующие (см. табл. 1).

Таблица 1.

Моделируемые события

| Время регистрации события | Событие | Реакция модели |
|---|---|--|
| Начало отсчета моделирования | Приход поезда с посетителями массового мероприятия на Олимпийском стадионе | Формирование потока посетителей из дискретных групп |
| 15 минута с момента начала моделирования | Закрытие одной из билетных касс по техническим причинам | Увеличение времени выдачи карт ЕИС в 2 раза с образованием очереди |
| 20 минута с момента начала моделирования | Сообщение 50% агентам группы K_{13} об образовании очереди на продажу билетов | Ускорение движения 50% агентов потока на 25% |
| 35 минута с момента начала моделирования | Техническая неисправность в пункте выдачи ЕИС | Увеличение времени выдачи карт ЕИС в 2 раза с образованием очереди |
| 50 минута с момента начала моделирования | Сообщение 20% агентам группы K_{12} и 20% агентам группы K_{13} об образовании очереди на выдачу карт ЕИС | Ускорение движения 50% агентов потока на 15% |
| 1 час 10 минут с момента начала моделирования | Нехватка волонтеров возле металлорам, сообщающих посетителям маршрут движения в зависимости от наличия билета и карты ЕИС | Образование большой очереди возле металлорам с возможностью перехода в затор |
| 1 час 20 минут с момента начала моделирования | Фиксация времени, когда до начала мероприятия остается 10 минут | Ускорение движения 100% потока на 40% |
| Случайное число в интервале от 20 до 40 минут до начала массового мероприятия | Задержание потенциального террориста возле металлорам | Сокращение пропускной способности прохода через металлорамки на 50% |
| Случайное число в интервале от 10 до 30 минут до начала массового мероприятия | Срабатывание взрывного устройства возле металлорам либо на территории Олимпийского парка | Хаотическое движение больших групп людей в локализованной области пространства |

В модели также реализована матрица взаимных связей агентов различных классов (в терминологии AnyLogic – стейчарты). Она включает в себя обмен сообщениями различного рода между агентами различных классов и внутри классов, возможность обращения к волонтерам и полицейским и получения обратной связи от них (оказание информационной услуги, получение сигнала тревоги и др.). Посредством стейчартов и таймеров моделируются разнообразные события.

Все объекты инфраструктуры (часть 3D-визуализации Олимпийского парка Сочи и Олимпийского стадиона) уменьшены относительно их реального размера; группы посетителей игр представляются в виде кружков разных цветов (цвета меняются в зависимости от статуса посетителя) и для наглядности увеличены. Модель является динамической, может работать как в реальном, так и в модельном времени.

Такая модель позволяет описывать поток следующих на массовое спортивное мероприятие посетителей Игр, имеющих и не имеющих соответствующие разрешительные документы для безопасного прохода на соревнования, возникновение очередей и, как предельный случай, толпы при организации массового мероприятия в зависимости от работы

транспорта и характеристик «приборов» обслуживания: количества турникетов и металлорам, оперативности выдачи разрешительных документов, а также эффективности работы волонтеров в части времени правильного обслуживания посетителей Игр.

4. Примеры результатов моделирования

В силу ограниченности объема статьи, приведем лишь три примера результатов моделирования.

Поток людей (показаны кружками черного цвета) проходит сквозь металлорамки, часть людей следует сразу на стадион, не имеющие разрешительных документов следуют либо к кассам, либо к пункту выдачи карт ЕИС, либо последовательно к обоим объектам, далее, после приобретения, направляются на стадион, волонтеры (более светлые (бордовые) кружки) осуществляют диспетчеризацию следующих на мероприятие людей в зависимости от наличия/отсутствия билетов и карт ЕИС.

В нижней части рисунка – процессная схема модели в нотации UML (Unified Modeling Language), реализованной в программном продукте AnyLogic 6.

