

# Развернутый научный отчет

А. И. Панов

6 декабря 2016 г.

### **3.1. Номер проекта**

16-37-60055 мол\_а\_дк

### **3.2. Название Проекта**

Исследование механизмов и построение моделей обучения, основанных на знаковых представлениях, в задаче планирования коллективного поведения

### **3.3. Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы**

- 07-991 Интеллектуальные динамические системы и технологии управления
- 07-966 Методы и системы приобретения, представления, обработки и интеграции знаний

### **3.4. Объявленные ранее цели Проекта**

Первый год работ по проекту (2016 г.):

1. Исследование структуры внутренней процедурной компоненты элементов семиотического представления знаний (знаков) интеллектуального агента, действующего в условиях коллективного решения поставленной задачи.
2. Исследование взаимосвязи процессов целеполагания в условиях коллективного взаимодействия и процесса функционирования внутренней процедурной компоненты знака.
3. Подготовка публикаций в ведущих периодических изданиях, включенных в одну из систем цитирования (библиографических баз) Web of Science, Scopus, РИНЦ.

### **3.5. Полученные в 2016 году результаты с описанием методов и подходов, использованных в ходе выполнения проекта**

На первом этапе проекта основной целью работ являлось исследование внутренней процедурной компоненты знаков интеллектуального агента, действующего в условиях коллективного решения задачи. Рассматривалась модель основного когнитивного процесса, задействованного при составлении решения задачи, в том числе в коллективе, — процесс планирования с включением этапа целеполагания. Была разработана модель процедурной компоненты знака и исследована его роль в процессе планирования, алгоритм которого был развит на основе предыдущих работ автора.

### 3.5.1. Моделирование процесса планирования поведения

Вопрос разработки методов планирования поведения сложного технического или виртуального объекта имеет большую историю и в основном связывается с успехами отдельной области искусственного интеллекта - автоматического планирования. Здесь достигнуты существенные успехи - предложен ряд символьных методов планирования как в классической постановке задачи, когда действия детерминированы (такие алгоритмы планирования, как FF [21], FD [20], LAMA [32]), так и в недетерминированной постановке с учетом ненулевых вероятностей невыполнения действий и вероятностной реакции среды (алгоритмы на основе марковских процессов и динамического программирования [2; 4]). Однако создание эффективных и быстрых алгоритмов планирования действий основывается на заранее заданных эвристических принципах поиска на графе и на предположении, что набор действий заранее известен, что делает невозможным автоматическую адаптацию системы планирования к новой задаче с новым списком действий. Это означает, что переноса опыта планирования с выделением абстрактных действий, которые могут иметь различную реализацию в разных ситуациях, в классических подходах не происходит. Существенные трудности возникают, когда существующие алгоритмы адаптируются для многоагентного случая, где предполагается, что агенты обладают как различными наборами действий, так и обладают различными знаниями о внешней среде [6]. В случае коалиционного взаимодействия также необходимо обязательное включение элементов обучения для пополнения базы данных одного агента по поступающей от других участников коалиции информации.

В последнее время исследователи в области управления и планирования уделяют повышенное внимание психологически и биологически правдоподобным моделям и архитектурам управления агентами [24; 36]. Использование различных типов памяти (эпизодической, процедурной и др.) в когнитивных архитектурах нацеленно именно на задачу повторить биологические и психологические пути обмена и организации информации для решения таких задач как управление и планирование поведения. Это связано в первую очередь с тем, что повышающийся уровень сложности тех задач, в которых действуют робототехнические системы (агенты) требует от них большего уровня автономности, универсальности и гибкости, которую не могут обеспечить существующие методы и алгоритмы. Исследователи в области искусственного интеллекта снова обращаются к естественным примерам решения таких задач - к исследованию поведения человека и животных [31; 53]. Психологически правдоподобные модели когнитивных функций, в том числе планирования, нацелены не только на то, чтобы повторить поведение человека в сложных, в том числе коалиционных, условиях, но и по возможности более полно удовлетворить существующим психологическим представлениям о функционировании психики человека. С одной стороны это может привести к повышению ресурсоемкости предлагаемых алгоритмов, но, с другой стороны, позволит реализовать новые возможности, которые раньше оставались вне круга решаемых проблем специалистами по планированию, например, возможности к целеполаганию, распределению ролей в коллективе. Идеи когнитивной психологии и раньше использовались в классическом планировании, но, в основном, в бихевиористском ключе. Так идея в разделении множества действий на автоматические, быстро совершаемые, специфические и произвольные, обобщенные, подсказанное психологической теорией [23], нашла свое воплощение в иерархическом планировании, а идея сохранения опыта планирования - в прецедентном [5; 10; 17].

В когнитивной психологии имеется ряд направлений, изучающих феномен планирования, среди которых необходимо выделить три основных [55]: планирование как часть когнитивной схемы [27], планирование как метапроцесс [14; 30] и планирование как часть деятельности [41].

В первом направлении для описания поведения человека используются когнитивные схемы. Например, перцептивная схема – это план сбора информации об объектах и событиях, получения новой информации, обеспечивающий ее непротиворечивую интерпретацию. Схема одновременно включает в себя и сам план, и исполнение плана, это структура действия, равно как и структура для действия. Во втором направлении предусматривается наличие метакогнитивных процессов, позволяющих человеку управлять своими когнитивными процессами и знаниями. С точки зрения Стернберга, можно говорить о глобальном (стратегическом) и локальном (тактическом) планировании. Глобальное планирование требует больших затрат времени, но это компенсируется уменьшением времени на локальное, тактическое планирование. Наконец, в третьем подходе, являющимся одним из наиболее общих, рассматривается иерархическая теория деятельности, которая используется в данном проекте и описывается в следующем разделе.

Стоит отметить также, что психологически и биологически правдоподобные модели управления и планирования позволяют по-другому взглянуть на проблему символизации (symbol grounding problem) [1; 3; 8; 18]. Нейрофизиологические модели функционирования сенсорных отделов коры головного мозга в купе с психологической теорией категоризации и восприятия служат основой для построения новых непротиворечивых моделей привязки символов к сенсорным данным. Успехи в данном направлении позволили реализовать некоторые модели в робототехнических системах [19].

Далее будет представлен новый психологически и биологически правдоподобный метод планирования поведения, основанный на знаковой теории деятельности и моделях строения кортикально-таломических отделов коры головного мозга. Помимо своей ценности с точки зрения моделирования когнитивных функций человека знаковый подход может быть использован при решении ряда коллективных робототехнических задач (например, для задачи интеллектуального перемещения [51; 53]), не решаемой классическими и другими психолого ориентированным методами (такими как BDI [33]).

### **3.5.2. Знаковая картина мира**

В качестве способа представления знаний в настоящем проекте используется модель знаковой картины мира [43; 44; 46], которая не только хранит знания об объектах, процессах и отношениях внешней среды, но также представляет внутренние параметры интеллектуального агента, определяющие его мотивационную составляющую и опыт действия. Картина мира также включает в себя процедуры оперирования со знаниями: их приобретение и использование в различных процессах, таких как восприятие, рассуждения, целеполагание, планирование поведения [47]. Модель картины мира строится на основе психологических представлений о функционировании психики человека, в частности на представлениях культурно-исторического подхода [39], теории деятельности [41; 56] и теории дуальных систем [13; 35]. В соответствии с психологическими воззрениями элементом картины мира является четырехкомпонентная структура - знак, которая представляет для субъекта (в нашем случае интеллектуального агента) все сущности внешней среды и внутреннего пространства: объекты, их свойства, процессы, отношения между объектами и процессами. Следует отметить, что знак является продуктом взаимодействия нескольких субъектов деятельности, образующих некоторую группу (культурную среду), т.е. понятие знака изначально предполагает работу картины мира индивида в кооперации с картинами мира других индивидов.

Образная компонента знака хранит характерные признаки представляемой сущности и одновременно является функцией построения представления этой сущности на основе потока данных, поступающих как с наружных, так и внутренних сенсоров, и в котором выделяются клю-

чевые признаки. Образная компонента индивидуальна для каждого носителя картины мира и образуется в результате процесса наблюдения и обобщения [34; 49; 52].

Компонента значения знака представляет обобщенные, концептуальные знания субъекта о сущностях внешней среды, а также внутреннего пространства как себя, так и других участников группы. Эти знания являются согласованными, т.е. одинаковы у всех представителей группы. Коммуникативные процессы, которые протекают в группе субъектов (интеллектуальных агентов), в своей основе используют сообщения, которые строятся по общим для всех значениям знаков, задающих, таким образом, синтаксис протокола коммуникации.

Компонента личностного смысла знака содержит индивидуальный личный опыт взаимодействия субъекта с внешней средой с учетом отношения к этому опыту - послужил ли он достижению некоторой цели (удовлетворению некоторой потребности), или же наоборот, оказался неудачным. Личностный смысл знака является динамической его характеристикой, которая постоянно формируется и обновляется в результате протекания тех или иных когнитивных процессов (планирования, целеполагания). Именно компонента личностного смысла определяется внутренними характеристиками субъекта и его потребностно-мотивационной сферой.

Наконец, четвертая компонента знак - имя - служит для его идентификации как в коммуникативных процессах, так и в произвольных процессах планирования и рассуждений. Имя знака, как и его значение, является утвержденной, слабо меняющейся в группе субъектов компонентой знака.

