

## МОДЕЛЬ КОМАНДНОГО ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ\*

*Кулинич А.А., к.т.н., с.н.с.,  
ФГБУН ИПУ РАН, Москва  
e-mail: [kulinich@ipu.ru](mailto:kulinich@ipu.ru)*

/ Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-технической конференции (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). В 2-х томах. – М: Физматлит, 2015, Т.1. – с. 75-84.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках теории многоагентных систем был предложен ряд теоретических концепций, определяемых как теории командной работы агентов. Это теория общих намерений [1] и теория общих планов [2]. Эти две теории командной работы ориентированы на BDI (Belief-Desire-Intention) [3] – архитектуру агентов, которая считается основной при реализации интеллектуальных агентов. В рамках BDI архитектуры агентов описываются «ментальные» состояния агентов в терминах их убеждений, желаний (целей) и намерений. Задача теорий командной работы заключается в том, чтобы построить модели и методы согласования убеждений, желаний множества агентов, а также намерений для реализации их совместной работы. Естественно такое согласование требует многочисленных коммуникаций между агентами.

В теориях общих намерений и общих планов агенты часто не могут построить общий план, выполняя только частичные планы, многократно пересматривая их [4]. Для многих случаев моделирования командной работы оказывается достаточным использование агентов с простой реактивной архитектурой (стимул-реакция). Агент с реактивной архитектурой реагирует некоторым действием на любое изменение среды, в которой он находится. С помощью реактивных агентов реализуется, как правило, несложное командное поведение агентов – это образование стаи или роя агентов [5]. Исследуются

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-01-07900).

разнообразные алгоритмы обхода стаей (роем) агентов препятствий, уклонение от столкновения [6] и т.д.

Агенты с реактивной архитектурой могут решать и более сложные задачи, если определены правила их поведения в среде и модели среды их функционирования. Например, если предположить, что агенты рациональны и ведут себя в соответствии с некоторой функцией полезности, пытаясь ее максимизировать, то задачи коммуникации агентов для командной работы могут быть значительно сокращены.

Рассмотрим, например, методы, основанные на моделировании поведения агентов при образовании коалиций на основе теорий социального выбора и социальной зависимости субъектов [7]. Эти методы позволяют оперативно решать вопросы образования открытых динамических коалиций, состав которых может меняться в процессе решения задачи, а агенты могут свободно входить в состав коалиции или выходить из нее [7].

Использование в модели кооперации агентов известных закономерностей предметной области позволяет снизить сложность процесса коммуникаций между ними, повысить их автономность и возможности командной работы в динамических ситуациях.

В этой работе предложена модель кооперации агентов, основанная на моделях социального поведения, изложенных в работах социальных психологов Д. Хоманса [8] и Л. Фестингера [9]. В этих работах предложены: модель функционирования малых социальных групп (коалицию можно рассматривать как малую социальную группу) на основе обмена полезностями и концепция когнитивного диссонанса, позволяющая оценить субъективные ощущения агентов о справедливости в коалиции и моделировать ее устойчивость.

## 2. МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ КОАЛИЦИЙ

В работе [10] была предложена модель образования коалиций в условиях неопределенности. В модели использовался аппарат нечеткого моделирования. В предлагаемой работе рассматривается детерминированный вариант модели образования коалиции. Рассматривается множество агентов  $A$ , которые пытаются изменить состояние динамической системы на выгодное для каждого из них состояние. В качестве математической модели динамической системы используется качественная когнитивная карта [10]. В когнитивной карте определено множество факторов ситуации  $F = \{f_i\}$ , упорядоченное множество их лингвистических значений  $L_i = \{l_{ij}\}$ ,  $l_{ij} \prec l_{i,j+1}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ , и причинно-следственные отношения

между факторами –  $W$ . Динамика изменения факторов ситуации в когнитивной карте задается системой конечно-разностных логико-лингвистических уравнений:

$$(1) \quad Y(t+1) = W^\circ Y(t),$$

где  $W$  – система правил «Если, то», где  $W: \times_i L_i \rightarrow \times_i L_i$ ;  $Y(t)$  – состояние ситуации – это вектор лингвистических значений  $(l_{1j}, \dots, l_{nb})$ , т.е.  $Y(t) = (l_{1j}, \dots, l_{nb})$ ,  $l_{ij} \in L_i, \forall i, \circ$  – правило вывода.

