

## Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 2.

### Модели и алгоритмы формирования и функционирования команд агентов<sup>1</sup>

А.А. Кулинич

**Аннотация.** Предложен алгоритм построения качественной семиотической среды функционирования группой агентов, который заключается в представлении подпространств состояний динамической системы «группа роботов - среда» в виде качественного концептуального каркаса. Предложен алгоритм символизации классов состояний концептуального каркаса. В терминах качественной семиотической среды предложена математическая модель агента с BDI архитектурой. Сформулированы условия формирования и функционирования агентов с BDI архитектурой в этой среде.

**Ключевые слова:** *многоагентная система, агент, среда функционирования, символизация, качественная семиотическая среда.*

#### Введение

В первой части статьи [1] была определена многоагентная система как динамическая система «группа роботов - среда». Было показано, что пространство состояний этой динамической системы может быть интерпретировано как признаковое семантическое пространство и его представление в виде концептуального каркаса (частично упорядоченное множество классов состояний) может быть использовано в качестве модели знаний интеллектуальных агентов с BDI архитектурой о среде функционирования. Была предложена математическая модель качественной семиотической среды функционирования агентов, дано определение качественного концептуального каркаса этой среды. Сформулированы основные задачи исследования образования и функционирования команд агентов. Решение этих задач рассмотрено в этой статье.

#### 1. Построение семиотической среды функционирования группой агентов

В архитектуре реактивного агента его когнитивные функции: убеждения, целенаправленность и действия агента, реализуются разработчиком в виде алгоритмов его функционирования и отражают представления разработчика об основных понятиях предметной области, их признаках, возможных значениях и закономерностях. Это метазнания реактивных агентов и они неизменны.

Интеллектуальные агенты с BDI архитектурой обладают большей свободой выбора своего поведения, по сравнению с реактивными агентами. Одним из элементов их программной архитектуры, обеспечивающим эту свободу является метазнание, представленные в виде метаонтологии каждого агента. Основное отличие метазнаний реактивных агентов, которые фиксированы разработчиком, от метаонтологии интеллектуального агента заключается в том, что

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 16-11-00018) и гранта РФФИ (проект № 15-01-07900)

интеллектуальный агент может сам изменять свои убеждения, цели, предпочтения в зависимости от своего опыта работы и состояния среды функционирования.

Метаонтология – это самые общие знания агентов о правилах, методах организации знаний о предметной области, о принципах поведения и общения агентов, планирования деятельности, построения, организации и модификации собственных знаний о предметной области. Обычно метаонтология включает:

- Основные понятия предметной области  $D=\{d^H\}$ ;
- Множество свойств (признаков)  $(\{f_i\})$  этих понятий  $F=(\{f_i\}, Z_i)$ , и их значения  $Z_i$ ;
- Типы шкал значений признаков  $\{\text{числовые, качественные, номинальные, отношений}\}$ .
- Типы отношений. Это отношения: «Род-Вид», заданные на множестве понятий предметной области, т.е.  $R\subseteq D\times D$ ; причинно-следственные отношения на множестве возможных значений признаков, т.е.  $W\subseteq \times_i Z_i$ , определяющие поведение агентов.
- Правила коммуникации агентов.

Метаонтология определяет основные элементы («кирпичи»)  $(D, F)$ , из которых каждый агент будет строить (модифицировать и т.д.) свою модель знаний о предметной области. Агентами могут быть построены различные модели предметной области, важно, чтобы «строительный материал» всех агентов был представлен в метаонтологии. Это создаст условия для коммуникации агентов на понятном всем им языке.

Реализация социальной способности интеллектуальных агентов (их коммуникации) связана со структурой модели предметной области каждого агента. Агенты должны строить свою онтологию, опираясь на общие правила построения онтологии. В этой работе правила построения агентами своей онтологии задает качественный концептуальный каркас, который, по сути, является идеализированной качественной онтологией предметной области. В этом случае, онтология любого агента будет частью концептуального каркаса предметной области, и коммуникация между агентами будет осуществляться с помощью понятных всем агентам имен классов состояний концептуального каркаса.

Рассмотрим методы и алгоритмы построения агентами, на основе общих знаний, определенных в метаонтологии, концептуального каркаса среды функционирования, согласования имен классов состояний и определения собственной понятийной системы.

Допустим, что у каждого агента есть ресурсы, которые позволяют ему изменять значения своих свойств (признаков) и, следовательно, состояние среды функционирования (системы «Группа роботов-Среда»). Под ресурсом агента мы понимаем: название признака среды функционирования и диапазон значений признака, в рамках которых агент может эти значения изменить. То есть, ресурс по  $j$ -у признаку  $i$ -о агента  $f_{ij}$  - это пара:  $(f_{ij}; \{Z_{ij}^R\})$ , где  $Z_{ij}^R=\{z_{ije}, \dots, z_{ijq}\}\subseteq Z_{ij}$  – множество значений  $j$ -о свойства. Если агент может изменить значения нескольких своих свойств, то тогда его ресурсы будут заданы как вектор, например, для агента 1 – это вектор:  $(f_{11}; Z_{1j}^R), \dots, (f_{1m}; Z_{mj}^R)$ .

Итак, для  $N$  агентов, каждый из которых знает только о своих ресурсах, запишем:

$$\begin{aligned}
 & (f_{11}; Z_{1j}^R), \dots, (f_{1m}; Z_{mj}^R); \\
 & \dots\dots\dots \\
 & (f_{n1}; Z_{1j}^R), \dots, (f_{nm}; Z_{mj}^R).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Первая задача заключается в том, чтобы по имеющейся у агентов информации о ресурсах: 1) построить общий для всех агентов концептуальный каркас среды функционирования; 2) договориться об искусственных именах классов состояний концептуального каркаса; 3) определить свою понятийную систему, в терминах искусственных имен концептуального каркаса.

Вторая задача заключается в определении модели агента с BDI архитектурой и условий их совместного функционирования в этой среде.

Алгоритм решения первой задачи основан на обмене информацией, например, через «доску объявлений», включает следующие шаги, выполняемые каждым агентом:

- 1) Передача информации о собственных ресурсах на «доску объявлений» для определения среды возможного совместного функционирования.
- 2) Определение базового класса состояний концептуального каркаса среды функционирования;
- 3) Построение концептуального каркаса среды функционирования и символизация классов состояний;
- 4) Определение собственной понятийной системы.