Знаки представляет в картине мира субъекта как статические объекты и свойства внешней среды, так и динамические ее составляющие: процессы, ситуации - а также внутренние характеристики агента: действия, объекты и свойства «внутренней среды». Пусть у нас есть объект внешней среды - *лимон*. В картине мира некоторого субъекта он может представляться знаком с именем «лимон», образ которого включает такие признаки как *желтый цвет, овальную форму и кислый вкус*. Эти признаки также могут быть представлены в картине мира знаками, либо являться информацией, поступающей напрямую от сенсоров. Значением знака «лимон» будут являться те обобщенные действия и процессы, в которых по общему согласованному мнению некоторого коллектива, которому принадлежит субъект, участвует *лимон*: *лимон принято употреблять в пищу, использовать как соус для рыбных блюд или использовать для профилактики болезней*. Личностный смысл лимона для субъекта - это те конкретные персональные действия и процессы, в которых субъект имел опыт использования лимона, решая некоторую задачу: *когда-то я кидал лимон в соседа по парте в школе или сжевал целый лимон и не скривил лицо*. Все действия и процессы также могут быть представлены некоторыми знаками, либо не выводиться на знаковый произвольный уровень и являться некоторыми не обозначаемыми операциями.

Кроме психологических оснований четырехкомпонентной структуры знака имеются нейрофизиологические свидетельства в пользу существования такой структуры хранения и активации элементов индивидуального опыта [12; 40]. Кроме того, нейрофизиологические данные служат основой для построения моделей компонент знака и некоторых функций, таких как восприятие и распознавание [15; 49]. Нейрофизиологические свидетельства в пользу высокой однородности строения различных отделов коры больших полушарий мозга, а также участия таламуса в формировании и запоминании временных последовательностей [7; 9], приводят к используемой в данном проекте математической структуре каузальной матрицы [52] для описания строения компонент знака.

Знаковый подход к представлению знаний и описание процессов, протекающих в знаковой картине мира позволяют решить ряд трудных задач в области ситуационного управления [45; 48] и управления сложными техническими объектами [54]. Использование знаковой картины мира для реализации функций стратегического уровня управления робототехническими системами

[42] демонстрирует применимость используемого подхода не только для представления знаний, но и для решения задач коалиционного планирования и распределения ролей.

### Компоненты знака

Рассмотрим структуру компонент знака на примере образной компоненты, которая участвует в распознавании (актуализации) знака, выделении представления об опосредуемом объекте или процессе на основе поступающей из внешней среды сенсорной информации и регистрируемой внутренними сенсорами моторной информации. До именованного знак будем называть протознаком или признаком.

Предположим, что во входном потоке данных выделена последовательность  $(x_1, x_2, \dots, x_h)$  длины  $h$  векторов действительных чисел от 0 до 1, которые будем называться *событиями*. Каждое событие  $x_t$  длины  $q$  представляет собой запись выходов от  $q$  сенсоров, а каждый элемент события означает уверенность в срабатывании данного сенсора. Например, событие  $(0.1, 0.9, 0.9)$  поступает с трех сенсоров - датчиков красного, синего и зеленого света - и означает, что уверенность в срабатывании датчика красного света составляет 10%, а синего и зеленого - по 90%.

Образная компонента знака должна по входной последовательности данных определить, присутствует ли (закодирован ли) опосредуемый объект или процесс в этой последовательности. Для этого мы будем кодировать характерные признаки объекта или процесса в специальной структуре - каузальной матрице  $z = (e_1, e_2, \dots, e_h)$  размерности  $q$  на  $h$ , где  $q$  - размерность входных событий, а  $h$  - длина последовательности входных событий. При этом каждый столбец  $e_t$  каузальной матрицы является битовым вектором длины  $q$  и кодирует те признаки (которым соответствуют 1), которые необходимо должны присутствовать во входном событии в момент времени  $t$ , чтобы опосредуемый объект или процесс мог быть распознан во входном потоке данных, т.е. задают множество одновременных характерных признаков. Например, образу знака  $s$ , представляющему объект «квадрат», может соответствовать каузальная матрица

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

где первая строчка является характеристическим вектором информации с датчика углов на изображении, вторая - с датчика положения визуального сенсора (верхнее положение), третья - нижнее положение сенсора, четвертая - левое положение сенсора, пятая - правое положение (см. рис.3.5.2).

Образу каждого знака может соответствовать несколько каузальных матриц, которые задают различные проявления представляемого объекта или процесса. Весь кортеж каузальных матриц образа знака  $s$  будем обозначать как  $Z^p(s)$ .

Случай, когда характерными признаками образа данного знака выступают данные с сенсоров, является частным. В более общей постановке, признаками для образа знака служат другие знаки, которые представляют эти характерные признаки. Таким образом, мы можем сопоставить образу знака  $s$  множество  $S_p(s)$  мощности  $q$ , каждому элементу которого соответствует номер строчки каузальной матрицы  $z$  размера  $q$  на  $h$ , т.е. каждому признаку  $s_i \in S_p(s)$  соответствует характеристический битовый вектор, задающий на местах 1 те моменты времени, когда данный признак должен присутствовать во входных данных, чтобы успешно актуализировать знак (распознать образ знака)  $s$ .

Для уточнения определения множества  $S_p(s)$  введем семейство бинарных отношений  $\{\sqsubset_p^1, \sqsubset_p^2, \dots\}$ , определённых на декартовом произведении  $S \times S$ . Будем считать, что знак  $s_i$  яв-

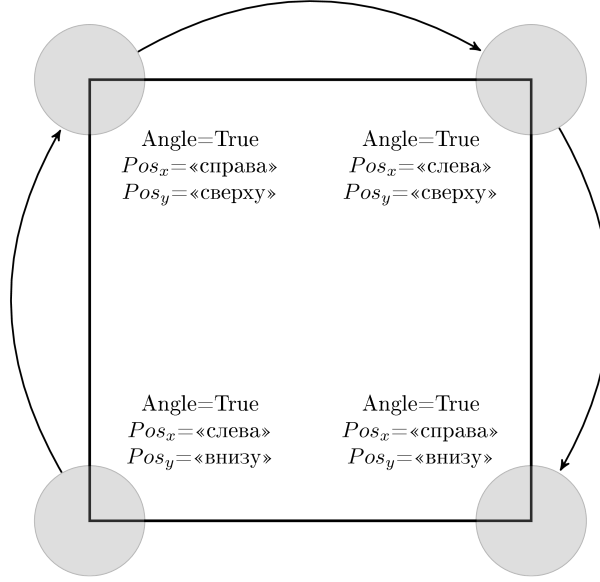


Рис. 3.1: Визуальная интерпретация каузальной матрицы

ляется элементом образа знака  $s$ ,  $(s_i, s) \in \sqsubset_p$  или  $s_i \sqsubset_p s$ , в том случае, если  $s_i \in S_p(s)$ . Если известно, что знаку  $s_i$  соответствует 1 в  $t$ -м столбце некоторой каузальной матрицы  $z \in Z^p(s)$  знака  $s$ , то мы будем использовать вложенное отношение  $\sqsubset_p^t \subset \sqsubset_p$ .

### Каузальная сеть

Введем специальную процедуру  $\Lambda_p : 2^Z \rightarrow 2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}$ , которая каждому кортежу каузальных матриц  $Z^p(s) \subset Z$  образа знака  $s$  ставит в соответствие два не пересекающихся подмножества индексов собственных столбцов  $I^c \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^c i \leq h$  (индексы столбцов условий) и  $I^e \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^e i \leq h$  (индексы столбцов эффектов):  $\Lambda_p(Z^p(s)) = (I^c, I^e), I^c \cap I^e = \emptyset$ . Например, если для множества матриц  $Z = \{((1, 0), (0, 1))\}$  процедура  $\Lambda_p$  выдает два множества  $\{1\}$  и  $\{2\}$ , то это означает, что появление признака, соответствующего первой строчке матрицы, вызывает появление признака, соответствующего второй строчке. Процедура  $\Lambda_p$  по сути является функцией установления причинно-следственного отношения на множестве входных событий и может реализовываться различными способами, в т.ч. на основе алгоритмов Норриса, FCB0, AddIntent ([25; 26; 28])

В том случае, когда для матриц  $Z^p(s)$  образа знака  $s$  множество столбцов эффектов пусто  $I^e = \emptyset$ , т.е. когда по данному множеству каузальных матриц не возможно однозначно определить, какие события всегда предшествуют другим, мы будем считать, что причинно-следственная связь не установлена и знак опосредует некоторый объект или ситуацию. В противном случае будем считать, что знак опосредует некоторое действие или процесс, результат которого кодируется в столбцах эффектов, а условие - в столбцах условий.

