

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АГЕНТОВ

А.Л. БЕКЛАРЯН

преподаватель кафедры бизнес-аналитики, факультет бизнес-информатики,
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

E-mail: abeklaryan@hse.ru

А.С. АКОПОВ

доктор технических наук, профессор кафедры бизнес-аналитики,
факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

E-mail: aakopov@hse.ru

В статье развивается феноменологический подход к моделированию поведения толпы, предложенный в работе [1]. Рассматривается непрерывная стохастическая агентная модель движения людей в ограниченном пространстве с заданной геометрией с использованием уточнений как состояния агента, так и системы принятия решений агентом, приведенных в моделях Хелбинга [2, 3, 4] (молекулярный подход). Такая интеграция представляется наиболее перспективным развитием данного класса задач, ввиду того, что феноменологический подход (модель Бекларяна–Акопова) позволяет привести естественную дискретизацию задачи с последующим вычислением приращения всех характеристик агентов в каждый момент времени, а использование элементов молекулярного подхода (модели Хелбинга) позволяет описать максимально реалистичную систему принятия решений агентом. Это снимает сложный вопрос численного интегрирования уравнений Ньютона, лежащих в основе моделей Хелбинга, и предлагает явные вычисления всех характеристик системы.

В результате в системе имитационного моделирования AnyLogic создана агентная модель, позволяющая исследовать динамику перемещения агентов с учетом «эффекта толпы» при различных сценариях, в частности, в условиях экстремальных ситуаций при наличии эффектов «давки» и «турбулентности».

Ключевые слова: имитационное моделирование, динамика толпы, агентное моделирование, AnyLogic.

Цитирование: Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 69–77.

1. Введение

Коллективное поведение людей в замкнутом пространстве таит в себе формы поведения, опасные для жизни человека. Особая роль отводится ситуациям, при которых возникает массовая паника, например, вследствие возникнове-

ния чрезвычайной ситуации (ЧС). Так, в результате пожара в ночном клубе «Хромая лошадь» (5 декабря 2009 года) погибло 156 человек и 64 человека получили тяжкий вред здоровью [5]. Давка, произошедшая 22 ноября 2010 года в столице Камбоджи во время традиционного камбоджийского праздника – фестиваля воды, – повлекла за собой гибель

456 человек, еще более пятисот получили ранения различной степени тяжести [6]. При этом стоит заметить, что во многих ситуациях основные людские потери возникают не столько в сам момент возникновения ЧС, а являются следствиями дальнейших событий (задымление, эффект толпы, давка и т.д.), а также зависят от характеристик внешней системы (геометрия помещения, расположение выходов и т.д.), существенно влияющих на возможность эффективной эвакуации. Таким образом, паника и дальнейшая давка многократно увеличивают число жертв среди людей даже в ситуациях, напрямую не угрожающих жизни.

К сожалению, последствия ЧС являются трудно-прогнозируемыми, так как зависят от множества факторов. Кроме того, большая часть наблюдений за местами скопления людей, и тем более за процессом поведения толпы в той или иной ЧС, относятся либо к закрытой информации, либо, как минимум, к труднодоступной, не говоря уже о том, что само множество однотипных ЧС статистически мало и не дает возможности построения точной аналитической модели.

Несмотря на высокий интерес к проблематике, долгое время основные работы по данной теме были посвящены психологическим и социальным аспектам вопроса. Например, в работе [7] детально описаны условия и причины возникновения паники, которые сводятся к доминированию коллективного бессознательного как основного фактора. То есть солидная часть исследователей рассматривает толпу с фрейдистской точки зрения, основанной на гипотезе, что люди как часть толпы действуют иначе, чем люди как индивиды [8, 9, 10]. Совокупность разумов членов группы синергируются в некий коллективный разум. Соответственно, и предлагаемые решения проблемы возникновения паники также основаны на таком подходе [11], который мы назовем *наивным*.