**Определение среды совместного функционирования.** На первом шаге алгоритма агенты помещают информацию о своих ресурсах на «доску объявлений». Для определения пространства совместного функционирования агенты, по имеющейся информации (1) объединяют значения одноименных ресурсов всех агентов. Т.е.

$$(f_{\cup 1}; Z_1^{R\cup}), \dots, (f_{\cup m}; Z_m^{R\cup}), \tag{2}$$

где  $Z_j^{R\cup} = \bigcup_{i=1}^n Z_{ij}^R$  линейно упорядоченное множество объединенного  $j$ -о ресурса.

**Определение 1.** Средой возможного совместного функционирования агентов будем называть прямое произведение объединения их ресурсов по всем свойствам, т.е.  $FS^* = \times \bigcup_{j=1}^n Z_{ij}^R$ .

Например, есть два агента: *Агент 1* и *Агент 2*, которые знают, что они находятся на плоскости, имеющей два свойства:  $\{X, Y\}$ , и могут изменить свое положение на плоскости, изменив тем самым состояние среды функционирования. Это их метазнания – метаонтология.

У агента 1 есть ресурс, который позволяет ему перемещаться только по координате X, т.е. горизонтально:  $X_1 = \{x_{1i}\}$ ,  $x_{1i} \in [0,1]$ ,  $Y_1 = y_{1j}$ ,  $y_{1j} = \text{const}$ , а у агента 2 есть ресурс, позволяющий ему перемещаться только по координате Y, т.е. вертикально:  $Y_2 = \{y_{2j}\}$ ,  $y_{2j} \in [0,1]$ ,  $X_2 = x_{2i}$ ,  $x_{2i} = \text{const}$ . Объединение ресурсов:  $Y_1 \cup Y_2 = [0,1]$  и  $X_1 \cup X_2 = [0,1]$ . Тогда объединенные ресурсы это вектор:  $(f_{\cup X}; [0,1], f_{\cup Y}; [0,1])$ , а среда совместного функционирования агентов это произведение:  $FS^* = [0,1] \times [0,1]$ .

**Определение базового класса состояний.** Для определения базового класса состояний концептуального каркаса агенты определяют границы (максимальное и минимальное значение) одноименных ресурсов и находят среднее значение для каждого ресурса по правилам:

- а) Если значения ресурсов численные, то среднее значение находим по формуле:

$$z_{ijcp} = (\max(\bigcup_{i=1}^n Z_{ij}^R) - \min(\bigcup_{i=1}^n Z_{ij}^R)) / 2, \forall z_{ij} \in \bigcup_{i=1}^n Z_{ij}^R | z_{ij} \in R.$$

б) Если значения ресурсов представлены упорядоченным множеством лингвистических значений,  $(\{z_{ie}, \dots, z_{iq}\}, \succ)$ , то эти значения отображаем на отрезок числовой оси, т.е.  $\{z_{ie}, \dots, z_{iq}\} \rightarrow \{x_{ie}, \dots, x_{iq}\}, x_{ij} \in [0, 1]$ , и далее вычисляем среднее по ранее приведенной формуле.

в) Если значение ресурса представлено в номинальной шкале, то значения признаков необходимо упорядочить (по правилу, заложенному в метаонтологию агента, например, по алфавиту) и далее применяя пункты а) и б) найти среднее значение параметра.

Далее каждый агент определяет границы базового класса, которые представляются как положительное и отрицательное отклонение от среднего значения признака. Поскольку значения признаков численные, то границы базового класса можно определить в процентах отклонений от среднего значения, например,  $\varepsilon = \pm 10-15\%$ .

Обозначим базовый интервал значений для  $j$ -о признака через  $\Delta_j = [z_{je}^b; z_{jq}^b]$ , где  $z_{je}^b = z_{ijcp} - 0,1(z_{ijcp})$ ,  $z_{jq}^b = z_{ijcp} + 0,1(z_{ijcp})$ . Тогда базовый класс состояний определится как прямое произведение базовых интервалов всех признаков, т.е.  $SS(d^0) = \times_j \Delta_j$  (Рис.1).

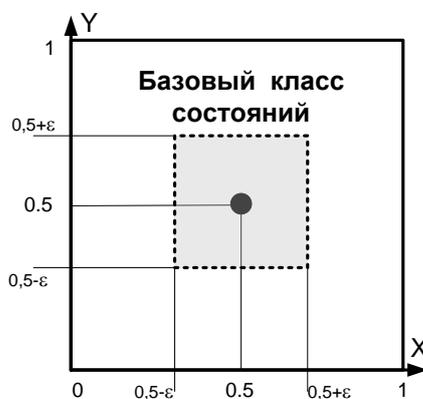


Рис. 1. Базовый класс состояний среды функционирования

Поскольку все агенты работают по одному и тому же алгоритму, базовый класс состояний у всех будет одинаков.

**Построение и символизация концептуального каркаса среды функционирования.** Базовый класс состояний – это «идеальная точка» для всех агентов, относительно которой будет строиться концептуальный каркас, и символизироваться среда функционирования.

Общий принцип символизации среды функционирования заключается в качественном кодировании интервалов значений признаков множеством символов, например,  $Z_j^Q \in \{0, 1, 2\}$ . Качественные значения ( $Z_j^Q$ ) обозначают интервалы (подмножества) значений признаков и определяются по следующему правилу:

$$Z_j^Q = \begin{cases} 0, & \text{если } z_j \in [z_{je}^b; z_{jq}^b] \\ 1, & \text{если } \max(Z_j^{R\cup}) \geq z_j > z_{jq}^b; \\ 2, & \text{если } \min(Z_j^{R\cup}) \leq z_j < z_{je}^b. \end{cases} \quad (3)$$

Т.е., значения признака  $z_j \in Z_j$ , попадающие в интервал значений признака базового класса кодируются цифрой 0, превышающее значение базового интервала, цифрой 1, а если значение признака меньше базового значения, то, соответственно, 2.

**Определение 2.** Упорядоченное множество  $Z_i^Q$  качественных значений  $i$ -о признака ( $f_{il}; Z_{ij}^R$ ) будем называть его качественным доменом.

Построение концептуального каркаса заключается в определении: имен классов состояний и подпространств среды функционирования, соответствующих этим именам.