Справедливы следующие утверждения относительно свойств процедуры  $\Lambda_p$ :

- $I^c \cap I^e = \emptyset$  — столбец матрицы предсказания не может быть одновременно и условием и эффектом,
- $|I^c \cup I^e| = h$  — столбец матрицы предсказания является либо условием либо эффектом,

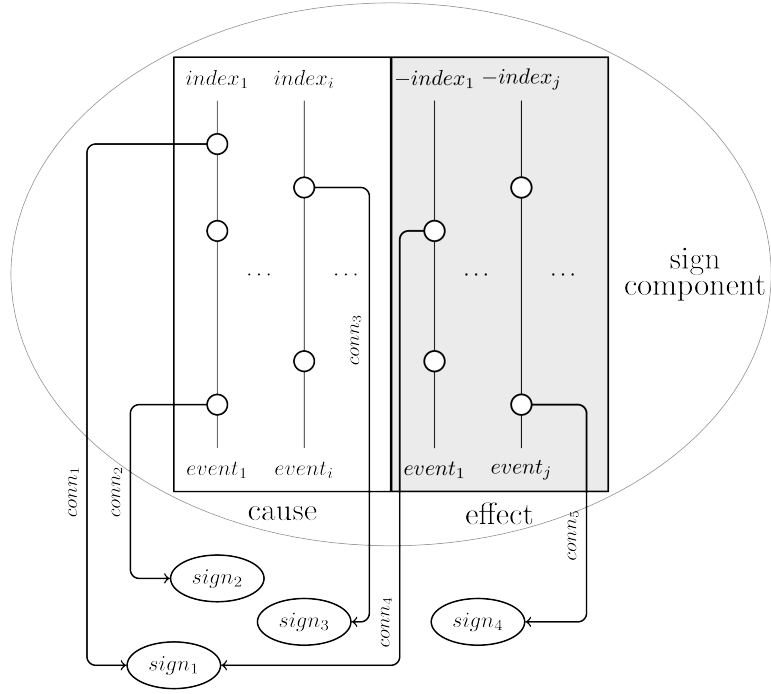


Рис. 3.2: Схема каузальной матрицы

- $I^c \neq \emptyset$  — среди столбцов матрицы предсказания должен быть хотя бы один столбец условий, в то время как эффектов может и не быть (в случае объектных признаков),
- $\forall i \in I^e, j \in I^c \ i > j$  — все условия предшествуют эффектам по времени.

Схема каузальной матрицы, с учетом выше сказанного, приведена на рис. 3.2.

Теперь введем понятие каузальной сети, которая будет определять гетерархию на множестве образов. Каузальная сеть  $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$  - является помеченным ориентированным графом, в котором

- каждому узлу  $v \in V_p$  ставится в соответствие кортеж казуальных матриц  $Z^p(s)$  образа некоторого знака  $s$ , что будем обозначать как  $v \rightarrow Z^p(s)$ ;
- ребро  $e = (v_1, v_2)$  принадлежит множеству ребер графа  $E$ , если  $v_1 \rightarrow Z^p(s_1), v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$  и  $s_1 \in S_p(s_2)$ , т.е. если знак  $s_1$  является элементом образа знаком  $s_2$ ;
- каждому ребру графа  $e = (v_1, v_2), v_1 \rightarrow Z^p(s_1), v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$  ставится в соответствие метка  $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$  - кортеж трех натуральных чисел:
  - $\epsilon_1$  - индекс исходной матрицы в кортеже  $Z^p(s_1)$ , может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;
  - $\epsilon_2$  - индекс целевой матрицы в кортеже  $Z^p(s_2)$ , строка которой ставится в соответствие признаку  $s_1$ ;
  - $\epsilon_3$  - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей признаку  $s_1$  строке стоит 1, может принимать положительные значения (столбцы условий) и отрицательные (столбцы эффектов).



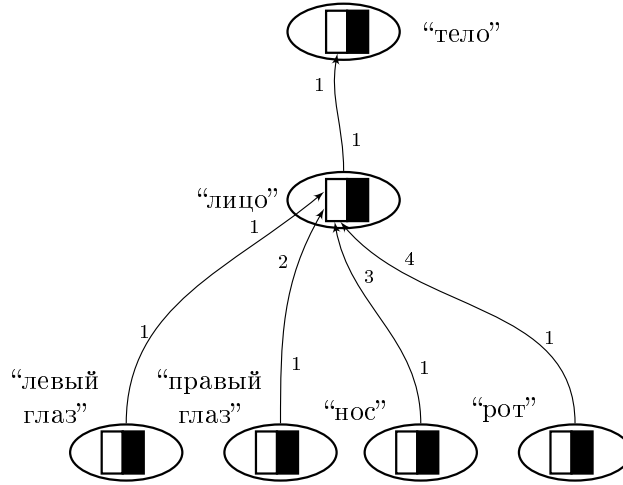


Рис. 3.3: Схема каузальной сети. Здесь каузальные матрицы изображены в виде квадратов, столбцы условий - левая белая часть квадрата, столбцы эффектов - черная правая часть квадратов. Метка  $\epsilon_1$  отображается в начале каждой стрелки, метка  $\epsilon_2$  определяется как номер квадрата, к которому идет стрелка, а метка  $\epsilon_3$  отображается в конце каждой стрелки.

Каузальная сеть представляет собой некоторое множество пересекающихся иерархий знаков. Каждый знак представлен множеством каузальных матриц, задающих образ этого знака, а иерархия представляет иерархические связи между образами. Такую связь можно читать как «знак  $x$  участвует в формировании образа знака  $y$ ». При этом мы специфицируем для какой именно матрицы знака  $y$  и какого именно столбца этой матрицы нужен знак  $x$  (метки  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  соответственно). В некоторых случаях мы также можем указать и участвующую в процессе формирования образа матрицу знака  $x$  (метка  $\epsilon_1$ ). Пример такой сети изображен на рис. 3.3.

Аналогичным образом определяются каузальные сети для остальных компонент знака - для значения и личностного смысла. Для каждого знака  $s$  задаются множества  $S_m(s)$  и  $S_a(s)$ , т.е. определяются семейства отношений  $\{\sqsubset_m, \sqsubset_m^1, \sqsubset_m^2, \dots\}$  и  $\{\sqsubset_a, \sqsubset_a^1, \sqsubset_a^2, \dots\}$ . Множество  $S_m(s)$  интерпретируется как ролевой состав знака  $s$ , например, элементы подкласса или роль действия. Множество  $S_a(s)$  интерпретируется как мгновенный компонентный состав некоторой ситуации, наблюдаемой и переживаемой субъектом, носителем картины мира, в настоящее время. Аналогично определяются множества  $Z^m(s)$ ,  $Z^a(s)$ , процедуры  $\Lambda_m$  и  $\Lambda_a$ .

### 3.5.3. Семиотическая сеть

Знаком  $s$  будем называть четверку  $\langle n, p, m, a \rangle$ , где  $n$  - имя знака,  $p$  - образ знака, кортеж каузальных матриц  $\langle z_1^p(s), z_2^p(s), \dots \rangle$ , соответствующий узлу  $w_p(s)$  каузальной сети на образах;  $m$  - значение знака, кортеж каузальных матриц  $\langle z_1^m(s), z_2^m(s), \dots \rangle$ , соответствующий узлу  $w_m(s)$  каузальной сети на значениях;  $a$  - личностный смысл знака, кортеж каузальных матриц  $\langle z_1^a(s), z_2^a(s), \dots \rangle$ , соответствующий узлу  $w_a(s)$  каузальной сети на смыслах.

Будем называть *семиотической сетью* пятерку  $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$ , где

- $W_p, W_m, W_a$  - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,
- $R_n$  - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е.  $R_n = \{R_p, R_m, R_a\}$ ,

- $\Theta$  - семейство операций на множестве знаков, которые генерируются на основе структуры фрагментов трех типов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков (подробнее см. [46]).

Еще раз отметим, что знак представляет не только объекты внешнего мира, но также процессы, протекающие в нем, выполнимые действия, а также ситуации, наблюдаемые во внешней среде.

Три типа каузальных сетей, составляющих семиотическую сеть, не независимы друг от друга. Между узлами каждой сети установлено взаимно-однозначное соответствие: для каждого узла  $w_x$  сети  $W_x$  найдутся единственные узлы  $w_y$  и  $w_z$  в сетях  $W_y, W_z$  ( $x, y, z \in \{p, m, a\}$ ), такие, что все три узла соответствуют одному и тому же знаку  $s = \langle w_p, w_m, w_a \rangle$ . Имя знака служит меткой узлов в каждой сети: в каузальной сети может быть только один узел с данной меткой, а узлы всех сетей с одинаковыми метками образуют компоненты знака. Для связи каузальных матриц различных типов узлов в рамках одного знака служат специальные функции связывания:  $\Psi_p^m, \Psi_m^a, \Psi_a^p$  и обратные им  $\Psi_m^p, \Psi_a^m, \Psi_p^a$  [46]. Каждая функция связывания ставит каузальной матрице одного типа каузальную матрицу другого типа либо генерирует эту матрицу в том случае, если она отсутствует в соответствующем узле сети.

Введем понятия активности в семиотической сети и процесса его распространения. Введем некоторую метку активности для каузальных матриц сети  $W_x$  ( $x \in \{p, m, a\}$ ) и будем называть активным множество  $Z_x^*$  матриц, обладающих этой меткой. Процесс распространения активности представляет собой изменение состава множества  $Z_x^*$  с течением времени (каждый дискретный момент) и описывается для каждого типа каузальной сети своей функцией:  $\varphi_a, \varphi_m, \varphi_p$ . Процесс распространения активности является итерационным, т.е. на каждом шаге новый состав множества активных матриц порождается на основе предыдущего состава и зависит от матриц, туда входящих. В простейшем случае мы будем рассматривать такой процесс, в котором каждая матрица не влияет на ход распространения активности от другой матрицы и поэтому будем считать, что функции  $\varphi_x$  принимают на вход одну активную матрицу и выдают новое подмножество активных матриц.