На фоне описанных исследований изучение толпы с привлечением сложных математических моделей началось сравнительно недавно. Здесь стоит отметить работы пионера этой области — Дирка Хелбинга. В его работе 2000 года в журнале Nature [2] впервые удалось воспроизвести ряд характерных для толпы явлений, таких, как образование пробок, вовлечение новых людей в панику и другие, с помощью математического моделирования. В основе этой работы лежала идея применения к толпе людей методов молекулярной динамики, где психологические и социальные факторы рассматриваются как потенциалы взаимодействия между молекулами-людьми

[12]. Такой подход будем называть *молекулярным*. На основе модели Хелбинга были построены ряд других моделей [13, 14, 15, 16], рассматривающие различные аспекты возможных усложнений системы взаимодействий. Правда, основная часть моделей основывается на двухчастичном взаимодействии и игнорирует тот факт, что в определенной точке пространства сталкиваются трое и более людей. Тем не менее, в работе [4] была рассмотрена модель много-частичного взаимодействия, которая привела к появлению модельного эффекта турбулентности толпы, который не раз был зарегистрирован в реальных ситуациях. Здесь стоит упомянуть работы группы российских ученых, Д.А.Брацуна [17, 18] и его коллег, ставящие своей целью создание агентной модели поведения толпы на основе моделей Хелбинга. Отличительной особенностью моделей Брацуна является сложность геометрии пространства и формирование агентом плана выхода из многоуровневого разветвленного помещения. К сожалению, дальнейшее усложнение моделей Хелбинга, как в части взаимодействия людей, так и в части анализа окружающей обстановки, ведет к громоздкой процедуре совместного интегрирования уравнений движений, что требует либо распараллеливания вычислительных процессов, либо сверхпроизводительных процессоров.

Наряду с двумя описанными подходами, в работах [1, 19] был предложен *феноменологический* подход, в рамках которого формализована агентная модель поведения толпы. В такой модели априори определяются состояния агентов с их характеристиками, правила взаимодействия агентов и правила принятия решений. Это позволяет смоделировать динамику состояния системы как результат взаимодействия автономных агентов, чья система принятия решений задается в явном виде, а не является результатом решения системы уравнений Ньютона. При этом удается заложить такие эффекты, как турбулентность толпы, волны сжатия толпы и другие, которые в рамках моделей Хелбинга требуют задания соответствующих потенциалов, что, в свою очередь, ведет к поиску уникального динамического решения для весьма сложной системы уравнений и порождает самостоятельную неординарную задачу. Также стоит отметить, что при феноменологическом подходе удается добавить ряд стохастических процессов в систему принятия решений агента с целью приближения моделируемой динамики к реально наблюдаемым случайным флуктуациям в поведении толпы.

Среди других работ, нацеленных на создание программно-графического пакета реализации человеческого поведения, особое место занимает коммерческий продукт DI–Guy [20]. Как следует из официального релиза компании, основным заказчиком программного продукта является министерство обороны США и крупнейшие военно-промышленные корпорации (Boeing, BAE Systems, Raytheon). То есть создание систем прогнозирования человеческого поведения также является предметом коммерциализации и представляет большой интерес как для государственных структур, так и для частных компаний.

В результате учета имеющихся моделей и подходов, а также исследований по психологии толпы, были сформулированы основные априорные предположения, которые легли в основу данной агентной модели поведения при ЧС. Среди этих предположений необходимо отметить следующие:

- ◆ частичная или полная потеря ориентации в пространстве и во времени;
- ◆ высокая степень турбулентности толпы, т.е. наличие хаотичного движения во всех направлениях в условиях высокой плотности агентов;
- ◆ существенное замедление скорости передвижения при определенных условиях (ранение, уплотнение и т.д.);
- ◆ стремление к ближайшему выходу в случае нахождения выхода в пределах видимости;
- ◆ стремление к присоединению к ближайшей группе агентов (эффект притяжения толпы).

В данной работе рассматривается непрерывная стохастическая агентная модель в ограниченном пространстве с заданной геометрией, основанная на феноменологической модели Бекларяна–Акопова [1, 19] с использованием уточнений характеристик агента и системы принятия решений агентом, приведенных в моделях Хелбинга [2, 3, 4]. Такая интеграция видится наиболее перспективным развитием данного класса задач, ввиду того, что феноменологический подход (модели Бекларяна–Акопова) позволяет привести естественную дискретизацию задачи с последующим вычислением приращения всех характеристик агентов в каждый момент времени. Это снимает вопрос численного интегрирования уравнений Ньютона, и предлагает явные вычисления всех характеристик системы. С другой стороны, уточнение характеристик агента и его системы принятия решений, заимствованное из модели Хелбинга, позволяет получить максимально реалистичную динамику толпы.

Отметим, что в рассматриваемых моделях совокупность агентов является совокупностью индивидуумов, лишенных каких-либо общих изначальных целеполаганий.