**Определение 3.** Именем класса состояний качественной среды функционирования будем называть конкатенацию подмножеств прямого произведения качественных значений всех признаков среды функционирования, т.е.  $d^{name}$ , где  $name = K(\{*\})$ ,  $K$  – операция конкатенации,  $\{*\} \in \times_i Z_i^Q$ .

Например, есть два признака, качественные значения которых равны:  $Z_1^Q = \{0, 1, 2\}$  и  $Z_2^Q = \{0, 1, 2\}$ . Их прямое произведение  $(Z_1^Q \times Z_2^Q)$  равно:  $\{\{0,0\}; \{0,1\}; \{0,2\}; \{1,0\}; \{1,1\}; \{1,2\}; \{2,0\}; \{2,1\}; \{2,2\}\}$ , а конкатенация подмножеств этого произведения равна:  $\{\langle 00 \rangle; \langle 01 \rangle; \langle 02 \rangle; \langle 10 \rangle; \langle 11 \rangle; \langle 12 \rangle; \langle 20 \rangle; \langle 21 \rangle; \langle 22 \rangle\}$ . Все элементы этого множества образуют множество имен классов состояний:  $\{d^{00}, d^{01}, d^{02}, d^{10}, d^{11}, d^{12}, d^{20}, d^{21}, d^{22}\}$ .

**Утверждение 1.** Элементы прямого произведения качественных доменов  $Z_i^Q$  признаков среды функционирования однозначно определяют подпространства классов состояний в концептуальном каркасе среды функционирования.

Например, подмножество  $\{0,0\}$  согласно правилу (3) определяет базовые интервалы по первому  $[z_{1e}^b; z_{1q}^b]$  и по второму признаку  $[z_{2e}^b; z_{2q}^b]$ , а их произведение,  $SS(d^{00}) = [z_{1e}^b; z_{1q}^b] \times [z_{2e}^b; z_{2q}^b]$  дает нам базовый класс состояний. Для случаев, когда качественное значение одного из признаков принимает 1, т.е. значение признака превышает базовый интервал, при определении подпространства класса состояний в качестве интервала берем интервал  $[z_{ie}^b; \max(Z_j^{R\cup})]$ , а если 2, т.е. значение меньше базового интервала, то  $[\min(Z_j^{R\cup}); z_{iq}^b]$ .

**Утверждение 2.** Искусственные имена классов состояний определяют подпространства классов состояний среды функционирования.

Это утверждение очевидно вытекает из утверждения 1. Например, подмножество  $\{0,1\}$  определяет подпространство класса состояний  $SS(d^{01}) = [z_{1e}^b; z_{1q}^b] \times [z_{ie}^b; \max(Z_j^{R\cup})]$  с именем  $d^{01}$ , а подмножество  $\{0,2\}$ , соответственно,  $SS(d^{02}) = [z_{1e}^b; z_{1q}^b] \times [\min(Z_j^{R\cup}); z_{iq}^b]$  с именем  $d^{02}$ .

**Утверждение 3.** Имена классов состояний среды функционирования ( $d^H$ ) образуют частично упорядоченное множество  $(\{d^H\}, \leq)$  по включению подпространств этих классов, т.е. концептуальный каркас среды функционирования,  $KK^W$ .

Действительно, подпространство  $SS(d^{00})$  включено в подпространства  $SS(d^{01})$  и  $SS(d^{02})$ , т.е.  $SS(d^{00}) \subseteq SS(d^{01})$ ,  $SS(d^{00}) \subseteq SS(d^{02})$ , и т.д. Вложенные подпространства и образуют частично упорядоченное множество – концептуальный каркас [3].

Поскольку каждый агент, обмениваясь информацией о своих ресурсах, построил концептуальный каркас среды функционирования и символизировал его, пользуясь одинаковыми алгоритмами, можно говорить, что имена классов состояний согласованы.

**Определение 4.** Частично упорядоченное множество имен классов состояний среды функционирования,  $(\{d^H\}, \leq)$ , однозначно определяющие подпространства среды функционирования  $(SS(d^H))$  будем называть качественной семиотической средой функционирования группы агентов.

**Построение агентами собственных понятийных систем.** Следующий шаг – построение агентами собственной понятийной системы о среде функционирования.

**Определение 5.** Понятийной системой агента будем называть частично упорядоченное множество имен классов состояний полученное прямым произведением качественных доменов всех его ресурсов  $D_i = (\{d_{ij}^{name}\}, <)$ , где  $name = K(\{*\})$ ,  $K$  – операция конкатенации,  $\{*\} \in \times_i Z_i^{OR}$ , где  $Z_i^{OR}$  – качественные домены всех ресурсов  $i$ -о агента.

**Определение 6.** Понятийной системой возможного совместного функционирования множества агентов будем называть объединение их понятийных систем, т.е.  $D^\cup = \cup_i D_i$ .

Например, пусть у агента 1 есть возможность изменять значения параметра  $Y$  только в пределах базового класса, т.е.  $Z_{1Y}^O = \{0\}$ , а значение параметра  $X$  он может изменять больше и меньше значения базового класса, т.е. качественные значения его ресурсов равны:  $Z_{1X}^O = \{0, 1, 2\}$ .

Знания этого агента о классах среды функционирования определим (Рис.2):  $Z_{1X}^O \times Z_{1Y}^O = \{0, 1, 2\} \times \{0\} = \{\{0, 0\}, \{1, 0\}, \{2, 0\}\}$ , или в именах классов состояний  $D_1 = \{d^{00}, d^{10}, d^{20}\}$ .

Агент 2 по координате  $X$  может находиться в состояниях, когда его значения меньше значения  $X$  базового класса,  $Z_{2X}^O = \{2\}$ , а по координате  $Y$  ресурсы позволяют ему переходить в классы  $\{0, 1, 2\}$ , т.е.  $Z_{2Y}^O = \{0, 1, 2\}$ . Тогда его знания определяться из соотношения:  $Z_{2X}^O \times Z_{2Y}^O = \{2\} \times \{0, 1, 2\} = \{\{2, 0\}, \{2, 1\}, \{2, 2\}\}$ , или в именах классов состояний  $D_2 = \{d^{20}, d^{21}, d^{22}\}$ , (Рис.2).

Объединение понятийных систем агентов 1 и 2, т.е. объединение имен классов состояний их понятийных систем дает нам область их совместного функционирования:  $D^\cup = D_1 \cup D_2 = \{d^{00}, d^{10}, d^{20}, d^{21}, d^{22}\}$ , (Рис.2).