Каждый агент характеризуется следующим кортежем:

$\langle g_q, r_q, e_q, \mu_q(Y_q, g_q) \rangle$ , где

1)  $g_q = (l_{1j}, \dots, l_{nb})$  – вектор целевых факторов и их лингвистических значений для агента  $q$ ;

2)  $r_q = (l_{1j}, \dots, l_{nb})$  – стратегия управления агента  $q$ , где  $r_q \in U_q$ ,  $U_q = \times_i L_{qi}^r$ ,  $L_{qi}^r \subseteq L_i$  – ресурсы агента  $q$ . Считается, что если агент  $q$  применяет стратегию  $r_q$  для достижения своей цели  $g_q$ , то прогноз развития ситуации на  $n$  шагах моделирования определится из соотношения (1) при условии, что  $Y_q(0) = r_q$ , т.е.

$$Y_q(1) = W^\circ r_q, Y_q(2) = W^\circ Y_q(1), \dots, Y_q(n) = W^\circ Y_q(n-1).$$

3)  $e_q \cdot (u(g_q), (v(r_q))) \rightarrow R^+$  – эффективность достижения агентом целевой ситуации, где  $u(g_q)$  – полезность целевой ситуации,  $u: g_q \rightarrow R^+$ ;  $v(r_q)$  – затраты агента для достижения целевой ситуации,  $v: r_q \rightarrow R^+$ ;

4)  $\mu_q(Y_q(n), g_q)$  – возможность достижения агентом  $q$  целевой ситуации за счет собственных ресурсов в условиях противодействия агентов противников.

При определении возможности достижения целевой ситуации считается, что в пространстве состояний  $(\times_i L_i)$  определена метрика  $\rho(a, b)$ ,  $a, b \in \times_i L_i$ . Тогда возможность достижения цели агентом определяется как близость прогнозной ситуации  $Y_q(n)$  и его целевой ситуацией  $g_q$ :

$$\mu_q(Y_q(n), g_q) = \rho(Y_q(n), g_q).$$

При этом прогноз развития ситуации  $Y_q(n)$  для каждого агента строится с учетом противодействия противников [10]. По сути, этот показатель определяет «силу» каждого агента коалиции без поддержки сторонников при условии противодействия противников.

Очевидно, что в качестве потенциальных сторонников в конфликтной ситуации необходимо выбирать агентов, цели которых близки. Сторонниками считается множество агентов с близкими целями, т.е.  $K \subseteq A$ ,  $\rho(g_i, g_q) \leq \varepsilon, \forall i, q \in K$ ,  $\varepsilon$  – критерий близости целей,

определяется экспертом. При этом остальные агенты  $AK$  считаются противниками коалиции. Близость целей агентов – это необходимые условия образования коалиции, не позволяющие судить об ее устойчивости.

В настоящей работе на основе теории социального поведения субъектов [8] анализируется взаимная полезность агентов при объединении их ресурсов для достижения общей цели. Считается, что дисбаланс во взаимной полезности агентов в коалиции создает у них ощущения несправедливости, которые увеличивают их мотивации выхода из коалиции, угрожающих ее устойчивости. Для оценки ощущений агентов о несправедливости в коалиции используется теория когнитивного диссонанса [9].

Агенты  $q$  и  $i$  называются взаимно полезными, если объединение их стратегий  $r_i \oplus r_q$  увеличивает возможность достижения целей  $(g_q, g_i)$  агентами  $q$  и  $i$  в условиях противодействия их противников. То есть если  $\mu(Y_{i+q}, g_i) < \mu(Y_i, g_i)$ ,  $\mu(Y_{i+q}, g_q) < \mu(Y_q, g_q)$ . Степень полезности  $P(i, q)$  агента  $q$  для агента  $i$  определяется из соотношения

$$(2) \quad P(i, q) = 1 - \frac{\mu(Y_{i+q}, g_i)}{\mu(Y_i, g_i)},$$

где  $\mu(Y_{i+q}, g_i)$ , – возможности достижения агентами  $q$  и  $i$  своих целей при объединении их стратегий;  $\mu(Y_q, g_q)$ ,  $\mu(Y_i, g_i)$  – возможности достижения агентами  $q$  и  $i$  своих целей собственными силами в условиях противодействия противников.

