

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
Information systems. Computer sciences. Issues of information security

УДК 004.825
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Структура ассоциативно-гетерархической памяти

Р.В. Душкин[®], В.А. Лелекова[®], В.Ю. Степаньков, С. Фадеева

Агентство Искусственного Интеллекта, Москва, 127591 Россия
[®] Авторы для переписки, e-mail: drv@aiagency.ru, lv@aiagency.ru

Резюме

Цели. Начиная с XX века методы искусственного интеллекта разделяют на две парадигмы – нисходящую и восходящую. Методы восходящей парадигмы сложно интерпретировать в виде вывода естественного языка, а в методах нисходящей парадигмы затруднена актуализация информации. Обработка естественного языка (NLP, от англ. Natural Language Processing) искусственным интеллектом остается актуальной проблемой современности. Основная задача NLP – создание программ, способных обрабатывать и понимать естественные языки. С учетом авторского подхода к построению агентов искусственного интеллекта (ИИ-агентов) обработка естественного языка должна также вестись на двух уровнях: на нижнем – при помощи методов восходящей парадигмы и на верхнем – при помощи символьных методов нисходящей парадигмы. Для решения этих задач авторами предложен новый математический формализм – ассоциативно-гетерархическая память (АГ-память), структура и функционирование которой основаны как на бионических принципах, так и на достижениях обеих парадигм искусственного интеллекта.

Методы. Использованы методы искусственного интеллекта и алгоритмы распознавания естественного языка.

Результаты. Ранее авторским коллективом была исследована проблема привязки символов в приложении к АГ-памяти. В ней привязка абстрактных символов осуществлялась с помощью мультисенсорной интеграции. При этом первичные символы, получаемые программой, преобразовывались в интегрированные абстрактные символы. В данной статье приведено полное описание АГ-памяти в виде формул, пояснений к ним и соответствующим схемам.

Выводы. В статье представлена максимально универсальная структура АГ-памяти. При работе с АГ-памятью из множества возможных модулей следует выбирать те части АГ-памяти, которые обеспечивают успешное и эффективное функционирование ИИ-агента.

Ключевые слова: искусственный интеллект, обработка естественного языка, ассоциативно-гетерархическая память, ИИ-агент, абстрактные символы, гиперсеть, модель управления предикатного символа, классификатор ролей актантов, гиперграф

• Поступила: 16.03.2022 • Доработана: 13.07.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

Для цитирования: Душкин Р.В., Лелекова В.А., Степаньков В.Ю., Фадеева С. Структура ассоциативно-гетерархической памяти. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Structure of associative heterarchical memory

Roman V. Dushkin [®], Vasilisa A. Lelekova [®], Vladimir Y. Stepankov,
Sandra Fadeeva

Artificial Intelligence Agency, Moscow, 127591 Russia

[®] Corresponding authors, e-mail: drv@aiagency.ru, lv@aiagency.ru

Abstract

Objectives. Since the 20th century, artificial intelligence methods can be divided into two paradigms: top-down and bottom-up. While the methods of the ascending paradigm are difficult to interpret as natural language outputs, those applied according to the descending paradigm make it difficult to actualize information. Thus, natural language processing (NLP) by artificial intelligence remains a pressing problem of our time. The main task of NLP is to create applications that can process and understand natural languages. According to the presented approach to the construction of artificial intelligence agents (AI-agents), processing of natural language should be conducted at two levels: at the bottom, methods of the ascending paradigm are employed, while symbolic methods associated with the descending paradigm are used at the top. To solve these problems, the authors of the present paper propose a new mathematical formalism: associative heterarchical memory (AH-memory), whose structure and functionality are based both on bionic principles and on the achievements of top-down and bottom-up artificial intelligence paradigms.

Methods. Natural language recognition algorithms were used in conjunction with various artificial intelligence methods.

Results. The problem of character binding as applied to AH-memory was explored by the research group in earlier research. Here, abstract symbol binding was performed using multi-serial integration, eventually converting the primary symbols produced by the program into integrated abstract symbols. The present paper provides a comprehensive description of AH-memory in the form of formulas, along with their explanations and corresponding schemes.

Conclusions. The most universal structure of AH-memory is presented. When working with AH-memory, a developer should select from a variety of possible module sets those AH-memory components that support the most successful and efficient functioning of the AI-agent.

Keywords: artificial intelligence, natural language processing, associative heterarchical memory, AI-agent, abstract symbols, hypernet, predicate symbol control model, actant role classifier, hypergraph

• Submitted: 16.03.2022 • Revised: 13.07.2022 • Accepted: 12.09.2022

For citation: Dushkin R.V., Lelekova V.A., Stepankov V.Y., Fadeeva S. Structure of associative heterarchical memory. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

Глоссарий

Искусственный интеллект (ИИ) – комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Обработка естественного языка – подраздел информатики и ИИ, посвященный анализу естественных (человеческих) языков с помощью компьютеров.

ИИ-агент – полноценная кибернетическая машина, которая имеет систему управления, непрерывно получающую информацию с сенсорных систем агента, и воздействует на окружающую среду при помощи исполнительных устройств (или актуаторов).

Glossarium

Artificial intelligence (AI) is a set of technological solutions for simulating human cognitive functions (including self-learning, finding solutions without a predetermined algorithm, and obtaining insights) and yielding specific, practically significant results that are at least comparable with those gained through human intellectual activity.

Natural language processing is a subfield of computer science and AI dedicated to the analysis of natural (human) languages using computers.

AI-agent is a fully-fledged cybernetic machine encompassing a control system that continuously receives information from its sensory systems and operates on its environment by means of actuators.