На рисунках 3 и 4 представлены диаграммы Хассе понятийных систем агентов 1 и 2. На рис. 5 показана диаграмма Хассе понятийной системы совместного функционирования агентов 1 и 2.

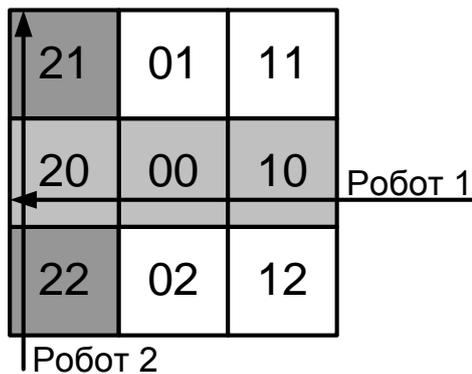


Рис.2. Подпространства классов состояний понятийной системы агентов 1 и 2.

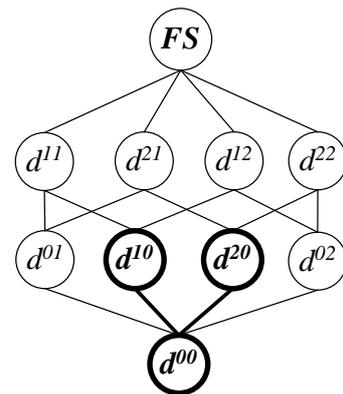


Рис.3. Диаграмма Хассе понятийной системы агента 1.

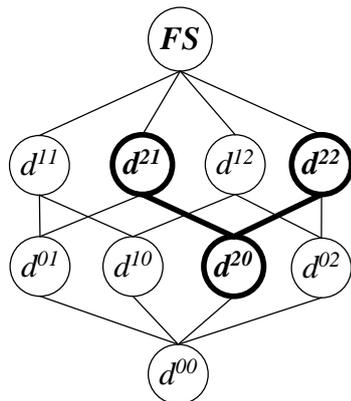


Рис.4. Диаграмма Хассе понятийной системы агента 2.

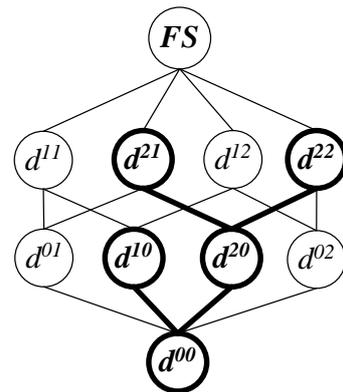


Рис.5. Диаграмма Хассе понятийной системы совместного функционирования агентов 1 и 2.

## 2. Модель агента с BDI архитектурой в семиотической среде

В терминах предложенной семиотической модели среды функционирования, представим элементы *BDI* (*Belief-Desire-Intention*) архитектуры агентов.

**Убеждения агентов** (*Belief*) – это его знания о среде функционирования, включающие две составляющие -  $\langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle$ .

Первая,  $BEL_i$  – убеждения (знания агента о среде функционирования) *i*-о агента формально представляются в виде частично упорядоченного множества имен классов состояний этой среды, доступных для этого агента, т.е.

$$BEL_i = (\{d^H\}, \leq), d^H \Leftrightarrow SS_i(d^H) \subseteq KK^W, BEL_i \subseteq KK^W.$$

Объединение убеждений всех агентов определяет понятийную систему их возможного совместного функционирования  $FS^*$ , которая является частью концептуального каркаса предметной области  $KK^W$ , т.е.,  $\cup_i BEL_i = FS^* \subseteq KK^W$ .

Вторая составляющая убеждений – это знания агента о закономерностях среды функционирования, которые определяется как отображение:

$$W_i^{BEL}: \varphi(\times Z_{ji}) \rightarrow \varphi(\times Z_{ji}),$$

где  $\times Z_i$  - векторы значений признаков агентов,  $\varphi(\times Z_{ji}) \in SS_{ji}(d^H)$ ,  $d^H \in BEL_j$ ;  $\varphi$  - соответствие векторов значений признаков классам состояний среды функционирования,  $W_i^{BEL}$  - множество правил продукций (Если, То), отражающих закономерности среды функционирования.

Отметим, что знания о закономерностях  $W_i^{BEL}$  относятся к той части предметной области, о которой знает  $i$ -й агент, т.е. он знает о закономерностях в области своих убеждений  $BEL_i$ .

**Цели агентов (Desire)** – это целевое состояние среды функционирования в виде вектора  $G_i = (z_{1i}, \dots, z_{1hi}, \dots; z_{ni}, \dots, z_{nr}), z_{ij} \in Z_i$ .

Элементы вектора  $(z_{ji}, \dots, z_{jh}) \in G_i, \forall j$ , определяют желаемые значения свойств каждого из агентов ( $j=1, \dots, N$ ) в среде функционирования.

Цель агента может быть записана в терминах имен классов среды функционирования. В этом случае цель определяется именем  $(d_j^{Gi})$  класса состояния среды, в котором должен находиться  $j$ -й агент, а имя, соответственно, определяет подпространство  $(SS(d_j^{Gi}))$ ,  $(\varphi: (G_i) \rightarrow SS(d_j^{Gi}))$ ,  $d_j^{Gi} \Leftrightarrow SS(d_j^{Gi})$ :

$$DES_i = (d_1^{Gi}; d_2^{Gi}; \dots; d_n^{Gi}), d_j^{Gi} \Leftrightarrow SS_j(d^H) \subseteq KK^W, \forall i, j, i, j = 1, \dots, N.$$

Далее, для случаев, когда агенту все равно в каком классе состояний будет находиться тот или иной агент мы будем пользоваться символом «?». Например, вектор цели  $DES_1 = (?; d_2^{00}; ?)$  означает, что цель агента 1 заключается в том, чтобы агент 2 находился в классе состояний  $d_2^{00}$ , при этом неважно в каком состоянии будут находиться агенты 1 и 3.

При таком задании цели агентов, возможны конфликты целей. Например, если цели агентов 1 и 3, соответственно, равны:  $DES_1 = (?; d_2^{00}; ?)$  и  $DES_3 = (?; d_2^{01}; ?)$ , то между агентами 1 и 3 возникает конфликт относительно класса состояний агента 2, то ли он должен находиться в классе  $d_2^{00}$ , то ли в классе состояний  $d_2^{01}$ . Ситуации с конфликтами цели и вопросы их разрешения, в этой работе не рассматриваются.