2. Модель движения толпы на основе интеллектуальной динамики агентов

В предлагаемой модели реализуется концепция перехода от фиксированных значений ряда показателей, отражающих как геометрию помещения, так и физику процесса перемещения агентов, к представлению их в качестве управляющих параметров модели. В результате удастся построить гибкую универсальную модель, позволяющую варьировать управляющими параметрами и, как следствие, калибровать модель с целью максимизации правдоподобия с реальными процессами. Также построенная модель допускает дальнейшее усложнение во всех аспектах (геометрия помещения, механика взаимодействия агентов, характеристики самих агентов и т.д.) и введение новых уравнений связи и условий.

Предложенная модель имеет следующую структуру. Задано ограниченное пространство прямоугольной формы с диаметральными выходами. Все пространство поделено на одинаковые области также прямоугольной формы, в каждой из которой задано свое распределение агентов по площади. Каждый агент характеризуется своим состоянием и правилами взаимодействия с другими агентами. При этом как состояние, так и правила перемещения каждого из агентов являются функциями от статуса ситуации, которая характеризует степень экстремальности обстановки в восприятии агента.

Параметры модели, характеризующие геометрию пространства, состояние агента и правила взаимодействия агентов, делятся на две группы: параметры, принимающие абсолютные значения и параметры, требующие калибровки. Первая группа параметров (координаты углов помещения, координаты выходов, количество агентов и др.) состоит из показателей, которые подаются на вход модели и могут принимать любые значения. Вторая группа параметров отвечает за правила поведения агентов и требует проведения экспериментов с целью калибровки их значений.

В условии отсутствия ЧС основное стремление агента – покинуть помещение с наименьшими потерями, в которые входят отклонение от прямолинейной траектории движения к выходу, пересечение с другими агентами, замедление скорости движения

и ряд других параметров. Среди допущений модели стоит выделить тот факт, что рассматривается одноэтажное помещение прямоугольной формы с центральными выходами. Приведем формальное описание модели, используя следующие обозначения:

(a_0, b_0) – координата левого верхнего угла помещения (*параметр*);

$(a_{11}, b_{11}); (a_{12}, b_{12})$ – координаты вершин первого выхода (*параметр*);

$(a_{21}, b_{21}); (a_{22}, b_{22})$ – координаты вершин второго выхода (*параметр*);

len_1, len_2 – длина и ширина помещения, соответственно (*параметр*).

Геометрия помещения (активного пространства) представлена на рис. 1.

Для характеристик активного пространства имеет место ряд естественных ограничений. Само помещение разбито на M прямоугольных областей за счет равномерно распределенных горизонтальных и вертикальных прямых. Количество клеток по вертикали (m_{vert}) и горизонтали (m_{hor}) также является *параметрами* моделирования. Очевидно, что $M = m_{vert} \times m_{hor}$.

Количество агентов в клетке K_l в начальный момент обозначается n_{K_l} . Имеет место равенство

$$\sum_{l=1}^M n_{K_l} = N.$$

В каждой клетке $K_l, l = 1, 2, \dots, M$ задается собственное начальное распределение положений агентов в начальный момент времени, обозначаемое области F_{K_l} . Распределение F_{K_l} вместе с n_{K_l} также являются *параметрами*.

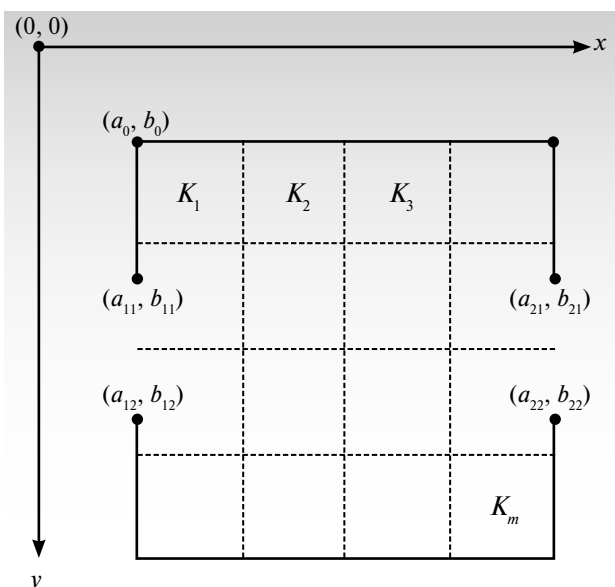


Рис. 1. Геометрия моделируемого помещения

При формальном описании модели также используются следующие обозначения:

$t = 1, 2, \dots, T$, где $T \in [1, +\infty]$ – модельное время, допускающее дробление вплоть до миллисекунд (аппроксимация непрерывной модели дискретной). Подобное квантование времени обусловлено тем, что она намного меньше, чем величина минимального времени для принятия решения агентом;

N – общее число агентов (рассматривается как *параметр* модели);

$i = 1, 2, \dots, N$ – индекс агентов;

o_i – возраст агента. Значения нормально распределены в отрезке [6, 79];

g_i – пол агента: случайная величина, равновероятно принимающая значения 1 (мужчина) или 0 (женщина);

$x_i(t)$ – абсцисса положения агента в момент времени t ;

$y_i(t)$ – ордината положения агента в момент времени t ;

$\vec{r}_i(t) = \{x_i(t), y_i(t)\}$ – радиус-вектор положения агента в момент времени t ;

$v_i(t)$ – абсолютное значение скорости (скалярная величина) перемещения агента в момент времени t ;

$v_{i, conf}$ – значение комфортной скорости (скалярная величина) ходьбы агента;

$v_{i, max}$ – значение максимальной скорости (скалярная величина) ходьбы агента (отметим, что комфортная и максимальная скорости ходьбы для разных гендерно-возрастных групп являются известными [21, 22]);

$\vec{d}_i(t)$ – направляющий единичный вектор перемещения агента в момент времени t ;

$\vec{D}_i(t)$ – направляющий единичный вектор агента к точке выхода в момент времени t ;

$\delta_i(t)$ – радиус «личного пространства» агента;

$dist_{i,j}(t)$ – расстояние между i -м и j -м агентами;

$$dist_{i,j}(t) = \sqrt{[x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2}, \quad (1)$$

$st_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$ – статус агента в момент времени t (0 – убит, 1 – ранен, 2 – дезориентация, 3 – жив). Статус 2 является временным и спустя некоторый период меняется на 3. В условиях отсутствия ЧС и давки, $st_i(t) = 3$ для всех i ;

$sit_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$ – статус восприятия агентом окружающей ситуации в момент времени t (0 – отсутствие ЧС, 3 – время сразу после ЧС, 2 – актив-

ная стадия ЧС, 1 – угасание ЧС). В условиях отсутствия ЧС, $st_i(t) = 0$ для всех i ;

$s_i(t)$ – площадь горизонтальной проекции агента,

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } st_i(t) = 0 \\ \sigma_1 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 1 \\ \sigma_2 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 2 \\ \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 3, \end{cases} \quad (2)$$

где \bar{s}_i – базовое значение, σ_1, σ_2 – поправочные коэффициенты (параметры), причем $\sigma_1 > \sigma_2 \geq 1$. Значения коэффициентов обусловлены тем, что ранний человек имеет большую площадь проекции, ввиду появившейся, например, хромоты, контузии или просто ухудшения координации движения. Дезориентированный человек, хоть и в меньшей степени, но также склонен к ухудшению своего позиционирования, что влечет увеличение площади проекции.

Базовое (\bar{s}_i) значение площади горизонтальной проекции агента рассчитывается на основании данных из методики МЧС России [23].

Плотность людей в толпе относительно агента $\rho_i(t)$ в момент времени t описывается следующим образом:

$$\rho_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j(t)}{\eta^2 s_i(t)}, \quad (3)$$

где η – коэффициент пропорции между окружающим пространством вокруг агента, где вычисляется плотность, и его площади горизонтальной проекции (параметр), $\chi_i^j(t)$ – характеристическая функция присутствия j -го агента в окружении i -го агента, т.е.

$$\chi_i^j(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x_j(t), y_j(t)) \in B\left(\eta \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, (x_i(t), y_i(t))\right) \text{ и } st_j(t) \neq 0 \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где $B(r, (x, y))$ – круг радиуса r с центром в точке (x, y) .