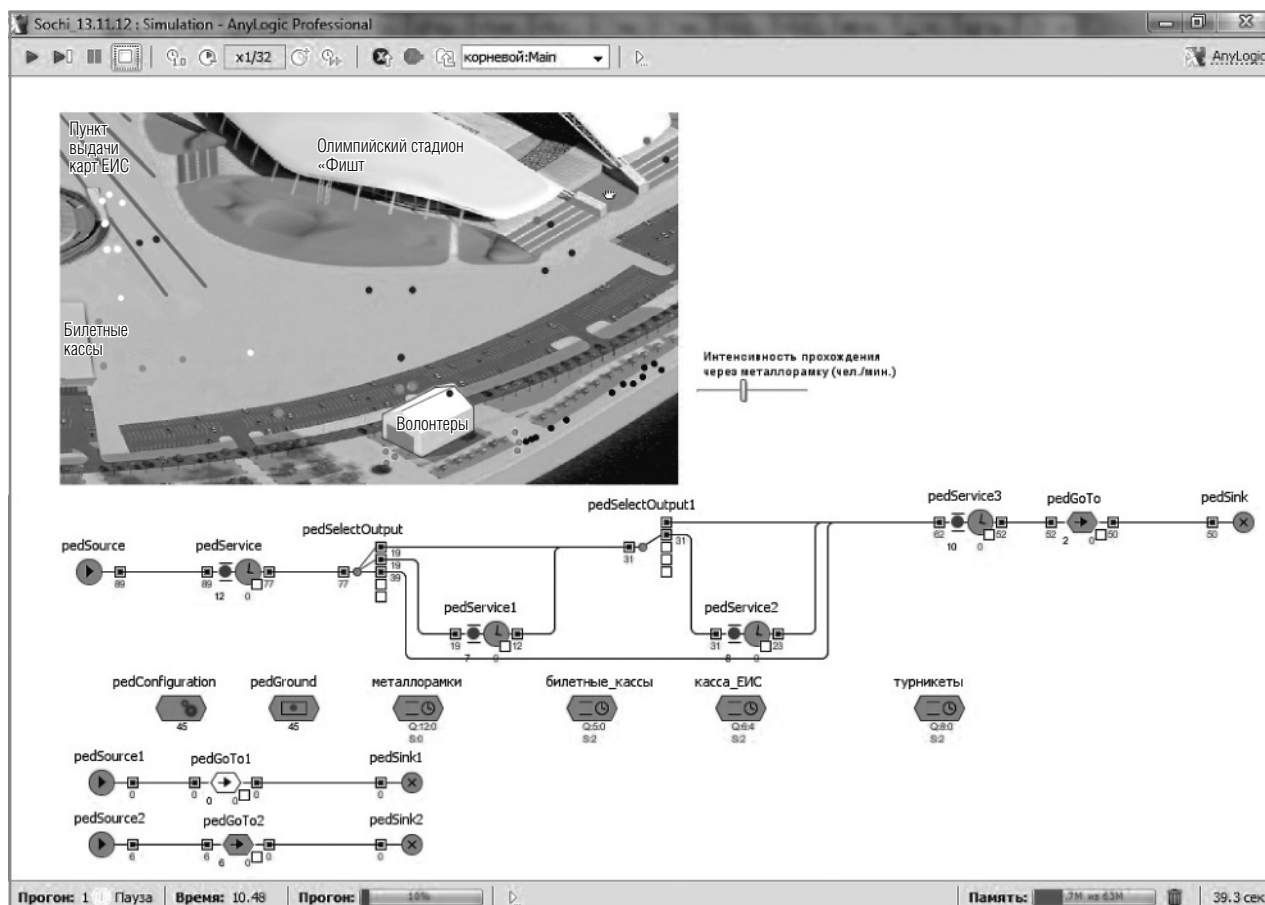


Рис. 1. Стандартная ситуация прохода на массовое мероприятие

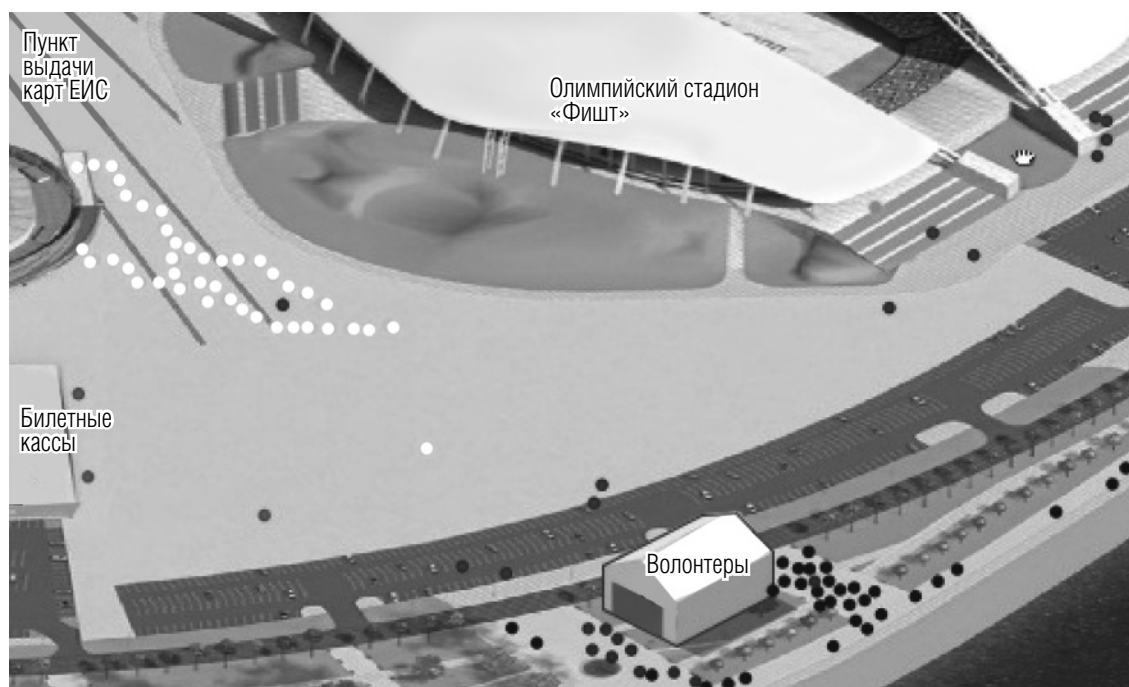


Рис. 2. Кризисная ситуация: образование очереди

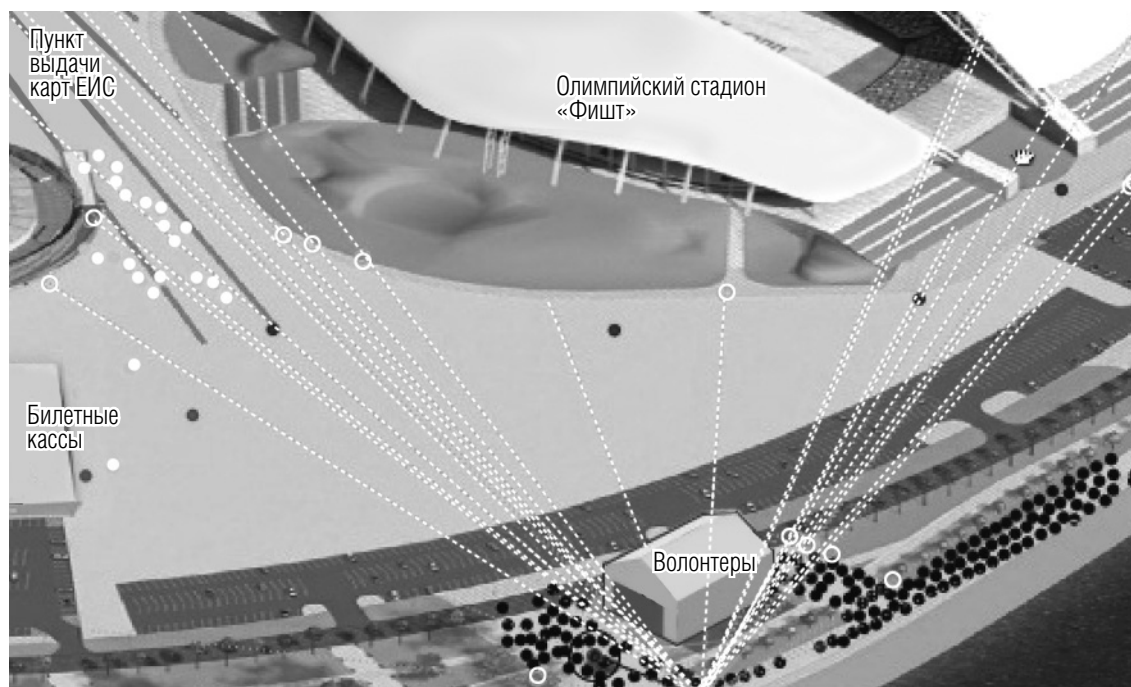


Рис. 3. Экстремальная ситуация

Вследствие фиксации кризисного события (например, выхода из строя части оборудования пункта выдачи карт ЕИС) увеличился временной период выдачи карт ЕИС, что привело к образованию существенной очереди («цепочка» из светлых кружков). Обмен информацией между посетителями, стоящими в очереди, и другими группами посетителей, подходящих к металлорамкам, вызвал изменение параметров движения групп людей (увеличение скорости движения и распространение информации на следующие группы). Оба события повлекли за собой образование небольшого «сгустка» посетителей на входе перед металлорамками, что существенно увеличило нагрузку на волонтеров, а ограниченное их количество еще более усугубило ситуацию.

Иллюстрация форс-мажорной ситуации (например, одновременный приход к олимпийскому объекту нескольких видов транспорта, обнаружение и задержание полицией потенциального террориста и др., срабатывание взрывного устройства). На входе в Олимпийский парк образовалась толпа с соответствующими последствиями (в разработанной модели управление дальнейшими процессами передается через интеграционную шину и, далее, в модель поведения толпы). Проходимость металлорамки не обеспечивает потребности в движении посетителей. Волонтеры не могут справиться со своими обязанностями. В пункте выдачи карт ЕИС

за счет указания от полиции об ужесточении режима прохода на олимпийских объектах увеличено время выдачи карт и образовалась очередь. Билетные кассы простаивают. Начало мероприятия под угрозой срыва.