**Действия агентов (Intention).** Агенты способны изменить состояние среды функционирования, изменяя значения собственных свойств, при наличии у них ресурсов. Количественно ресурс измеряется интервалами значений признаков (свойств) агентов, которые они могут изменить, т.е. ресурс  $i$ -о агента по  $j$ -му признаку (свойству) это  $Z_{ij}^R = \{z_{ijk}, \dots, z_{ijn}\}$ ,  $Z_{ij}^R \in Z_{ij}$ ,  $Z_{ij}$  - строго упорядоченное множество значений  $j$ -о признака (свойства)  $i$ -о агента. Если у  $i$ -о агента есть ресурсы по нескольким свойствам, то применять их он может в разных сочетаниях, т.е. ресурсы агента представляется в виде множества векторов:  $\times_j Z_{ij}^R$ .

**Определение 7.** Действием агента будем называть вектор изменений значений признаков (свойств) агента, направленный на достижение цели, т.е.  $U_i(t) = (u_{i1}, \dots, u_{in}), u_{in} \in Z_{ij}, U_i \in \times_j Z_{ij}^R$ .

В семиотической среде функционирования действия агента могут быть представлены в виде множества имен классов состояний среды функционирования:

$$INT_i = \{d_j^{Ui}\},$$

где  $d_j^{Ui}$  – имя класса состояний действия, которое определяет его содержание  $SS(d^{Uj})$ .

Таким образом, агента с BDI архитектурой в семиотической среде функционирования будем определять следующим кортежем:

$$\langle \langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle, DES_i, INT_i \rangle. \quad (4)$$

### 2.1. Совместное поведение агентов в семиотической среде

Обычно агент, чтобы изменить свойства среды функционирования для достижения собственной цели или общей цели группы агентов (команды) предпринимает ряд последовательных действий.

**Определение 8.** Последовательность действий агента  $U_i(t)$ ,  $t=1, \dots, m$ , направленное на достижение им цели называется поведением агента.

Изменение состояния среды  $i$ -м агентом осуществляется с учетом его знаний о среде  $W_i$ . В общем виде совместное поведение агентов может быть выражено системой конечно-разностных уравнений:

$$\begin{aligned} Z(t+1) &= W_1^\circ(Z(t) \oplus U_1(t)), \\ &\dots\dots\dots \\ Z(t+1) &= W_n^\circ(Z(t) \oplus U_n(t)). \end{aligned} \quad (5)$$

где  $^\circ$  - правило вывода,  $Z(t+1)$ ,  $Z(t)=(z_1, \dots, z_q)$  – состояние среды – это векторы значений признаков в моменты времени  $t$ ,  $U_i(t) \in \times_j R_{ij}$ ,  $\forall i$  – вектор управляющих воздействий  $i$ -о агента в моменты времени  $t$ ,  $\oplus$  - правило агрегации значений признаков и управляющих воздействий,  $W_i$  - известные агенту закономерности среды функционирования, заданные в виде отображения:

$$W_i: \times_i Z_i \rightarrow \times_i Z_i, \forall i.$$

Отметим, что в уравнениях (5) состояния среды в последовательные моменты времени  $Z(t+1)$ ,  $Z(t)$  для каждого  $i$ -о агента одинаковы. Отличаются они индивидуальными знаниями ( $W_i$ ) и действиями ( $U_i(t)$ ), которые агенты принимают для достижения поставленной цели.

Агенты с разными целями будут действовать самостоятельно для их достижения. Если же у части агентов есть общая цель, то образуется группа агентов, действия которых естественным образом агрегируются для достижения этой общей цели. В такой группе агентов не предполагается координация их действий на основе обмена информацией.

В терминах семиотической среды функционирования изменение состояния среды  $i$ -м агентом, с учетом его знаний о среде  $W_i^{BEL}$ , система уравнений (5) может быть выражена системой логико-лингвистических уравнений:

$$W_i^{BEL}: (Z^*(t), INT^*_i) \rightarrow Z^*(t+1), \forall i, \quad (6)$$

где  $W_i^{BEL}$  – знания  $i$ -го агента (система правил «Если, То»),  $Z^*(t) = \varphi(Z(t))$ , – начальный вектор состояния среды в терминах имен классов состояний,  $INT^*_i \in \times_i INT_i$  – управление (действие агента),  $Z^*(t+1) = \varphi(Z(t+1))$  состояние среды после управления в терминах имен классов состояний.

**Действия агентов.** Формально поиск действий для достижения заданного вектора цели каждым агентом можно найти подстановкой в левые части уравнения (5) целей агентов

$G_i=(z_{1i}, \dots, z_{1h}, \dots; z_{nk}, \dots, z_{nr})$  и решить уравнения (5) для каждого агента относительно управляющих воздействий  $U_i$ .

Если выразить цель агентов в терминах приращений значений признаков до целевого состояния, т.е.  $G_i^* = G_i - Z(t)$ , то решение обратной задачи для каждого агента запишется в следующем виде:

$$U^* = G_i^* \circ W^l, \forall i \quad (7)$$

где  $U^*$  - действия агентов, позволяющие достичь цели  $G_i^*$ ,  $\circ$  - процедура обратного вывода. Решение обратной задачи не единственно – это множество решений  $U^* = \{U_i\}$ , где  $U_i$  – векторы изменения значений свойств, позволяющие достичь цели.

Множество решений может быть представлено в терминах имен классов состояний среды функционирования,  $INT_i(t) = \{d_i^{Uj}\}$ , где  $d_i^{Uj} = \varphi(z_i(t) \oplus U_j)$ . Тогда решение обратной задачи (7) в терминах имен классов состояний концептуального каркаса среды функционирования перепишем в виде:

$$INT_i^* = DES_i \circ W_j^{BEL}. \quad (8)$$

В модели семиотической среды функционирования агента решение обратной задачи можно рассматривать как поиск путей между целевым и текущим классами состояний в понятийной системе среды совместного функционирования. Например, на диаграмме Хассе области совместного функционирования (см. рис.5), пути от целевой вершины  $d^{21}$  или  $d^{22}$  к вершине  $d^{00}$  дает нам два решения, проходящие через вершину  $d^{20}$ . Однако, агент 1 не может попасть в эти целевые вершины без договоренностей с агентом 2 (поскольку они принадлежат понятийной системе агента 2). Для достижения такого рода целей далее мы рассмотрим вопросы, связанные с социальностью агентов, т.е. вопросы их коммуникации.