Опишем функциональную связь между $\delta_i(t)$ и $\rho_i(t)$.

$$\delta_i(t) = \begin{cases} \xi_i(t) \bar{\delta}_{1,i}, & \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{1,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{2,i}, & \bar{\rho}_{1,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{2,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{3,i}, & \bar{\rho}_{2,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{3,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{4,i}, & \bar{\rho}_{3,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{4,i}(t), \end{cases} \quad (5)$$

$$\xi_i = \begin{cases} \bar{\xi}_0, & \text{если } sit_i(t) = 0, \\ \bar{\xi}_1, & \text{если } sit_i(t) = 1, \\ \bar{\xi}_2, & \text{если } sit_i(t) = 2, \\ \bar{\xi}_3, & \text{если } sit_i(t) = 3, \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{\xi}_3 > \bar{\xi}_2 > \bar{\xi}_1 > \bar{\xi}_0, \quad (7)$$

$$\bar{\rho}_{i,1}(t) = \frac{\bar{\rho}_{i,3}(t)}{3}, \bar{\rho}_{i,2}(t) = \frac{2\bar{\rho}_{i,3}(t)}{3}, \quad (8)$$

$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_3(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}, \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_4(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j},$$

$$\psi_4(sit_i(t)) > \psi_3(sit_i(t)),$$

$$\psi_3(0) > \psi_3(1) > \psi_3(2) > \psi_3(3), \quad (10)$$

$$\psi_4(3) > \psi_4(2) > \psi_4(1) > \psi_4(0),$$

$$\bar{\delta}_{1,i} = \vartheta_1 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{2,i} = \vartheta_2 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{3,i} = \vartheta_3 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{4,i} = \vartheta_4 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}. \quad (11)$$

$$\vartheta_4 > \vartheta_1 > \vartheta_2 > \vartheta_3. \quad (12)$$

Радиус личного пространства является кусочно-постоянной функцией и, в отличие от площади горизонтальной проекции, является не физической, а психологической характеристикой агента. Коэффициент ξ_i , выступающий также в качестве параметра модели, отражает поправки в радиусе личного пространства в зависимости от статуса ситуации: чем более чрезвычайна ситуация в восприятии агента, тем больше его стремление расширить свое личное пространство.

Взаимодействие агентов в рамках описываемой модели рассматривается как абсолютно упругий нецентральный удар. В качестве критерия наступления взаимодействия выступает пересечение площадей горизонтальных проекций агентов.

В качестве чрезвычайной ситуации рассматривается одиночный взрыв, центр которого является случайной величиной с вероятностным распределением P . С центром взрыва связаны три концентрические окружности различных радиусов, образующие зоны различного поражения агентов. Попадание в каждую из зон поражения в момент взрыва меняет статус агента st_i на соответствующее значение. В случае смерти агента он перестает влиять на дальнейшее развитие модели, в том числе, не является преградой для перемещения. Если в результате взрыва агент дезориентирован, то он на протяжении нескольких секунд он остается неподвижным, а по истечении меняет свой статус на $st_i = 3$.

При ЧС каждый из агентов, испытывая стресс и страх, перестает ориентироваться на комфортную скорость ходьбы и готов даже на бег. При этом в случае попадания агента в зону ранения при взрыве, его максимальная скорость бега претерпевает изменение пропорциональное близости к взрыву.

3. Результаты имитационного моделирования в AnyLogic

Для предложенной модели движения агентов (1) – (12) разработана имитационная модель в системе AnyLogic [25]. Для реализации модели движения толпы в системе AnyLogic была разработана

специальная процедура на языке программирования Java, вызываемая из события Event, вызываемого циклически в каждый момент модельного времени t . Особенностью данной процедуры является итерационное вычисление новых координат агентов с использованием системы принятия решений и дальнейшей передачей вычисленных координат в функцию, отвечающую за перемещение агентов с заданной скоростью. В результате возникновения ЧС, возникают эффекты «турбулентности» и «давки» (рис. 3) что приводит к гибели значительной части агентов. Данный результат полностью согласуется с результатами работы [1].