В связи с тем, что ребра каузальных сетей имеют направление, будем различать распространение активности вверх по сети, когда используются исходящие от узла ребра (функции  $\varphi_x^\uparrow$ ), и распространение активности вниз по сети, когда используются входящие в узел ребра (функции  $\varphi_x^\downarrow$ ). В дальнейшем, при описании алгоритма планирования, нам понадобятся только функции на сети значения и личностных смыслов. Каждую функцию  $\varphi_x^\uparrow, \varphi_x^\downarrow$  будем параметризовать глубиной распространения активности  $d_x$ , которая указывает на какую глубину просматриваются ребра в данном направлении (вверх или вниз).

В дальнейшем при описании алгоритма планирования будет использоваться понятие фрагмента каузальной сети. Под фрагментом  $F$  мы будем подразумевать некоторое множество узлов  $V$  сети  $W_x = \langle V_x, E_x \rangle$  вместе со всеми ребрами  $E$  их связывающими:  $F = \langle V, E \rangle : V \subseteq V_x$  и  $\forall e = (v_1, v_2) \in E v_1 \in V, v_2 \in V$ .

### 3.5.4. Планирование в знаковой картине мира с этапом целеполагания

Процесс планирования в знаковой картине мира реализуется с помощью МАР-алгоритма и идет в обратном направлении: от конечной ситуации к начальной. Кратко опишем основные этапы его работы. На вход алгоритма поступает описание задачи

$$T = \langle N_T, S, Sit_{start}, Sit_{goal} \rangle,$$

где  $N_T$  - идентификатор задачи,  $S$  - множество знаков семиотической сети,  $Sit_{start} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{start} \rangle$  - начальная ситуация со смыслом  $a_{start} = \{z_{start}^a\}$ ,  $Sit_{goal} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{goal} \rangle$  - целевая ситуация со смыслом  $a_{goal} = \{z_{goal}^a\}$ . В общем случае задача  $T$  является результатом процедуры «означивания» - формирования картины мира по исходным описаниям домена планирования  $D$ , задающему списки возможных действий и типов объектов, и задачи планирования  $P$ , включающей в себя определение стартовых условий и конечной цели (шаг 1).

Результатом МАР-алгоритма является план  $Plan = \{\langle z_{s1}^a, z_{p1}^a \rangle, \langle z_{s2}^a, z_{p2}^a \rangle, \dots, \langle z_{sn}^a, z_{pn}^a \rangle\}$  - последовательность длины  $n$  пар  $\langle z_{si}^a, z_{pi}^a \rangle$ , где  $z_{si}^a$  - каузальная матрица некоторого узла сети на личностных смыслах, представляющая  $i$ -ую ситуацию планирования, а  $z_{pi}^a$  - каузальная матрица некоторого личностного смысла, представляющая применяемое в ситуации  $z_{si}^a$  действие. При этом ситуация  $z_{si+1}^a$  является результатом выполнения действия  $z_{pi}^a$ , в том смысле, который раскрывается далее при обсуждении алгоритма,  $z_{s1}^a := z_{start}^a$  - каузальная матрица, соответствующая смыслу начальной ситуации,  $z_{sn}^a = z_{goal}^a$  - каузальная матрица, соответствующая смыслу целевой ситуации.

**Input:** описание домена планирования  $D$ , описание задачи планирования  $P$ , максимальная глубина итераций  $i_{max}$

**Output:** план  $Plan$

- 
- 1:  $T = \langle N_T, S, Sit_{start}, Sit_{goal} \rangle := \text{ground}(P)$   
//  $N_T$  - идентификатор задачи,  $S$  - множество знаков,  $Sit_{start} = \langle id_{start}\emptyset, \emptyset, \{z_{start}^a\} \rangle$  - начальная ситуация со смыслом  $a_{start}$ ,  $Sit_{goal} = \langle id_{goal}\emptyset, \emptyset, \{z_{goal}^a\} \rangle$  - целевая ситуация со смыслом  $a_{goal}$
  - 2:  $Plan := \text{map\_search}(T)$
  - 3: **function**  $\text{map\_search}(T)$
  - 4:      $z_{cur} := z_{goal}^a$
  - 5:      $z_{start} := z_{start}^a$
  - 6:      $Plans := \text{map\_iteration}(z_{cur}, z_{start}, \emptyset, 0)$
  - 7:      $\{Plan_0, Plan_1, \dots\} = \text{sort}(Plans)$
  - 8:     **return**  $Plan_0$
- 

Процесс планирования является иерархическим и состоит из повторения МАР-итерации, включающей в себя четыре этапа (см. рис. 3.4):

- *S-этап* – поиск прецедента совершения действий в текущей ситуации,
- *M-этап* – поиск применимых действий на сети значений,
- *A-этап* – генерация личностных смыслов, соответствующих найденным значениям,
- *P-этап* – построение новой текущей ситуации по множеству признаков условий найденных действий, получение новой цели (этап целеполагания).

Кратко, МАР-алгоритм осуществляет итеративную генерацию новых каузальных матриц  $z_{next}$  личностных смыслов на основе текущей активной матрицы  $z_{cur}$  до тех пор, пока не будет достигнуто предельное количество шагов  $i_{max}$  (шаг 10) или не будет целиком активирован начальная матрица  $z_{start}$  (шаг 41), соответствующей личностному смыслу  $a_{start}$  начальной ситуации. В качестве текущей активной каузальной матрицы для первой итерации выступает матрица, соответствующая личностному смыслу целевой ситуации  $z_{goal}^a$  (шаг 6). После завершения

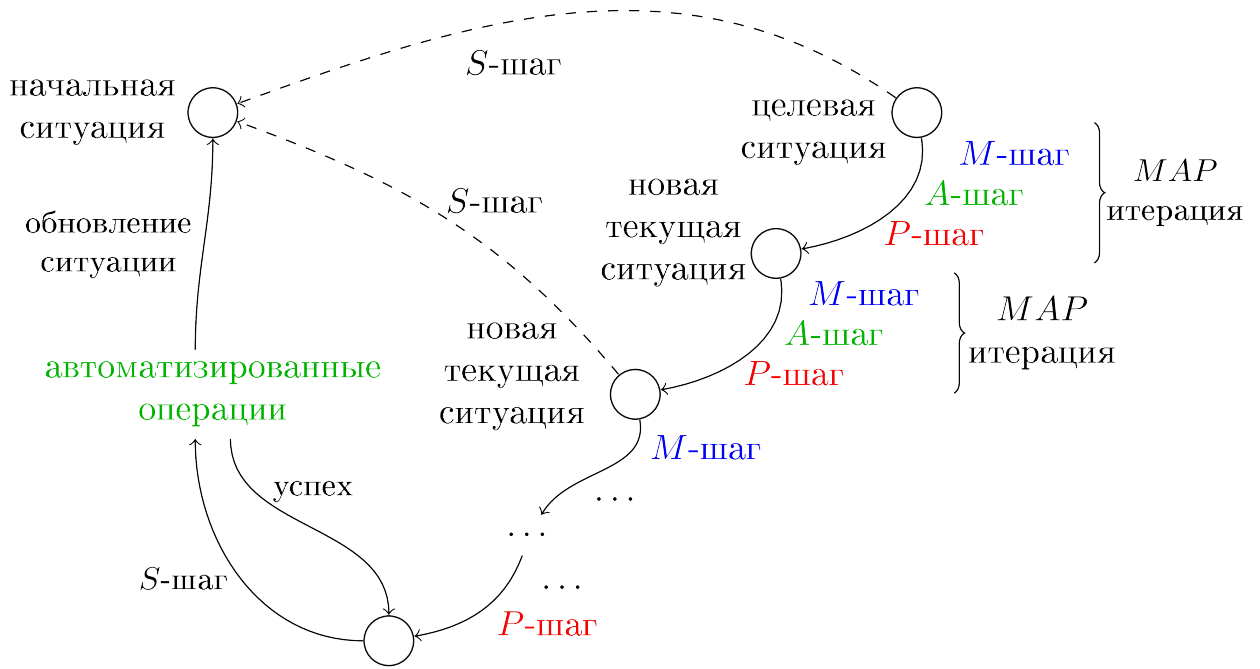


Рис. 3.4: Схема процесса планирования поведения

выполнения всех итераций, найденные планы сортируются по длине (шаг 7) и самый короткий из них является решением задачи планирования в знаковой картине мира (шаг 8).