## 2.2. Социальность агентов (коммуникации) в качественной среде функционирования

Приведенная выше модель агента (4) в качественной семиотической среде и модель совместного поведения (5) – это модель поведения агентов, не предполагающая обмена агентами информацией о собственных состояниях и ресурсах. Отсутствие коммуникаций между агентами сильно ограничивает возможности команды агентов решать разнообразные задачи.

Обычно рассматриваются два подхода к коммуникации агентов для решения общей задачи. Первый предполагает коммуникации до решения общей задачи для согласования действий всех агентов для достижения цели, а второй, предполагает коммуникации в процессе решения задачи. Например, в работе [2] был предложен итерационный алгоритм коллективного поведения агентов, в котором до начала решения задачи строится общий план решения, на основе обмена информацией агентами о выбранных агентами действиях. Такой же подход применяется и в теоретической модели общих планов [4].

Однако, алгоритмы совместной работы, основанные на построении общего плана, плохо работают в динамических средах, в условиях наличия в среде функционирования агентов с противоположными целями, действия которых могут привести к непрогнозируемым изменениям

состояния среды функционирования, что потребует от команды агентов перестройки существующего плана или построения нового.

Второй подход – это, по сути, ситуационная кооперация между агентами, когда решение о совместных действиях принимаются агентами на каждом такте работы на основе анализа состояния среды функционирования и наличия у агентов условий для кооперации. Такой подход может быть применен в моделях команд, основанных на теории социального выбора и социальной зависимости [5]. В этом случае глубина планирования на каждом шаге совместных действий не высока – один шаг. Выбор действия агента, основанный на критерии рациональности поведения, позволяет выбрать одно, лучшее действие. В качестве условия для кооперации агентов может быть рассмотрен критерий взаимной полезности агентов, предложенный в работе [6]. По этому критерию в качестве партнера выбирается агент, взаимодействие с которым максимально полезно обоим агентам. Поскольку глубина планирования невысока, а выбор действий и выбор партнера, основанные на критериях рациональности, единственны, то и нет комбинаторного взрыва возможного поведения группы агентов. Такой подход исследовался в работе [6] при моделировании динамической системы игры в виртуальный футбол. Далее мы будем рассматривать условия совместной работы агентов в рамках такого подхода.

Итак, в векторе цели агента  $DES_i$  в качестве целевого состояния может быть определено состояние любого другого агента в любом классе состояний концептуального каркаса среды функционирования. Если в векторе цели некоторого агента есть состояния, которые этот агент достичь не в состоянии, то кооперация с другими агентами неизбежна. Для достижения такого рода целей необходима коммуникация между агентами. Поэтому, кроме действий агента, полученных им в результате решения обратной задачи (8) для достижения цели, определим еще и множество действий коммуникации с другими агентами – это множество  $COM$ .

Множество действий  $COM$  включает обращения к другим агентам, например с просьбой о помощи, договоренности о кооперации, обмен информацией о собственных целях и действиях и др. В рамках этой статьи мы детально не рассматриваем структуру, содержание этих сообщений, а также, протоколы взаимодействия агентов. Рабочая версия множества действий  $COM$  была разработана для проведения имитационных экспериментов для анализа кооперативного поведения группы агентов.

Кроме этого, определим еще и два типа кооперативных действий агентов:

1) Действия  $INT_i$  - изменение свойств  $i$ -о агента в рамках его убеждений (знаний) по просьбе любого другого агента;

2) Действия  $INT_i(a_j)$  - изменение свойств  $j$ -о агента  $i$ -м агентом в рамках его убеждений (знаний), разумеется при наличии ресурсов.

Тогда действия любого агента будем представлять уже кортежем:  $\langle INT_i, COM, INT_i(a_j) \rangle$ , последние два элемента которого определяют социальную способность интеллектуального агента.

Тогда определение агента кортежем (4) дополним до определения социального агента и представим следующим кортежем:

$$\langle\langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle, DES_i, \langle INT_i, COM, INT_i(a_j) \rangle \rangle \quad (9)$$

Отметим, что все элементы архитектуры агентов определены в терминах искусственных имен классов состояний, которые получены всеми агентами по одинаковым алгоритмам, и, следовательно, в процессах коммуникации будут понятны всем агентам. Представление BDI-агентов в едином теоретическом базисе качественного концептуального каркаса среды функционирования позволяет решить вопросы кооперации агентов для достижения общей цели в терминах простых логических конструкций. Рассмотрим условия кооперации агентов.

### 3. Кооперация агентов с BDI архитектурой в качественной семиотической среде

Рассмотрим постановку задачи кооперации множества агентов с BDI архитектурой в семиотической среде функционирования.

Далее мы будем считать, что множество агентов построили концептуальный каркас среды функционирования и самостоятельно определили все элементы собственной BDI архитектуры (убеждения, цели и намерения) в терминах искусственных имен концептуального каркаса среды функционирования.

Задача заключается в том, чтобы разработать условия, при которых агенты, на основе обмена информацией о собственных убеждениях, целях и намерениях, в условиях отсутствия конфликта интересов по цели, совместными действиями могут достичь поставленной перед ними цели изменения состояния среды функционирования. Вначале сформулируем условия самостоятельного достижения цели агентом.

#### 3.1. Возможность самостоятельного достижения цели агентом.

Критерием возможности достижения агентом собственной цели является наличие у агента ресурсов для ее достижения. То есть, решение обратной задачи  $INT_i^*$ , полученное агентом для достижения цели  $DES_i$  и множество его возможных действий  $INT_i$  должно содержать общие элементы.

**Утверждение 4.** Если пересечение множеств решений обратной задачи и возможных действий агента не пустое множество,  $INT_i^* \cap INT_i \neq \emptyset$ , то цель достижима агентом самостоятельно.

Поскольку действия агента, направленные на достижение цели, возможны в рамках его убеждений -  $BEL_i = \{d_j^H, \leq\} \subseteq KK^W$ , то множество возможных действий агента  $INT_i(t)$  должны принадлежать множеству его убеждений (знаний), т.е.  $INT_i \subseteq BEL_i$ .