По критерию взаимной полезности коалиция  $K$  устойчива, если агенты коалиции одинаково полезны друг для друга  $P(i, q) = P(q, i)$ ,  $\forall i, q \in K$ , и имеют равную эффективность участия в коалиции, т.е.  $e_i = e_q$ .

Наличие дисбаланса взаимной полезности или эффективности агентов, включенных в коалицию, приводит к возникновению латентных конфликтов в коалиции, которые определяются уровнем когнитивного диссонанса агентов [9]. Когнитивный диссонанс вызывает у субъекта (агента) стремление уменьшить его или препятствовать его росту. Проявление этого стремления у агентов приводит к изменению его поведения [9], которое приводит к их выходу из коалиции, т.е. к неустойчивости коалиции. Степень когнитивного диссонанса по взаимной полезности между агентами  $i, q$  определяется из соотношения

$$(3) \quad D^W(q, i) = \frac{P(i, q) - P(q, i)}{P(i, q) + P(q, i)}, \quad D^W(q, i) = D^W(i, q), \quad \forall i, q, i \neq q.$$

Степень когнитивного диссонанса по эффективности между агентами  $i, q$  определится из соотношения

$$(4) \quad D^W(i, q) = \frac{e_i - e_q}{e_i + e_q}, \quad D^E(i, q) = -D^E(q, i), \quad \forall i, q, i \neq q.$$

По критерию когнитивного диссонанса устойчивая коалиция определится следующим образом: коалиция  $K$  устойчива, если для всех агентов  $i, q \in K$  их когнитивные диссонансы по полезности и эффективности близки к нулю:  $D^W(i, q) \approx 0, D^E(i, q) \approx 0, \forall i, q.$

### 3. МОДЕЛЬ КООПЕРАЦИИ АГЕНТОВ

На основе модели образования коалиций, предложена модель кооперации агентов. Модель кооперации рассмотрена на примере кооперативного взаимодействия агентов, играющих в футбол. Моделирование игры в футбол считается «полигоном» для демонстрации возможностей разнообразных методов искусственного интеллекта, определяющих поведение искусственных агентов [11].

Игру в футбол будем считать динамической системой. Параметры этой системы суть положение игроков (агентов) двух противоборствующих команд  $A = \{a_i\}$  и  $B = \{b_i\}$  на футбольном поле. Состояние футбольной игры как динамической системы будем характеризовать вектором положения всех игроков – агентов и мяча на плоскости в последовательные моменты времени:

$$(5) \quad Y(t) = (x_{a1}(t); y_{a1}(t)), \dots, (x_{b1}(t); y_{b1}(t)), Ball), \quad i = 1, \dots, N,$$

где  $N$  – число агентов обеих команд;  $t = 1, \dots, n$ ;  $Ball = (x_m(t); y_m(t))$  – координаты мяча.

Координаты ворот противников заданы интервалами: ворота команды  $A - G_A = (x_a; [y_{a1}, y_{a2}])$  и, соответственно, ворота команды  $B - G_B = (x_b; [y_{b1}, y_{b2}])$ .

Цели игроков команды  $A$  – забить мяч в ворота команды  $B$ , т.е.  $\forall a_i, g_{ai} = (x_m(t); y_m(t)) \mid (x_m(t); y_m(t)) \in (x_b; [y_{b1}, y_{b2}])$ , и, соответственно, игроков команды  $B$  – забить мяч в ворота команды  $A$ , т.е.  $\forall b_i, g_{bi} = (x_m(t); y_m(t)) \mid (x_m(t); y_m(t)) \in (x_a; [y_{a1}, y_{a2}])$ . То есть игроки каждой команды изменяют координаты мяча до тех пор, пока они не совпадут с координатами ворот противника.