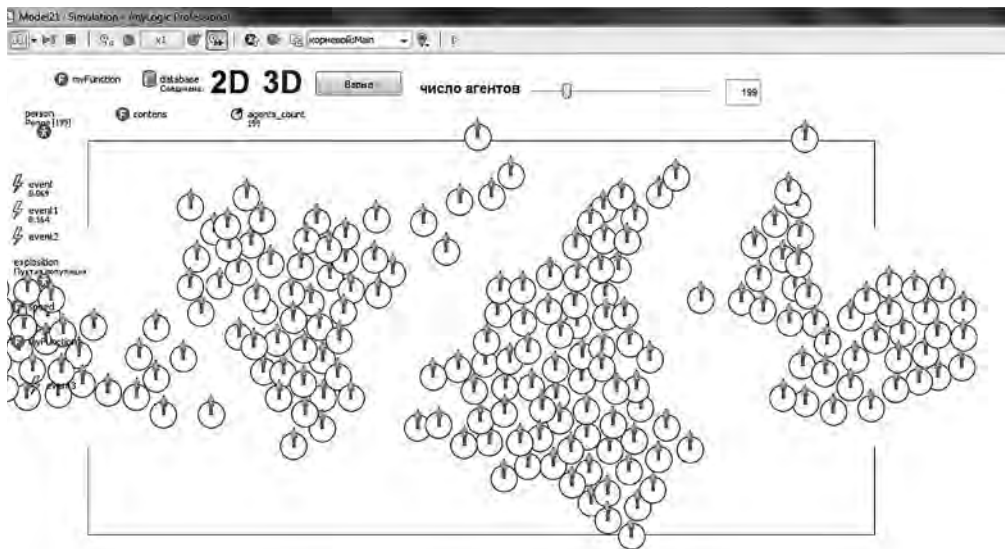


Рис. 2. Фрагмент презентационной части модели в AnyLogic: Распределение агентов до ЧС

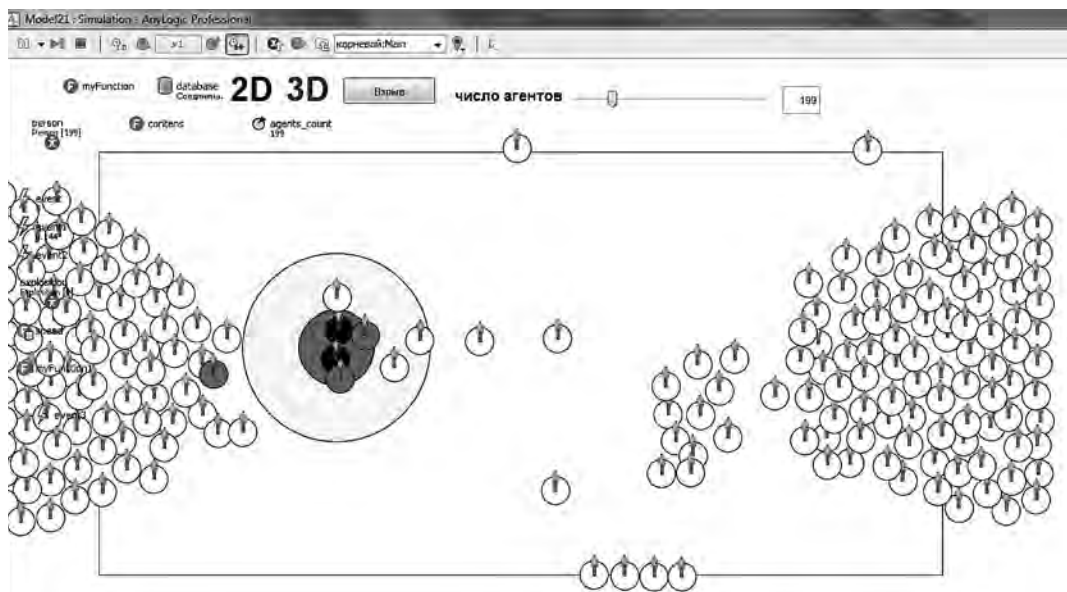


Рис. 3. Фрагмент презентационной части модели в AnyLogic: Распределение агентов после ЧС

4. Заключение

Основываясь на феноменологическом подходе, была формализована агентная модель поведения толпы при чрезвычайной ситуации, которая была реализована в виде имитационной модели в системе AnyLogic. Как возникающая динамика в рамках

такой модели, так и ее результаты согласуются с соответствующими характеристиками реальных процессов.

Полученные результаты предполагают дальнейшее развитие данного подхода с детальным учетом процедур кластеризации и динамики таксонов. ■