Первым этапом в MAP-итерации является S-этап. Его суть заключается в том, что в картине мира интеллектуального агента производится поиск прецедентов, т.е. поиск действий, которые совершались в текущих условиях  $z_{cur}$ . Для этого просматриваются все знаки в картине мира  $S$  и их личностные смыслы  $a(s)$  (шаги 13–14). Если текущие условия  $z_{cur}$  удовлетворяются матрицей  $z_a$ , то список прецедентов  $\hat{A}_{case}$  пополняется результатом распространения активности по сети личностных смыслов от знака  $s$  на расстояние  $d_a$  (шаг 16).

```

9: function map_iteration( $z_{cur}, z_{start}, Plan_{cur}, i$ )
10:   if  $i \geq i_{max}$  then
11:     return  $\emptyset$ 
12:    $\hat{A}_{case} := \emptyset$  // Список прецедентов
   // S-этап
   // Поиск прецедентов выполнения действий в текущих условиях
13:   for all  $s \in S$  do
14:     for all  $z_a \in a(s)$  do
15:       if  $z_a \geq z_{cur}$  then
16:          $\hat{A}_{case} = \hat{A}_{case} \cup \varphi_a^\dagger(s, d_a)$ 

```

Далее в MAP-алгоритме следует М-этап, на котором происходит распространение активности по сети личностных смыслов на расстояние  $d_a$  с целью активации всех знаков, связанных с текущей ситуацией (шаг 17). Элементы полученного множества каузальных матриц  $A^*$  служат отправными точками для распространения активности по сети значений: для каждой матрицы  $z_a$

с помощью функции связывания  $\Psi_a^m$  определяется необходимый узел на каузальной сети значений, от которого активность распространяется на расстояние  $d_m$  (шаг 20). Если активированные матрицы являются каузальными, то они добавляются в множество активных значений  $M^*$  (шаг 22).

```

// M-этап
// Распространение активности вниз по сети личностных смыслов
17:    $A^* = \varphi_a^\downarrow(z_{cur}, d_a)$ 
18:    $M^* = \emptyset$ 
19:   for all  $z_a \in A^*$  do
// Распространение активности вверх по сети значений
20:     for all  $z_m \in \varphi_m^\uparrow(s(z_a), d_m)$  do
21:       if  $I^e(z_m) \neq \emptyset$  then
22:          $M^* := M^* \cup \{z_m\}$ 

```

Затем переходим к А-этапу, на котором происходит генерация каузальных матриц на сети личностных смыслов, которые представляют специфицированные относительно текущих условий  $z_{cur}$  действия, определяемые активными значениями из множества  $M^*$ . Для этой цели служат шаги 25–27, в которых распространение активности на каузальной сети значений на расстояние  $d_m$  приводит к активации множества значений  $M^*$  знаков, связанных с ролевой структурой процедурной матрицы  $z_m$ , а затем с помощью функции связывания  $\Psi_m^a$  происходит генерация новой каузальной матрицы на сети личностных смыслов, которая копирует значение  $z_m^*$  с замещением абстрактных знаков-ролей объектными знаками, связанными с ролями отношением класс-подкласс. Затем на А-шаге происходит отбор тех каузальных матриц, которые представляют действия, выполнимые в текущих условиях  $z_{cur}$  (шаги 30–32). Для этого удаляются все каузальные матрицы, эффекты которых не включены в текущую ситуацию (напомним, что планирование осуществляется в обратном направлении). В заключение А-этапа выполняется одна из операций в картине мира  $\theta_a$ , осуществляющая в данном случае метарегулирование - проверку некоторой эвристики, которая может выражать, например, то правило, что нельзя повторять одинаковые действия, или лучше выполнить то действие, которое быстрее всего приближает к начальным условиям  $z_{start}$  (шаг 33). Любое эвристическое правило также представимо в виде каузальной матрицы личностного смысла знака, представляющего внутреннюю стратегию планирования своего поведения.

Завершается MAP-алгоритм Р-этапом. Здесь для каждой сгенерированной каузальной матрицы  $z_a$ , представляющей некоторое действие, формируется новая ситуация  $Sit_{next}$ , которая является результатом обратного применения действия в текущих условиях  $z_{cur}$ . Обратное применение (шаг 39) заключается в формировании каузальной матрицы  $z_{next}$ , состоящей из событий, являющихся либо колонками-условиями действия  $e_i \in \{e_k | e_k \in z_a, k \in I^e(z_a)\}$ , либо принадлежащих текущей активной каузальной матрице и не являющихся колонками-эффектами действия  $e_i \in z_{cur} \wedge e_i \notin \{e_j | e_j \in z_a, j \in I^e(z_a)\}$ . Именно этот этап представляет собой включение подпроцесса целеполагания в процесс планирования. Новая ситуация становится новой целью в следующей итерации. В текущий план  $Plan_{cur}$  добавляется пара текущие условия - применимое действие  $\langle z_{cur}, z_a \rangle$ . Если новая ситуация не покрывает стартовую ситуацию (шаг 41), то итерации продолжаются с новой текущей ситуацией, пополняя все множество генерируемых планов  $Plans_{fin}$ .

Константы  $d_a, d_m$ , которые определяют глубину распространения активности в каузальных сетях, являются параметрами алгоритма и задают внутреннюю характеристику носителя карти-

```

// A-этап
23:  $\hat{A}_{gen} = \emptyset$ 
24: for all  $z_m \in M^*$  do
    // Распространение активности вниз по сети значений
25:  $M^* = \varphi_m^\downarrow(z_m, d_m)$ 
26: for all  $z_m^* \in M^*$  do
27:  $\hat{A}_{gen} := \hat{A}_{gen} \cup \{\Psi_m^a(z_m^*)\}$ 

    // Совмещение активности образованных смыслов и текущей ситуации
28:  $\hat{A} = \hat{A}_{gen} \cup \hat{A}_{case}$ 
29: for all  $z_a \in \hat{A}$  do
30:  $z_{shift} = (e_i | i \in I^e)$ 
31: if  $z_{cur} \not\subseteq z_{shift}$  then
32:  $\hat{A} = \hat{A} \setminus \{z_a\}$ 

    // Метакогнитивная проверка эвристики
33:  $\hat{A} = \{\theta_a(z_a) | z_a \in \hat{A}\}$ 
34: if  $\hat{A} = \emptyset$  then
35: return  $\emptyset$ 

```

ны мира, различаясь от агента к агенту. Обычно в модельных экспериментах эти параметры не превышают 5.

```

// P-этап
36:  $Plans_{fin} := \emptyset$ 
37: for all  $z_a \in \hat{A}$  do
38:  $Plan_{cur} = Plan_{cur} \cup \{\langle z_{cur}, z_a \rangle\}$ 

    // Генерация новой ситуации - применение действия
39:  $z_{next} := (e_i | (e_i \in z_{cur} \wedge e_i \notin \{e_j | e_j \in z_a, j \in I^e(z_a)\}) \vee e_i \in \{e_k | e_k \in z_a, k \in I^e(z_a)\})$ 
40:  $Sit_{next} = \langle id_{next}, \emptyset, \emptyset, \{z_{next}\} \rangle$ 
41: if  $z_{next} \geq z_{start}$  then
42:  $Plans_{fin} = Plans_{fin} \cup \{Plan_{cur}\}$ 
43: else
44:  $Plans_{rec} := \text{map\_iteration}(z_{next}, z_{start}, Plan_{cur}, i + 1)$ 
45:  $Plans_{fin} = Plans_{fin} \cup Plans_{rec}$ 
46: return  $Plans_{fin}$ 

```

### 3.5.5. Модельный пример: мир кубиков

Продemonстрируем работу представленного алгоритма планирования поведения с помощью модельного эксперимента, доменом планирования для которого выступает широко известный в области автоматического планирования пример «мир кубиков» [16]. Описание домена на языке PDDL [11] состоит из определения типа (*blocks*), четырех предикатов (*ontable*, *clear*, *handempty*, *holding*) и четырех действий (*pick-up*, *put-down*, *stack*, *unstack*) (см. табл. 3.1).

Приведем пример решения с использованием MAP-алгоритма следующей задачи планирования - построение башни из четырех кубиков, лежащих на столе (табл. 3.1). Фрагмент каузальной сети на личностных смыслах, задающего каузальную матрицу смысла начальной ситуации

<pre>(define (domain BLOCKS)   (:requirements :strips :typing)   (:types block)   (:predicates (on ?x - block ?y - block)     (ontable ?x - block)     (clear ?x - block)     (handempty)     (holding ?x - block) )</pre>	<pre>(:action pick-up   :parameters (?x - block)   :precondition (and (clear ?x)     (ontable ?x) (handempty))   :effect     (and (not (ontable ?x))       (not (clear ?x))       (not (handempty))       (holding ?x)))</pre>	<pre>(:action put-down   :parameters (?x - block)   :precondition (holding ?x)   :effect     (and (not (holding ?x))       (clear ?x)       (handempty)       (ontable ?x)))</pre>
<pre>(:action stack   :parameters (?x - block ?y - block)   :precondition (and (holding ?x)     (clear ?y))   :effect     (and (not (holding ?x))       (not (clear ?y))       (clear ?x)       (handempty)       (on ?x ?y)))</pre>	<pre>(:action unstack   :parameters (?x - block ?y - block)   :precondition (and (on ?x ?y) (clear ?x)     (handempty))   :effect     (and (holding ?x)       (clear ?y)       (not (clear ?x))       (not (handempty))       (not (on ?x ?y))))</pre>	<pre>(define (problem BLOCKS-4-0)   (:domain BLOCKS)   (:objects D B A C - block)   (:INIT (CLEAR C) (CLEAR A) (CLEAR B) (CLEAR D)     (ONTABLE C) (ONTABLE A)     (ONTABLE B) (ONTABLE D)     (HANDEMPY))   (:goal (AND (ON D C) (ON C B)     (ON B A))))</pre>

Таблица 3.1: Описание домена планирование «мир кубиков» и задачи построения башни.

с именем *start*, приведен на рис. 3.5. У каждого отдельного кубика (*a*, *b*, *c*, *d*) одна каузальная матрица в узле сети, в то время как для предикатов *clear* и *ontable* имеется по четыре матрицы в узле, т.к. они принимают участие в событиях с разными кубиками. Например, матрицы знака *clear* присутствуют в 1, 3, 5 и 7 столбцах матрицы знака *start* одновременно с кубиками *a*, *b*, *c*, *d* соответственно, что означает, что на всех кубиках не лежат другие кубики.