5. Обсуждение результатов

Несмотря на значительные возможности, имитационное моделирование при решении практических задач до настоящего времени используется недостаточно активно. Вместе с тем, создание таких моделей в ряде случаев является жизненно необходимым, так как позволяет не только анализировать происходящие процессы в динамике, но также и моделировать критические ситуации с целью принятия соответствующих мер по их предотвращению и недопущению.

При проведении массовых мероприятий, в частности спортивного характера, значительное внимание необходимо уделять не только организационным мерам по обеспечению безопасности, но также и процессам имитационного моделирования поведения потоков людей, моделированию образования очередей, последствий возникновения чрезвычайных ситуаций различного характера.

Количество публикаций по вопросам имитационного моделирования процессов движения потоков людей при проведении в различных странах

Олимпийских игр исчисляется единицами. Вместе с тем, значимость такого моделирования трудно переоценить. Даже описанная модель, построенная на простейших решающих правилах, показывает возможность возникновения крупных проблемных ситуаций с обслуживанием посетителей будущих Олимпийских игр в Сочи. Но ценность модели состоит в том, что она является динамической, может функционировать как в реальном, так и в модельном времени и позволяет путем варьирования ключевыми характеристиками, параметрами законов распределения случайных величин, входными дан-

ными выбрать оптимальные условия проведения массового мероприятия, определить потребные ресурсы обслуживающего персонала.