Стратегии игроков (агентов) команд  $A(B)$  – это их действия на каждом шаге дискретного времени. Далее будем описывать поведения игроков команды  $A$ , предполагая что поведение игроков команды  $B$  описывается аналогично. Итак, действия игроков команд следующие:  $r_1(a_i, t)$  – движение к мячу;  $r_2(a_i, t)$  – движение с мячом к воротам;  $r_3(a_i, t)$  – удар по воротам;  $r_4(a_i, t)$  – перемещение в позицию паса;  $r_5(a_i, a_j, t)$  – пас партнеру по команде.

Любое из названных действий игроков изменяет состояние ситуации  $Y(t)$ .

Эффективность игрока – это соотношение его ожиданий вознаграждения за игру  $u(a_i)$  к результативности его игры  $v(r_q)$ . Результативность игрока выражается оценкой его результативных действий. Под результативными действиями понимаются действия:  $r_3(a_i)$  – удар по воротам и  $r_5(a_i, a_j, t)$  – пас партнеру по команде.

Возможность достижения цели игроками команд  $A(B)$  определяется ресурсами агента. В данном случае под ресурсами агента понимаются его индивидуальные характеристики и особенности его позиция на поле.

Будем рассматривать следующие характеристики позиции игрока:

- $d(a_i, G_B, t) = \rho((x_{ai}(t); y_{ai}(t)), (x_{a(b)}; [y_{a1}, y_{a2}]))$  – близость агента к воротам противника;
- $d(a_i, b_j, t) = \rho((x_{ai}(t); y_{ai}(t)), (x_{bj}(t); y_{bj}(t)))$  – близость противников, которые могут помешать игроку.

Индивидуальные характеристики игрока – это его индивидуальная скорость  $V(a_i)$  и его действия  $r_1(a_i, t), \dots, r_5(a_i, a_j, t)$ .

В работе [6] было показано, что полезными агентами для кооперации являются агенты, имеющие большую возможность достижения цели. Определим критерии полезности агента, выразив их через их возможности достижения цели, и определим их действия.

Агент  $a_i$  полезен своим партнерам по критерию близости к воротам противника ( $K_G^B$ ), если  $d(a_i, G_B) < d(a_q, G_B)$ ,  $i \neq q$ ,  $q = 1, \dots, N/2$ . То есть агент полезен, если он находится ближе всех своих партнеров к воротам противника. В этом случае значение этого критерия равно единице, т.е.  $K_G^B = 1$ .

Агент  $a_i$  полезен своим партнерам по критерию близости противников ( $K^B$ ), если  $d(a_i, b_j) > d(a_q, b_j)$ ,  $i \neq q$ ,  $q = 1, \dots, N/2$ ,  $j = N/2 + 1, \dots, N$ . То есть агент полезен, если он находится дальше всех своих партнеров от игроков противника. В этом случае значение этого критерия равно единице, т.е.  $K^B = 1$ .

Агент  $a_i$  полезен своим партнерам по критерию скорости ( $K^V$ ), если  $V(a_i) > V(a_q)$ ,  $i \neq q$ ,  $q = 1, \dots, N/2$ . То есть агент полезен, если его скорость больше скоростей остальных партнеров. В этом случае значение этого критерия равно единице, т.е.  $K^V = 1$ .

Интегральная характеристика полезности агента определяется значением функции:  $P(a_i) = F(K_G^B, K^B, K^V)$ .

В качестве одного из вариантов такой функции рассмотрим линейную свертку с коэффициентами предпочтений полезностей положения игрока –  $\alpha, \beta, \gamma$ , полученных с помощью процедуры парных сравнений. В этом случае,

$$P(a_i) = \alpha K_G^B + \beta K^B + \gamma K^V, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1.$$

Тогда  $P(a_i) = 1$  при  $K_G^B = K^B = K^V = 1$ , и  $P(a_i) = 0$  при  $K_G^B = K^B = K^V = 0$ .

#### 4. МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ

Правила поведения игроков предписывают им действия, которые способствуют командной работе для достижения цели. В этой работе рассмотрены два типа правил: командной игры; эгоистичного поведения.