На рис. 3.6 представлена целевая ситуация, в которой все четыре кубика составлены в башню: кубик *d* находится на столе, кубик *c* - на *d*, *b* - на *c*, и, наконец, на самом верху - кубик *a*. Предикат *on*, который задает отношение «находится на» может быть представлен в виде процедурный каузальной матрицы, чтобы явно продемонстрировать несимметричность этого отношения, хотя использование объектной матрицы никак не влияет на результат. Здесь также от каждого кубика в ситуации участвует одна каузальная матрица, а предикат *on* представлен в виде узла с тремя каузальными матрицами, т.к. участвует в матрице знака целевой ситуации *goal* в различных столбцах с тремя различными кубиками.

На рис. 3.7 представлен фрагмент каузальной сети на значениях, представляющий собой элементы процедурной каузальной матрицы знака *stack* и отношения «класс-подкласс» объектов-кубиков, класса *block* и ролей в действии *stack*: *block?x* (аналог семантической роли «объект») *block?y* (аналог семантической роли «директив»). Здесь необходимо отметить, что метка  $\epsilon_1$  ребра *v* (индекс исходной матрицы узла, из которого исходит ребро *v*) в случае отношения «класс-подкласс» (*a*→*block*, *block*→*block?x*) принимает специальное нулевое значение, что означает, что исходной может быть любая казуальная матрица данного узла. Иными словами, роль *block?x* может играть любой из кубиков *a*, *b*, *c* или *d*.

Рассмотрим этапы MAP-алгоритма: S, M, A и P-этапы - на первой итерации алгоритма. Рассмотрим простейший случай, когда наш интеллектуальный агент не накопил опыта действия в условиях данной задачи. В следствие этого на S-этапе множество прецедентов  $\hat{A}_{case}$  будет пусто. С учетом того, что планирование осуществляется в обратном направлении, на первом M-этапе мы рассматриваем целевую ситуацию как текущую активную матрицу предсказания  $z_{cur}$  и распространение от нее активности вниз по сети личностных смыслов будет активировать множество  $A^*$ , совпадающее с фрагментом, изображенным на рис.3.5. В множество значений

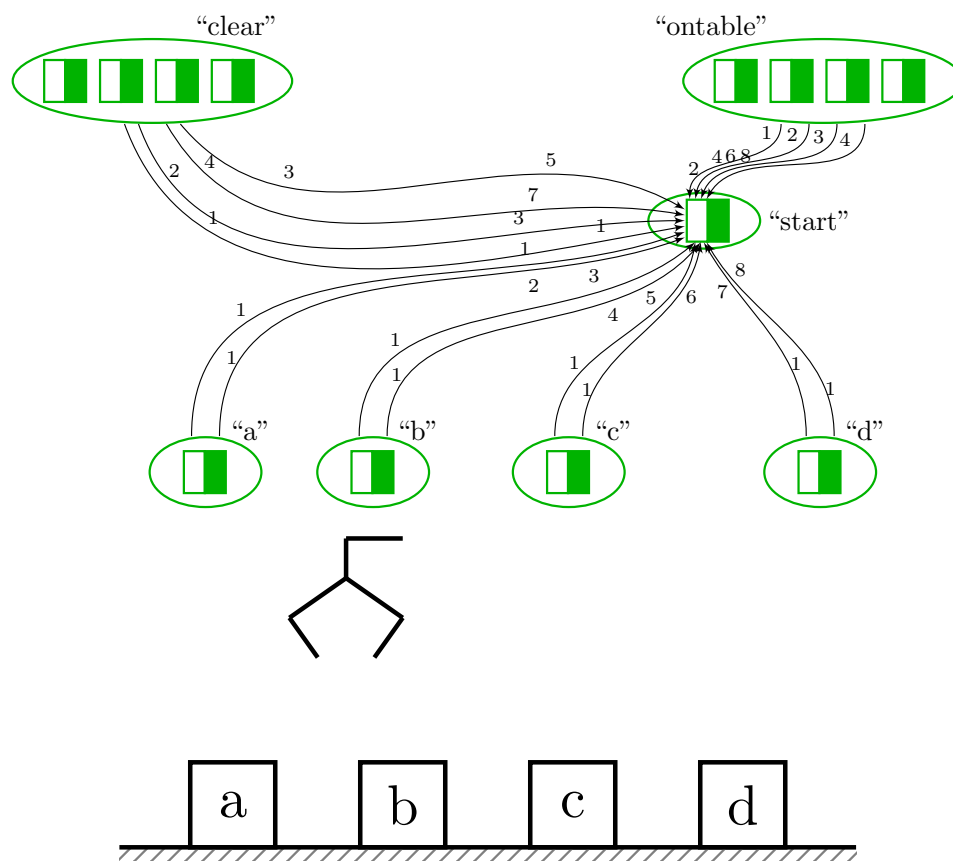


Рис. 3.5: Начальная ситуация: все четыре кубика лежат на столе.

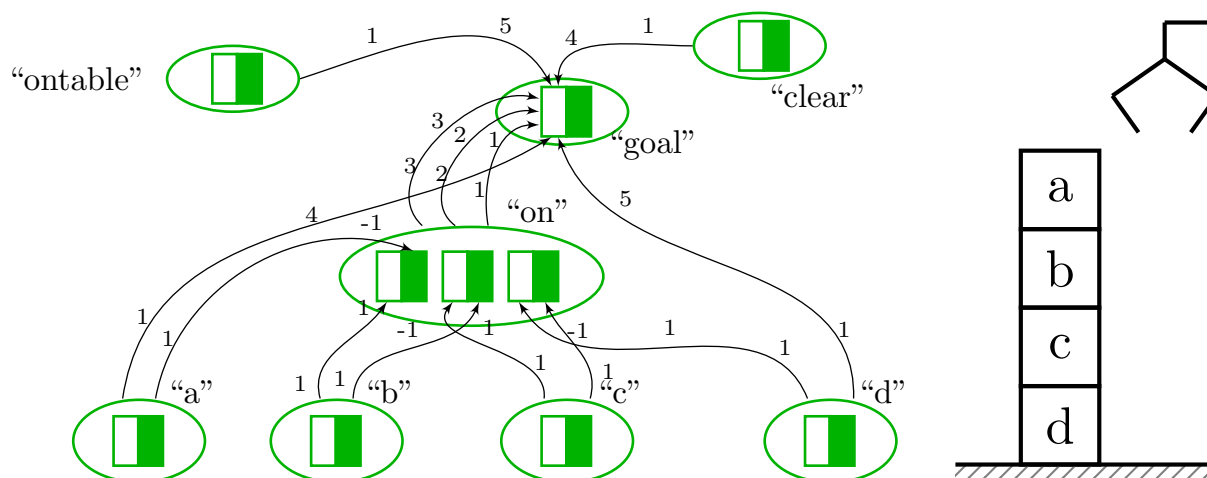


Рис. 3.6: Целевая ситуация: башня из четырех кубиков.



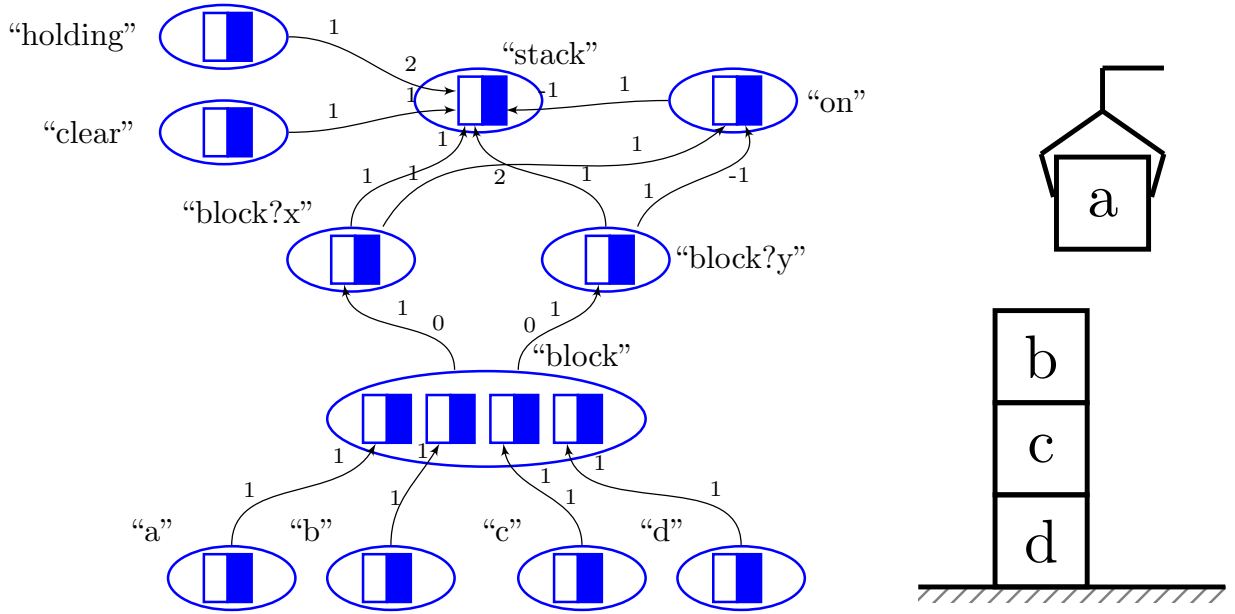


Рис. 3.7: Фрагмент каузальной сети на значениях: представление действия *stack*.