Литература

1. Akopov A.S., Beklaryan L.A. Simulation of human crowd behavior in extreme situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2012. Vol. 79, no. 1. P. 121–138.
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. 2000. no. 407. P. 487–490.
3. Helbing D., Farkas I., Molnar P., Vicsek T. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations // Pedestrian and evacuation dynamics. 2002, no. 21. P. 21–58.
4. Moussaïda M., Helbing D., Theraulaza G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // PNAS. 2011. Vol. 108, no. 17. P. 6884–6892.
5. Список погибших в клубе «Хромая лошадь». [Электронный ресурс]: <http://permloshad.narod.ru> (дата обращения 10.10.2014).
6. Число погибших в давке на фестивале в Камбодже превысило 450 человек. [Электронный ресурс]: <http://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html> (дата обращения 20.10.2014).
7. Mintz A. Non-adaptive group behavior // Journal of Abnormal Psychology. 1951. Vol. 46, No. 2. P. 150–159.
8. Лебон Г. Психология народов и масс. М.: Академический проект, 2011. 238 с.
9. Фрейд З. Психология масс и анализ человеческого «Я». М.: Азбука-Аттикус, 2013. 192 с.
10. Юнг К.Г. Психология бессознательного. М.: Канон+РООИ «Реабилитация», 2012. 320 с.
11. Андреева Г.М. Социальная психология. Учебник для высших учебных заведений. М.: Аспект-Пресс, 2001. 290 с.
12. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical review E. 1995. Vol. 51, no. 5. P. 4282–4286.
13. Аптуков А.М., Брацун Д.А. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Механика. 2009. № 3. С. 18–23.
14. Кирик Е.С., Круглов Д.В., Юргельян Т.Б. О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки // Журнал СФУ, Серия «Математика и физика». 2008. Т. 1, № 3. С. 266–276.
15. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior // Transportation Research Part B. 2006. Vol. 40, No. 8. P. 667–687.
16. Yu W., Johansson A. Modeling crowd turbulence by many-particle simulations // Physical review E. 2007. Vol. 76, no. 4. P. 046–105.
17. Аптуков А.М., Брацун Д.А., Люшнин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 3. С. 491–508.
18. Bratsun, D. Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building // Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012. Springer International Publishing, 2013. P. 659–663.
19. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2014. (в печати).
20. Официальный сайт коммерческого симулятора di-guy, имитирующего поведение больших масс людей. [Электронный ресурс]: <http://www.diguy.com/diguy> (дата обращения 2.11.2014).
21. Bohannon R.W. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants // Age and Ageing. 1997, Vol. 26, no. 1. P. 15–19.
22. Waters R.L., Hislop H.J., Thomas L., Campbell J. Energy cost of walking in normal children and teenagers // Developmental Medicine & Child Neurology. 1983. Vol. 25, no. 2. pp. 184–188.

23. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382. М.: МЧС России, 2009. 48 с.
24. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2014. 389 с.
25. Боев В.Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.

SIMULATION OF HUMAN CROWD BEHAVIOR BASED ON INTELLECTUAL DYNAMICS OF INTERACTING AGENTS

Armen BEKLARYAN

*Lecturer, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,
National Research University Higher School of Economics*

Address: 20, Myasnitskaya street, Moscow, 101000, Russian Federation

E-mail: abeklaryan@hse.ru

Andranik AKOPOV

*Professor, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,
National Research University Higher School of Economics*

Address: 20, Myasnitskaya street, Moscow, 101000, Russian Federation

E-mail: aakopov@hse.ru

This paper elaborates a phenomenological approach to simulation of human crowd behavior, proposed in study [1]. We consider a continuous stochastic agent-based model of human behavior in a confined space with a given geometry by using refinements of both an agent status and agent's decision-making system, presented in Helbing's models [2, 3, 4] (molecular approach).

Such integration seems to be the most promising development of this class of tasks due to the fact that the phenomenological approach (Beklaryan-Akopov's model) enables to introduce natural discretization of a task and then to calculate the increment of all agent's characteristics at any specific time, and the use of elements of the molecular approach (Helbing's model) enables to describe the most realistic decision-making system of an agent. This removes a complicated issue of numerical integration of Newton's equations underlying Helbing's model and offers explicit calculations of all system characteristics.

As a result, an agent based model has been devised in AnyLogic simulation modeling system, enabling to investigate agent movement dynamics with due regard to «the crowd effect» in various scenarios, in particular, in extreme situations, when exposure to «crowd crush» and «turbulence» effects exists.

Key words: simulation modeling, crowd dynamics, agent based modeling, AnyLogic.

Citation: Beklaryan A.L., Akopov A.S. (2015) Simulation of human crowd behavior based on intellectual dynamics of the interacting agents [Modelirovanie povedeniya tolpy na osnove intellektual'noj dinamiki vzaimodejstvujushih agentov]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 69–77 (in Russian).