Правило командной игры будем рассматривать для двух случаев: агент не владеет мячом; агент владеет мячом. Для агента, не владеющего мячом, определены следующие правила  $W_b = \{w_{b1}, w_{b2}\}$ :

- правило  $w_{b1}$ : если агент находится ближе к мячу, чем другие агенты команды, то он выбирает действие  $r_1(a_i, t)$  (движение к мячу);
- правило  $w_{b2}$ : если есть другой агент, который находится ближе к мячу, то агент выбирает действие  $r_4(a_i, t)$  (движение в позицию паса).

Для агента, владеющего мячом, выбор действия основан на анализе полезности партнеров по команде. В этом случае также определено множество правил  $W_{nb} = \{w_{nb3}, w_{nb4}, w_{nb5}\}$ :

- если полезность игрока, владеющего мячом, выше, чем полезность остальных партнеров, т.е.  $P(a_i) > P(a_q)$ ,  $i \neq q$ ,  $q = 1, \dots, N/2$ , то агент выбирает одно из следующих действий:
  - правило  $w_{nb3}$ : при большом расстоянии выбирается действие  $r_2(a_i, t)$  (движение с мячом к воротам);
  - правило  $w_{nb4}$ : при близком расстоянии выбирается действие  $r_3(a_i, t)$  (удар по воротам);
- правило  $w_{nb5}$ : если полезность игрока, владеющего мячом, ниже, чем полезность одного из партнеров, то выбирается действие

$r_5(a_i, a_j, t)$  – пас партнеру по команде ( $a_j$ ), имеющему большую полезность.

Правило эгоистического поведения применяется при наличии когнитивного диссонанса у агентов. Это правила  $W_e = \{w_{e1}, w_{e2}\}$ :

- правило  $w_{e1}$ : если игрок, владеющий мячом, выбирает действие  $r_5(a_i, a_j, t)$  – пас партнеру по команде ( $a_j$ ), имеющему большую полезность, и если когнитивный диссонанс этого игрока ( $a_i$ ) по отношению к партнеру ( $a_j$ ) близок нулю,  $D^E(a_i, a_j) \approx 0$ , то пас передается, т.е. выполняется действие  $r_5(a_i, a_j, t)$ ;

- правило  $w_{e2}$ : если игрок, владеющий мячом, выбирает действие  $r_5(a_i, a_j, t)$  – пас партнеру по команде ( $a_j$ ), имеющему большую полезность, и если когнитивный диссонанс этого игрока ( $a_i$ ) по отношению к партнеру ( $a_j$ ) больше нуля,  $D^E(a_i, a_j) > \varepsilon$ , то пас не передается, выполняются действия:  $r_2(a_i, t)$  – движение с мячом к воротам и (или)  $r_3(a_i, t)$  – удар по воротам. Здесь  $\varepsilon$  определяется экспертом как область нечувствительности к значениям диссонанса.

Иными словами, при эгоистическом поведении игрока он не передает пас наиболее полезному игроку, если этот игрок имеет большую эффективность, т.е. имеет лучшую результативность и получает большее вознаграждение. Эгоистический игрок действует самостоятельно, пытаясь повысить свою результативность (забить гол) и, соответственно, получить вознаграждение.

При описании игры в футбол агенты изменяют состояние системы на каждом дискретном шаге моделирования, используя для этого продукционные правила из множества правил  $W$ . Множество всех правил  $W = W_b \cup W_{nb} \cup W_e \cup W_{pl}$  назовем базой правил, где

- $W_b$  – множество правил поведения игрока, не владеющего мячом;
- $W_{nb}$  – множество правил поведения игроков, владеющих мячом;
- $W_e$  – множество правил эгоистического поведения;
- $W_{pl}$  – множество правил вычисления индивидуальных характеристик игроков по вектору состояния игры  $Y(t)$ .

Тогда уравнение динамики игры в футбол будет описано уравнением (1) базовой модели.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложенная модель кооперации агентов была исследована экспериментально. Для этого в среде моделирования многоагентных систем VisualBots for Excel [12] была разработана программа, моделирующая игру в футбол двух команд А и В, состоящих из



четырёх игроков. Агенты в каждой команде незначительно отличались по скорости. Считается, что все агенты получают вознаграждение пропорционально количеству забитых голов, независимо от выигрыша или проигрыша команды.