$M^*$  попадут значения знаков, представляющих кубики  $a, b, c, d$  - это все связанные с ними по сети значений процедурные знаки *stack*, *unstack*, *pick-up*, *put-down*. На рис. 3.8 слева представлен фрагмент каузальной сети на значениях, включающий процедурную матрицу знака *unstack*. Для активации матрицы знака *unstack* от матрицы знака  $a$  достаточно использовать в качестве константы  $d_m$  значение в три ребра.

На А-этапе происходит генерация новых каузальных матриц  $\hat{A}_{gen}$  в сети личностных смыслов путем распространения активности вниз по сети значений. Пример такого распространения, в результате которого образуется новая каузальная матрица знака *unstack*, представлен на рис. 3.8 справа. Новая каузальная матрица на сети личностных смыслов является копией соответствующей матрицы на сети значений с заменой ссылок, указывающих на знаки-роли, на ссылки, указывающие на объектные не абстрактные знаки, представляющие кубики. В нашем примере будет сгенерирована матрица, соответствующая действию *unstack(a, b)* - снять кубик  $a$  с кубика  $b$ .

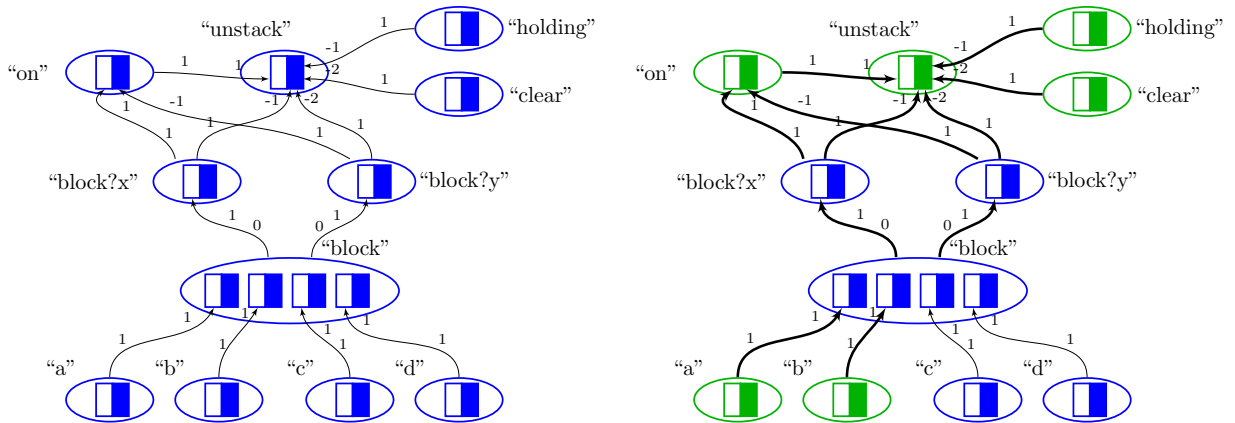


Рис. 3.8: Распространение активности по сети значений, генерация личностного смысла знака *unstack*.

ка  $b$ . На данном этапе будет сформировано по четыре матрицы для одноместных действий и двенадцать - для двухместных.

В завершение А-этапа эффекты построенных процедурных матриц проверяются на применимость в условиях текущей ситуации и среди применимых действий отбираются те, которые удовлетворяют некоторому метакогнитивному правилу (эвристике)  $\theta_a$ . В нашем примере, единственным применимым действием из всех сформированных вариантов будет действие  $unstack(a,b)$ . В качестве эвристики может быть использовано жадное правило: выбираем те действия, которые максимально быстро приближают к успеху (новая ситуация имеет больше общих признаков с целевой).

В конце итерации, на Р-этапе, генерируется новая каузальная матрица  $z_{next}$  в сети личностных смыслов знака, представляющего следующую ситуацию планирования. В нашем примере новая текущая ситуация будет совпадать с предыдущей за исключением того, что кубик  $a$  теперь находится в манипуляторе, а на кубике  $b$  теперь ничего не находится. В текущий план  $Plan_{cur}$  добавляется пара  $\langle z_{cur}, z_a \rangle$  каузальных матриц текущей ситуации и выбранного действия. Т.к. новая ситуация не включает в себя стартовую ситуацию начинаем новую итерацию.

В результате работы MAP-алгоритма в нашем примере будет получен план из 6 действий:  $pick-up(c)$ ,  $stack(c,d)$ ,  $pick-up(b)$ ,  $stack(b,c)$ ,  $pick-up(a)$ ,  $stack(a,b)$ . В завершение работы агента над этой задачей он сохраняет прецедент планирования в своей картине мира: он сохраняет начальную и конечную ситуацию в виде новых знаков и образует новый процедурный знак, который можно назвать как «построить башню». Единственным признаком в столбце условий данного знака будет начальная ситуация, единственным признаком в столбце эффектов - целевая ситуация. После этого интеллектуальный агент сможет решить ту же задачу, найдя на S-этапе необходимое действие, которое сразу приведет к цели. Такая же ситуация может возникнуть и в другой задаче по ходу ее решения, что приведет к сокращению пространства поиска подходящих действий.

### 3.5.6. Выводы

В классической символьной постановке задачи планирования в искусственном интеллекте возникает проблема совмещения символьных алгоритмов планирования с методами обучения, сохраняющими как опыт планирования, так и обеспечивающими адаптацию действий к новым условиям. Данная проблема смыкается с проблемой символизации - привязки используемых в классическом способе представления знаний символов к реальным объектам, процессам и свойствам внешней среды. Особенно остро данные проблемы проявляются при реализации обучаемых робототехнических систем, для которых важно сопоставлять символы, используемые при концептуальном планировании с данными, поступающими от сенсоров. При этом, когда перед сложной технической системой ставится задача планирования в довольно широком спектре условий, в том числе и коалиционных, подходы с заранее сформированной, хоть и пополняемой, базой знаний показывают свою неэффективность. Способ представления знаний, на котором базируются функции управления интеллектуальным агентом, должен изначально поддерживать возможность привязки символов к данным сенсоров и поддерживать как представление внутренней информации, так и обобщенной, согласованной с другими участниками коалиции информации.

В настоящем проекте эти задачи решаются с использованием знаковой картины мира. Исследована структура внутренней процедурной компоненты элементов семиотического представления знаний (знаков) интеллектуального агента. Исследована взаимосвязь процессов целеполагания и процесса функционирования внутренней процедурной компоненты знака. Представлен

оригинальный метод планирования (МАР-алгоритм), который использует и сохраняет прецедентную информацию в процессе синтезе плана. МАР-алгоритм включает в себя этап целеполагания - генерации новой цели на основе предыдущего опыта и текущей ситуации. Используемый четырехкомпонентный элемент картины мира (знак) позволяет кодировать не только информацию о внешней среде, но и внутренние характеристики и мотивационно-потребностные свойства, а так же общие коллективные знания. Представленный алгоритм также может быть использован и для составления коалиционных планов. Для демонстрации работы МАР-планировщика приведен модельный пример составления плана для одной из задач «мира кубиков». Программная реализация и модельные эксперименты представлены в репозитории <https://github.com/cogisa/map-planner>.

1. *Barsalou L. W.* Perceptual symbol systems // *The Behavioral and brain sciences*. — 1999. — Т. 22, № 4. — 577—609, discussion 610—660.
2. *Barto A. G., Bradtke S. J., Singh S. P.* Learning to act using real-time dynamic programming // *Artificial Intelligence*. — 1995. — Т. 72, № 1—2. — С. 81—138.
3. *Besold T. R., Kuhnberger K. U.* Towards integrated neural-symbolic systems for human-level AI: Two research programs helping to bridge the gaps // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. — 2015. — Т. 14. — С. 97—110.
4. *Bonet B., Geffner H.* Solving POMDPs: RTDP-Bel vs. point-based algorithms // *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*. — 2009. — С. 1641—1646.
5. *Borrajo D., Roubířková A., Serina I.* Progress in Case-Based Planning // *ACM Computing Surveys*. — 2015. — Янв. — Т. 47, № 2. — С. 1—39.
6. *Brafman R. I.* A Privacy Preserving Algorithm for Multi-Agent Planning and Search // *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015)*. — 2015. — С. 1530—1536.
7. *Buxhoeveden D. P., Casanova M.* The minicolumn hypothesis in neuroscience // *Brain*. — 2002. — Т. 125, № 5. — С. 935—951.
8. *Chella A., Frixione M., Gaglio S.* Anchoring symbols to conceptual spaces: The case of dynamic scenarios // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2003. — Т. 43, № 2—3. — С. 175—188.
9. *Constantinople C. M., Bruno R. M.* Deep cortical layers are activated directly by thalamus // *Science*. — 2013. — Т. 1591, June. — С. 1591—1594.
10. *De La Rosa T., Garcia-Olaya A., Borrajo D.* A case-based approach to heuristic planning // *Applied Intelligence*. — 2013. — Т. 39, № 1. — С. 184—201.
11. Deterministic planning in the fifth international planning competition: PDDL3 and experimental evaluation of the planners / A. E. Gerevini [и др.] // *Artificial Intelligence*. — 2009. — Т. 173, № 5—6. — С. 619—668.
12. *Edelman G. M.* Neural Darwinism: The Theory Of Neuronal Group Selection. — New York : Basic Books, 1987. — С. 400.
13. *Evans J., Stanovich K. E.* Dual-process theories of higher cognition: Advancing the debate // *Perspectives on Psychological Science*. — 2013. — Т. 8, № 3. — С. 223—241.
14. *Flavell J. H.* Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive-developmental inquiry // *American Psychologist*. — 1979. — Т. 34, № 10. — С. 906—911.