Модели, подобные разработанной, должны увязываться в единый комплекс с другими имитационными моделями – транспортных потоков, образования и поведения толпы, потребного информационного трафика и обмена данными и др., что позволит наиболее полно и адекватно исследовать сложные организационно-технические процессы, объективно возникающие при подготовке и проведении массовых мероприятий. ■

Литература

1. Akopov S., Beklaryan A. Simulation of human crowd behavior in extreme situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics, v. 79, № 1, 2012, p. 121-138.
2. Аптуков А.М., Брацун Б.А., Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского Университета, серия Математика, Механика, Информатика, Вып. 3(29), 2009.
3. Степанцов М.Е., Моделирование динамики движения группы людей на основе решеточного газа с нелокальными взаимодействиями // Известия Высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 7:5 (1999), 44–46.
4. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. – Спб.: БВХ- Петербург, 2005.- 400 с.
5. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. Серия «Науки об искусственном». - Едиториал УРСС 2002, 352 с.
6. Поспелов Д.А. От коллектива автоматов к мультиагентным системам // Proc. Of the International Workshop «Distributed Artificial Intelligence und Multi-Agent Systems», DIAMAS' 97, St. Peterburg, 1997. P. 319–325.
7. Жуков С.Ю. Навигация интеллектуальных агентов в сложных синтетических пространствах. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, Санкт-Петербург, 2000.- 135 с.
8. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям / Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. - 101 с.