В качестве механизма взаимодействия агентов была рассмотрена модель с общей памятью. Суть этой модели заключается в том, что все агенты сохраняют координаты своего положения на поле в общей памяти и не общаются между собой непосредственно. Каждый агент может считать информацию об агентах своей команды или агентах из команды противника из общей памяти и на основе ее анализа (полезности игрока (агента)) принимать действия, описанные выше в теоретической модели.

Имитационное моделирование поведения агентов на основе анализа полезности агентов (без диссонансов) показало, что агенты с меньшими скоростями характеризуются меньшей результативностью по забитым голам, но не по количеству пасов партнерам. Это может быть интерпретировано как самоорганизация агентов в команде. То есть агенты с меньшей скоростью выполняют задачи защитников, а агенты с большей скоростью играют в нападении.

При моделировании поведения агентов с учетом диссонансов диссонансы учитывались только для игроков команды *A*. То есть все игроки команды *A* при передаче паса партнеру учитывают не только его полезность, но и диссонанс с партнером по эффективности. Если эффективность партнера выше, чем у игрока, передающего пас, то пас не передается. Этот игрок, из-за зависти или эгоистических соображений, пытается самостоятельно забить гол и получить вознаграждение.

Результативность распасовки игроков команды *A* при учете диссонансов агентов резко снизилась. Снижился и диссонанс по эффективности (забитым голам) – все игроки забивают одинаковое количество голов и, следовательно, получают равное вознаграждение. Игроки же команды *B*, играющие с «эгоистичной» командой *A*, повысили свою результативность [13].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель командной работы агентов на основе критериев полезности агентов и их когнитивных диссонансов. Модель основана на работах социальных психологов, исследовавших особенности поведения людей в малых социальных группах и объясняющих принципы их функционирования,

устойчивости, сплоченности и т.д. На основе предложенной модели разработана имитационная модель игры агентов (роботов) в виртуальный футбол. Разработанная имитационная модель позволяет моделировать различные аспекты командного поведения агентов.

## Литература

1. Cohen P., Levesque H.J. Teamwork. *Nous*, 25(4), (1991) Special Issue on Cognitive Science and Artificial Intelligence, P. 487-512.
2. Grosz B., Kraus S. Collaborative Plans for Complex Group Actions // *Artificial Intelligence*. – 1996. – №86. – P. 269–358.
3. Rao A.S., Georgeff M.P. BDI Agents: From Theory to Practice // *Proc. First International Conference on Multi-Agent Systems* (ed. V.Lesser). – AAAI Press/The MIT Press, 1995. – P. 312–319.
4. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор (Часть 1,2) // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2011. – №2. – С. 19–30, №3. – С. 34–47.
5. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // *Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (г. Орехово-Зуево, 22–23 сентября 2011)* – Орехово-Зуево, 2011. – С. 35–51.
6. Павловский В.Е., Кирикова Е.П. Моделирование управляемого адаптивного поведения гомогенной группы роботов // *Искусственный интеллект*. – 2002. – №4. – С. 596–605.
7. Conte R., Edmonds B., Moss S. and etc. Sociology and Social Theory in Agent Based Social Simulation // *A Symposium: Computational and Mathematical Organization Theory*. – 2001. – Vol. 7, №3. – P. 183–205.
8. Хоманс ДЖ. Социальное поведение как обмен. Современная зарубежная социальная психология. – М.: Издательство Московского университета, 1984. – С. 82–91.
9. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. – СПб.: Ювента, 1999. – С. 15-52.
10. Кулинич А.А. Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2012. – №2. – С. 95–106.
11. Охочимский Д.Е., Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н., Павловский В.В. Моделирование игры роботов-футболистов в пакете «Виртуальный футбол» // *Мехатроника*. – 2002. – №1. – С. 2–5.
12. Visual Bots. *Visual Programming for Agent-Based Simulation*. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.visualbots.com/downloads.htm> (дата обращения: 30.03.2015).

13. Кулинич А. А. Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход / Управление большими системами. Выпуск 51. М.: ИПУ РАН, 2014. С.174-196.