15. *George D., Hawkins J.* Towards a mathematical theory of cortical micro-circuits // PLoS computational biology. — 2009. — T. 5, № 10. — e1000532.
16. *Gupta N., Nau D. S.* On the complexity of Blocks-World planning // Artificial Intelligence. — 1992. — T. 56, № 2—3. — C. 223—254.
17. *Hammond K. J.* Case-based planning: A framework for planning from experience // Cognitive Science. — 1990. — T. 14, № 3. — C. 385—443.
18. *Harnad S.* Symbol Grounding Problem // Physica. — 1990. — T. 42. — C. 335—346. — arXiv: \FontspecSetCheckBoolFalse9906002 [arXiv:cs.AI].
19. *Heintz F., Kvarnstrom J., Doherty P.* Bridging the sense-reasoning gap: DyKnow - Stream-based middleware for knowledge processing // Advanced Engineering Informatics. — 2010. — T. 24, № 1. — C. 14—26.
20. *Helmert M.* The fast downward planning system // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2006. — T. 26. — C. 191—246. — arXiv: \FontspecSetCheckBoolFalsearXiv:1109.6051v1.
21. *Hoffmann J., Nebel B.* The FF Planning System: Fast Plan Generation Through Heuristic Search // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2001. — T. 14. — C. 253—302.
22. *Kaelbling L. P., Lozano-Pérez T.* Integrated task and motion planning in belief space // The International Journal of Robotics Research. — 2013. — T. 32, № 9—10. — C. 1194—1227.
23. *Kahneman D.* Thinking Fast and Slow. — New York : Penguin, 2011. — C. 443.
24. *Kelley T. D.* Developing a psychologically inspired cognitive architecture for robotic control: The Symbolic and Subsymbolic Robotic Intelligence Control System (SS-RICS) // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2006. — T. 3, № 3. — C. 219—222.
25. *Krajca P., Outrata J., Vychodil V.* Advances in algorithms based on CbO // Proceedings of the 7th International Conference on Concept Lattices and Their Applications / под ред. M. Kryszkiewicz, S. Obiedkov. — CEUR, 2010. — C. 325—337.
26. *Merwe D. V. D., Obiedkov S., Kourie D.* AddIntent: A new incremental algorithm for constructing concept lattices // Concept Lattices / под ред. P. Eklund. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — C. 372—385. — (Lecture Notes in Computer Science).
27. *Neisser U.* Cognition and Reality: Principles and Implications of Cognitive Psychology. — W. H. Freeman, Company, 1976. — C. 230.
28. *Norris E. M.* An Algorithm for Computing the Maximal Rectangles in a Binary Relation // Revue Roumaine de Mathématiques Pures et Appliquées. — 1978. — T. 23, № 2. — C. 243—250.
29. *Panov A. I., Yakovlev K. S.* Psychologically inspired planning method for smart relocation task // Procedia Computer Science. — 2016. — T. 88. — (In Press).
30. Practical intelligence in everyday life / R. J. Sternberg [и др.]. — Cambridge University Press, 2000. — C. 304.
31. *Red'ko V., Burtsev M.* Modeling of Mechanism of Plan Formation by New Caledonian Crows // Procedia Computer Science. — 2016. — T. 88.
32. *Richter S., Westphal M.* The LAMA planner: Guiding cost-based anytime planning with landmarks // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2010. — T. 39. — C. 127—177. — arXiv: \FontspecSetCheck3839.

33. *Sardina S., Silva L. D., Padgham L.* Hierarchical Planning in BDI Agent Programming Languages: A Formal Approach // Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS'06). — 2006. — С. 1001—1008.
34. *Skrynnik A., Petrov A., Panov A. I.* Hierarchical Temporal Memory Implementation with Explicit States Extraction // Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists / под ред. А. В. Самсонович, В. В. Климов, Г. В. Рыбина. — Springer International Publishing, 2016. — С. 219—225. — (Advances in Intelligent Systems and Computing).
35. *Stanovich K. E.* Distinguishing the reflective, algorithmic, and autonomous minds: Is it time for a tri-process theory? // In two minds: Dual processes and beyond / под ред. J. Evans, K. Frankish. — Oxford University Press, 2009. — С. 55—88.
36. *Sun R., Hélie S.* Psychologically realistic cognitive agents: taking human cognition seriously // Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence. — 2012. — Т. 25, № 1. — С. 65—92.
37. TAMPRA'12: Proceedings of the 2012 ICAPS Workshop on Combining Task and Motion Planning for Real-World Applications / под ред. М. Cirillo [и др.]. — Atibaia, 2012. — С. 61.
38. *Treur J.* Dynamic modeling based on a temporal-causal network modeling approach // Biologically Inspired Cognitive Architectures. — 2016. — Т. 16. — С. 131—168.
39. *Выготский Л. С.* Мышление и речь. — Изд. 5-е, — М. : Издательство "Лабиринт", 1999. — С. 352.
40. *Иваницкий А. М.* Мозговая основа субъективных переживаний: гипотеза информационного синтеза // Журнал высшей нервной деятельности. — 1996. — Т. 46, № 2. — С. 241—282.
41. *Леонтьев А. Н.* Деятельность. Сознание. Личность. — Изд. 2-е. — М. : Политиздат, 1977. — С. 304.
42. *Макаров Д. А., Панов А. И., Яковлев К. С.* Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2015. — № 3. — С. 18—33.
43. *Осинов Г. С.* Знаковые модели как альтернатива символьным // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Материалы III Всероссийской Пospelовской конференции с международным участием / под ред. А. В. Колесников. — Издательство БФУ им. Иммануила Канта, 2016. — С. 56—69.
44. *Осинов Г. С.* Когнитивное мета моделирование // Информационные технологии и системы: Труды Четвертой международной научной конференции / под ред. Ю. С. Попков, А. В. Мельников. — Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2015. — С. 94—100.
45. *Осинов Г. С.* От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта. — 2002. — № 6. — С. 3—7.
46. *Осинов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014. — № 4. — С. 49—62.
47. *Осинов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 6. — С. 47—61.

48. *Осипов Г. С., Поспелов Д. А.* Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. — 1999. — № 1. — С. 9—35.
49. *Панов А. И.* Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. — 2014. — Т. 1, № 7. — С. 863—874.
50. *Панов А. И.* Моделирование процесса планирования поведения в знаковой картине мира // Седьмая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Светлогорск, 20-24 июня 2016 г. / под ред. Ю. Александров, К. Анохин. — М. : Изд-во "Институт психологии РАН", 2016. — С. 478—480.
51. *Панов А. И.* Представление знаний автономных агентов, планирующих согласованные перемещения // Робототехника и техническая кибернетика. — 2015. — 4(9). — С. 34—40.
52. *Панов А. И., Петров А. В.* Иерархическая временная память как модель восприятия и её автоматное представление // Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15-20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. Т. 1. — М. : ИСА РАН, 2015. — С. 198—202.
53. *Панов А. И., Яковлев К. С.* Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2016. — № 4. — С. 68—78.
54. Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами / Д. В. Зубарев [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. — 2013. — № 4. — С. 10—28.
55. *Чувгунова О. А.* Планирование как предмет психологического исследования // Психологические исследования. — 2015. — Т. 8, № 43. — С. 11.
56. *Чудова Н. В.* Концептуальная модель картины мира для задачи моделирования поведения, основанного на сознании // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 2. — С. 51—62.

### **3.6. Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году**

Проект выполнялся индивидуально без привлечения сторонних лиц для выполнения основных работ.

### **3.7. Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта**

1. 22.04.2016 — устный доклад «Biologically and psychologically inspired modelling in BICA», First International Early Research Career Enhancement School on Biologically Inspired Cognitive Architectures «Fierces on BICA» (21-24 апреля 2016, Москва).
2. 23.06.2016 — устный доклад «Моделирование процесса планирования поведения в знаковой картине мира», Седьмая международная конференция по когнитивной науке (20-24 июня 2016, Светлогорск).

### **3.8. Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных в 2016 году, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.**

53. *Панов А. И., Яковлев К. С.* Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2016. — № 4. — С. 68—78.
34. *Skrynnik A., Petrov A., Panov A. I.* Hierarchical Temporal Memory Implementation with Explicit States Extraction // Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists / под ред. А. V. Samsonovich, V. V. Klimov, G. V. Rybina. — Springer International Publishing, 2016. — С. 219—225. — (Advances in Intelligent Systems and Computing).
50. *Панов А. И.* Моделирование процесса планирования поведения в знаковой картине мира // Седьмая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Светлогорск, 20-24 июня 2016 г. / под ред. Ю. Александров, К. Анохин. — М. : Изд-во "Институт психологии РАН", 2016. — С. 478—480.