**Следствие 1.** Если все элементы цели агента принадлежат упорядоченному множеству его убеждений  $BEL_i$ , то цель может быть достигнута агентом самостоятельно. Т.е. выполняется условие:  $\forall d_i^H \in DES_i \mid d_i^H \in BEL_i$ .

Действительно, поскольку понятийная система агента была построена на основании сведений о его ресурсах, то если цель принадлежит его понятийной системе – убеждениям, то есть ресурсы для достижения этой цели самостоятельно (см. Утверждение 4).

#### 3.2. Возможность достижения цели в кооперации с другими агентами.

Интерес представляет случай, когда в векторе цели  $i$ -о агента есть элементы, не принадлежащие его системе убеждений  $BEL_i$ . В этом случае, цель может быть достигнута при условии кооперации  $i$ -о агента с другими агентами. Ситуация когда цель агента не может быть достигнута без кооперации с другими агентами записывается следующим образом:

$$\forall d_i^H \in DES_i \& \exists d_i^H \notin BEL_i.$$

Рассмотрим теперь условия кооперации агентов.

**Условие 1.** Агент  $j$  считается привлекательным для кооперации для агента  $i$ , если элемент его цели  $d_i^H \notin BEL_i$  существует в системе убеждений (знаний) агента  $j$ , т.е.  $d_i^H \in BEL_j$ .

Согласно этому условию агент  $i$  для кооперации должен выбрать агента, который может достичь его цели.

Это условие проверяется при обращении агента  $i$  к агенту  $j$  в двух случаях.

1) Агент  $i$  просит агента  $j$  изменить свое состояние, на состояние, удовлетворяющие цели агента  $i$ , т.е. агент  $j$  должен выполнить действие из множества своих действий  $INT_j$  по просьбе агента  $i$ . Агент  $j$  может отказаться от кооперации, если цель агента  $i$  ему не интересна или он занят другой работой.

2) Агент  $i$  может обратиться к агенту  $j$  с просьбой, чтобы он изменил его состояние, на состояние, удовлетворяющее его цели. Действия агента  $j$  по изменению свойств других агентов определены во множестве действий  $INT_j(a_i)$ .

Условие 1 является необходимым, но не достаточным условием для совместной работы агентов. Поэтому рассмотрим другие условия.

**Условие 2.** Агент  $j$  считается привлекательным для кооперации для агента  $i$ , если в его системе убеждений существуют элементы  $d_i^H \in BEL_i$ , которые являются также элементами системы убеждений агента  $j$ , т.е.  $d_i^H \in BEL_j$ .

Это условие означает, что существует элемент  $d_i^H$ , содержащийся в пересечении систем убеждений этих агентов, т.е. если  $\exists d_i^H \in BEL_i \cap BEL_j$ . Выполнения этого условия необходимо для выполнения действий изменения свойств другого агента, т.е. действий из множества  $INT_j(a_i)$ .

**Допущение 1.** Агент  $j$  может изменить свойства только тех агентов или объектов, которые включены в объем  $V(d_j^H)$  классов состояний его системы убеждений  $BEL_j$ . Т.е.  $\exists (a_i \in A \vee b_j \in B) \in V(d_j^H) | d_j^H \in BEL_j$ .

В связи с этим сформулируем еще одно условие кооперации агентов.

**Условие 3.** Агент  $j$  может изменить свойства агента  $i$ , если агент  $i$  включен в объем одного из возможных классов состояний агента  $j$ , т.е.  $a_i \in V(d_j^H) | d_j^H \in BEL_j$ .

Кооперация агентов, рассматриваемая в этой статье, заключается в изменении агентом  $j$  тех свойств агента  $i$ , которые он сам, в силу ограниченности его системы убеждений изменить не может. Если выполняются все перечисленные условия, то кооперация агента  $i$ , если агент  $j$  возможна.

#### 4. Пример

Рассмотрим пример, поясняющий приведенные выше условия кооперации. Для этого воспользуемся примером, который уже был описан в статье при объяснении построения и символизации концептуального каркаса среды функционирования. Итак, есть *Агент 1* и *Агент 2*, имеющие по два свойства:  $\{X, Y\}$ . Агент 1 может перемещаться только по координате  $X$ , горизонтально,  $X_1=\{x_{1i}\}$ ,  $x_{1i}\in[0,1]$ ,  $Y_1=y_{1j}$ ,  $y_{1j}=\text{const} = 0,5$ , а агент 2 вертикально только по координате  $Y$ , т.е.,  $Y_2=\{y_{2j}\}$ ,  $y_{2j}\in[0,1]$ ,  $X_2=x_{2i}$ ,  $x_{2i}=\text{const} = 0$ . Построен концептуальный каркас среды функционирования и определены понятийные системы агентов (рис.2-рис.5). Понятийные системы агентов 1 и 2, соответственно равны: агент 1 -  $BEL_1=\{d_1^{00}, d_1^{10}, d_1^{20}\}$ , а агент 2 -  $BEL_2=\{d_2^{21}, d_2^{20}, d_2^{22}\}$ .

Пусть агент 1 находится в подпространстве с именем  $d^{00}$ ,  $(x_1(0)=0,5, y_1(0)=0,5)$ . Ресурсы этого агента позволяют ему изменить значение только свойства  $X$ . В этом случае множество управляющих воздействий равно:  $U_1=\{u_{10}, u_{11}, u_{12}\}$ , где  $u_{11}=-0,5$ ,  $u_{12}=0,5$ ,  $u_{10}=0$ , которое представим в семиотической среде в виде:  $INT_1=\{d_1^{00}, d_1^{10}, d_1^{20}\}$ .

Чтобы перейти агенту 1 в позицию  $d_1^{20}$  нужно применить действие  $u_{11}$ , т.е.  $x_1(t+1)=x_1(0)+u_{11}^R=0$ , а в позицию  $d_1^{10}$  действие  $u_{12}$ , т.е.  $x_1(t+1)=x_1(0)+u_{12}^R=1$ . Чтобы остаться агенту в позиции  $d^0$ , он не должен предпринимать никаких действий, т.е.  $u_{10}=0$ . Уравнение динамики агента 1 запишем в виде:  $x_1(t+1)=x_1(0)+(u_{21}\vee u_{22}\vee u_{20})$ .