References

1. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2012) Simulation of human crowd behavior in extreme situations. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 79, no. 1, pp. 121–138.
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. (2000) Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, no. 407, pp. 487–490.
3. Helbing D., Farkas I., Molnar P., Vicsek T. (2002) Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, no. 21, pp. 21–58.
4. Moussaïda M., Helbing D., Theraulaza G. (2011) How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *PNAS*, vol. 108, no. 17, pp. 6884–6892.
5. List of the dead in Lame Horse club. Available at: <http://permloshad.narod.ru> (accessed 10 October 2014).
6. The death toll in a crush at a festival in Cambodia has exceeded 450 people. Available at: [://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html](http://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html) (accessed 20 October 2014).
7. Mintz, A. (1951) Non-adaptive group behavior. *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 46, no. 2, pp. 150–159.
8. Lebon G. (2011) *Psihologija narodov i mass* [The crowd: a study of the popular mind]. Moscow: Akademicheskij proekt. (in Russian)
9. Frejd Z. (2013) *Psihologija mass i analiz chelovecheskogo «Ja»* [Group psychology and the analysis of the ego]. Moscow: Azbuka-Attikus. (in Russian)
10. Jung K.G. (2012) *Psihologija besoznatel'nogo* [Psychology of the unconscious]. Moscow: Kanon+ROOI «Reabilitacija». (in Russian)
11. Andreeva G.M. (2001) *Social'naja psihologija. Uchebnik dlja vysshih uchebnyh zavedenii* [Social psychology. Textbook for higher educational institutions]. Moscow: Aspekt-Press. (in Russian)
12. Helbing D., Molnar P. (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286.
13. Aptukov A.M., Bratsun D.A. (2009) Modelirovanie gruppovoj dinamiki tolpy, panikujushhej v ogranichenom prostranstve [Modeling crowd group dynamics panicked in a confined space]. *Bulletin of the Perm university. Mechanics*, no. 3, pp. 18–23.
14. Kirik E.S., Krouglov D. V., Yurgel'yan T.B. (2008) O diskretnoj modeli dvizhenija ljudej s jelementom analiza okruzhajushhej obstanovki [On discrete people movement model with environment analysis]. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, no. 1 (3), pp. 266–276.
15. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. (2006) Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B*, vol. 40, no. 8, pp. 667–687.
16. Yu W., Johansson A. (2007) Modeling crowd turbulence by many-particle simulations. *Physical review E*, vol. 76, no. 4, pp. 46–105.
17. Aptukov A.M., Bratsun D. A., Lyushnin A.V. (2013) Modelirovanie povedenija panikujushhej tolpy v mnogourovnevnom razvetvlennom pomeshhenii [Modeling of behavior of panicked crowd in multi-floor branched space]. *Computer Research and Modeling*, no. 5 (3), pp. 491–508.
18. Bratsun D. (2013) Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building. Proceedings of the *European Conference on Complex Systems 2012*, Springer International Publishing, pp. 659–663.
19. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2014) Agentnaja model' povedenija tolpy pri chrezvychajnyh situacijah [Agent behavior model of human crowd in emergency situations]. *Automation and Remote Control*. (in Russian, in press)
20. The official website of a commercial simulator di-guy imitating behavior of large numbers of people. Available at: <http://www.diguy.com/diguy> (accessed 2 November 2014).
21. Bohannon R.W. (1997) Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants. *Age and Ageing*, vol. 26, no. 1, pp. 15–19.
22. Waters R.L., Hislop H.J., Thomas L., Campbell J. (1983) Energy cost of walking in normal children and teenagers. *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 25, no. 2, pp. 184–188.
23. *Ob utverzhenii metodiki opredelenija raschetnyh velichin pozhnarnogo riska v zdanijah, sooruzhenijah i stroenijah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnej opasnosti*: Prikaz MChS Rossii ot 30.06.2009 № 382 [On approval of the procedure for determining the values of fire risk in buildings and structures of various classes of functional fire hazard: The order of Ministry of Emergency Situations of Russia from 30.06.2009 No. 382]. (2009). Moscow: MOE of Russian Federation. (in Russian)
24. Akopov A.S. (2014) *Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlja akademicheskogo bakalavriata* [Simulation modeling: the textbook and practical work for academic undergraduate]. Moscow: Urait. (in Russian)
25. Boev V.D. (2014) *Komp'yuternoe modelirovanie: Posobie dlja prakticheskijh zanjatij, kursovogo i diplomnogo proektirovanija v AnyLogic 7* [Computer modeling: the handbook for practical classes, course and diploma projects in AnyLogic 7]. St. Petersburg: VAS. (in Russian)