Аналогично, для агента 2, находящегося в подпространстве  $d_2^{20}$ ,  $(x_2(0)=0, y_2(0)=0,5)$  запишем множество возможных действий – это  $U_2(t)=\{-0,5; 0; 0,5\}$ , или в терминах знаков:  $INT_2=\{d_2^{20}, d_2^{21}, d_2^{22}\}$ . Уравнение динамики агента 2 запишем в виде:  $y_2(t+1)=y_2(0)+(u_{21}\vee u_{22}\vee u_{20})$ .

Пусть у агента 1 есть цель  $G_1=(x_1=1,0; y_1=0,5)$ . Эта цель в терминах знака будет выглядеть так:  $DES_1=(d_1^{10}, ?)$ . Поскольку в этом примере значения координаты  $y_1$  для цели и текущего состояния равны,  $y_1=y_1(0)=0,5$ , то наши дальнейшие рассуждения касаются только координаты  $x_1$ . Выбор действия агентом 1 для перехода в целевое состояние определяется решением обратной задачи. В этом случае решение уравнения  $u_1^*=G_1 - x_1(0)=0,5$  дает единственное решение, которое означает, что агенту 1 нужно увеличить свою координату  $x_1$  на 0,5, что означает следующее действие:  $INT_1^*=(d_1^{10})$ .

Согласно утверждению 4 и следствию 1 имеем, что  $INT_1^* \cap INT_1 \neq \emptyset = d_1^{10}$ . Это означает, что агент может достичь этой цели самостоятельно. Аналогично можно описать самостоятельные действия агента 2, позволяющие ему перемещаться в рамках тех подпространств, которые включены в его систему убеждений  $BEL_2$ .

Рассмотрим теперь вопросы кооперации агентов, для достижения целей, не принадлежащих системам их убеждений. Пусть цель агента 1 -  $DES_1=(d_1^{21}, ?)$ . Для этой цели выполняется условие  $d_1^{21} \in DES_1 \& d_1^{21} \notin BEL_1$ . Это означает, что достичь этой цели агент 1 самостоятельно не может, т.к. он не может самостоятельно изменить свое свойство  $Y$ . Далее мы будем опускать подробности коммуникации между агентами в процессах поиска партнера. Считаем, что у агента 1 есть информация об агенте 2 для того чтобы проверить условия возможной кооперации.

Условие 1 для цели агента 1 и системы убеждений агента 2 выполняется, т.е.  $d_1^{21} \in BEL_2$ , условие 2 для системы убеждений агента 1 и агента 2 также выполняется, т.е.  $d_{1,2}^{20} \in BEL_1 \cap BEL_2 \neq \emptyset$ . Это значит, агент 2 привлекателен для кооперации. И, наконец, кооперация агентов будет возможна, и агент 2 сможет изменить свойство  $Y$  агента 1, если выполнится условие 3. Для этого необходимо, чтобы агент 1 переместился в позицию  $d_1^{20}$ , которая была определена при проверке условия 2. Если агент 1 переместиться в класс состояний  $d_1^{20}$  и обратиться к агенту 2 с просьбой изменить его свойство  $Y$ , то цель агента 1 -  $DES_1 = (d_1^{21}, ?)$  будет достигнута совместными усилиями двух агентов.

Предложенная модель командной работы агентов была проверена с помощью имитационной модели. Моделировалась командная работа четырех агентов, каждый из которых имел два свойства. Был построен концептуальный каркас среды функционирования: выделены подпространства классов состояний, заданы их имена. В терминах имен классов состояний была определена понятийная система каждого агента. Для проверки кооперативного взаимодействия агентам задавались цели, достичь которые они самостоятельно не могли. Для достижения таких целей, агенты обменивались информацией по разработанному протоколу и принимали решения о кооперации на основе условий предложенных в модели. Эксперименты показали, что агенты самостоятельно договаривались о кооперации для достижения цели, изменяя свои свойства и свойства других агентов. Эксперименты подтверждают корректность предложенной модели.

### Заключение

В работе предложена математическая модель формирования и функционирования команды искусственных интеллектуальных агентов с BDI архитектурой в качественной семиотической (знаковой) среде функционирования. В качестве математической модели среды функционирования выбрана модель многоагентной динамической системы «Группа роботов-Среда».

Предложено в качестве модели знаний (убеждений) BDI-агентов использовать качественный концептуальный каркас среды функционирования, представляющий собой частично упорядоченное множество подпространств среды функционирования, которые определяют классы возможных состояний динамической системы «Группа роботов-Среда».

Предложен метод и алгоритм символизации классов состояний именами-символами, однозначно определяющие эти классы. Согласованный всеми агентами и символизированный концептуальный каркас среды функционирования определен как качественная семиотическая среда функционирования агентов. В терминах этой среды предложена математическая модель интеллектуально агента с BDI-архитектурой, а также сформулированы условия образования и функционирования команд интеллектуальных агентов в этой среде. Имитационные эксперименты предложенных методов, алгоритмов и модели подтвердили их корректность.

Разработанные в этой работе методы, алгоритмы и модели, основанные на применении грубых концептуальных каркасов предметной области в качестве модели знаний интеллектуального

агента позволяют решать исследовательские задачи изучения принципов организации команд агентов, различных аспектов поведения отдельных агентов.

### **Благодарности**

Основные результаты, представленные во всех разделах этой работы получены при поддержке гранта РФФИ (Проект № 16-11-00018: «Исследование методов организации коллектива роботов на основе моделирования эусоциальных сообществ»). Часть результатов, представленных в разделе 1 (вопросы символизации среды функционирования) получены при поддержке гранта РФФИ (Проект № 15-01-07900 А: «Разработка и исследование моделей и методов непосредственной языковой коммуникации на основе семиотических моделей для реализации социального поведения в групповой робототехнике»).

### **Литература**

1. *Кулинич А.А.* Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 1. Качественная среда функционирования. Основные определения и постановка задачи // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. - № 3. - С. 95-105.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.-279 с.
3. *Кулинич А.А.* Концептуальные каркасы онтологий слабо структурированных предметных областей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. - № 4. - С. 31-41
4. *Grosz B., Kraus S.* Collaborative Plans for Complex Group Actions // Artificial Intelligence. – 1996. – №86. – P. 269–358.
5. *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.
6. *Кулинич А. А.* Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход // Управление большими системами. Выпуск 51. М.: ИПУ РАН, 2014. С.174-196.