ВВЕДЕНИЕ

Методы искусственного интеллекта [1] разделяют на две парадигмы – нисходящую и восходящую [2]. Методы восходящей парадигмы применяют для построения моделей когнитивных процессов, используя при этом большие объемы данных. Таким образом получают модель класса «черный ящик», точность которой можно довести до необходимого значения, но процессы принятия решений в которой сложно (или даже практически невозможно) интерпретировать с человеческой точки зрения [3]. С помощью методов нисходящей парадигмы строят модели, основанные на знаниях, которые представляют собой модели класса «белый ящик». Однако в таких моделях сложно поддерживать актуальность состояния при изменении структуры проблемной области, а само построение таких моделей – сложный и трудоемкий процесс [4].

Обработка естественного языка¹ (ЕЯ, NLP, от англ. Natural Language Processing) искусственным интеллектом остается актуальной проблемой современности [5, 6]. Основная задача NLP – создание программ, способных обрабатывать и понимать естественные языки. С учетом авторского подхода к построению ИИ-агентов [7] обработка естественного языка должна также вестись на двух уровнях: на нижнем – при помощи методов восходящей парадигмы (нейронные сети глубокого обучения для решения лингвистических задач) и на верхнем – при помощи символьных методов нисходящей парадигмы (семантические сети и онтологии для представления знаний и машинного вывода на них).

Для решения этих задач авторами предложен новый математический формализм – ассоциативно-гетерархическая память (АГ-память), структура и функционирование которой основаны как

¹ Естественный язык – язык, на котором люди говорят или пишут. [Natural language is a language that human beings speak or write.]

на бионических принципах, так и на достижениях обеих парадигм искусственного интеллекта. АГ-память базируется на этом понимании устройства когнитивного. По своей структуре она является гиперграфом [8], в котором узлы представляют собой символы, а связи и гиперсвязи между символами – это отображение отношений между концептами.

В статье приведено полное описание теоретико-множественной структуры АГ-памяти.

СТРУКТУРА АССОЦИАТИВНО-ГЕТЕРАРХИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

АГ-память представляет собой кортеж – упорядоченный набор элементов фиксированной длины, далее представленный в формуле (1), между элементами которого существуют пять множеств связей, показанных на рис. 1 в виде графа [9].

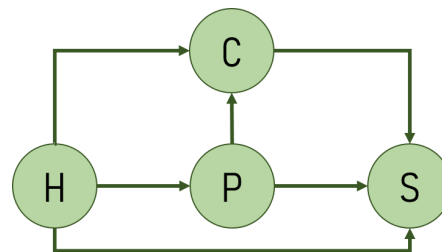


Рис. 1. Граф связей между объектами АГ-памяти

Связь между двумя множествами на графе обозначает все множество ассоциативных связей между их объектами.

$$AG = \langle S, C, P, H, L \rangle, \quad (1)$$

где S – множество абстрактных символов, схема формирования которых представлена на рис. 2; C – АГ-гиперсеть общих знаний; P – АГ-гиперсеть частных знаний; H – АГ-гиперсеть личной истории; L – множество ассоциативных связей между объектами множеств S, C, P и H.

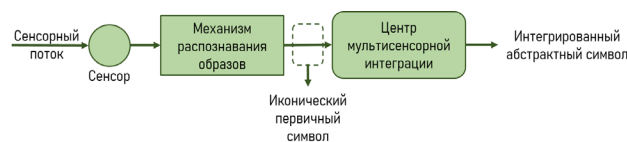


Рис. 2. Схема формирования абстрактного символа

Формирование абстрактного символа происходит следующим образом:

1. На вход сенсорного канала ИИ-агента дискретно или непрерывно поступает сенсорный поток данных, который фильтруется соответствующим сенсором и отправляется на обработку в механизм распознавания образов.

2. Механизм распознавания образов соответствующей сенсорной модальности осуществляет выделение воспринимаемых образов среди сенсорного потока, их обособление и дальнейшую отправку в центр мультисенсорной интеграции. Сенсорные модальности могут состоять из одной или нескольких сенсорных систем, каждая из которых состоит из одного или нескольких сенсорных каналов [10].
3. Центр мультисенсорной интеграции собирает выделенные и распознанные образы со всех сенсорных модальностей ИИ-агента и осуществляет построение интегрированного абстрактного символа, привязанного ко всем распознанным образам сенсорного восприятия. Таким образом, ИИ-агент решает проблему привязки символов [11].

Объект S представляет собой следующую структуру:

$$S = \{s_i\}_{i=1}^N,$$

где s_i – абстрактный символ с идентификатором i при N абстрактных символах в множестве S . При этом каждый абстрактный символ s_i является следующим объектом:

$$s_i = \langle UID, R \rangle$$

где s_i – произвольная уникальная последовательность символов из выделенного алфавита V ; UID – уникальный идентификатор [12] абстрактного символа; R – размеченное множество первичных сенсорных символов, к которым привязан абстрактный символ s_i .

$$R = \bigcup_{i=1}^K R_i, \text{ при этом } R_i \cap R_j = \emptyset, \text{ если } i \neq j.$$

У ИИ-агента имеется K сенсорных модальностей и множества R_i ($i = 1, \dots, K$) – это множества первичных сенсорных символов для каждой сенсорной модальности i . АГ-гиперсети C , P и H с математической точки зрения являются гиперграфами [13] – обобщенными случаями графа, при которых ребром могут соединяться любые подмножества вершин. Элементы АГ-памяти C , P и H представляют собой следующий кортеж:

$$e = \langle s^* | m | m^* | g | k | T | N \rangle, x, f \rangle, \quad (2)$$

где N – гиперсвязь между объектами АГ-памяти из множеств C , P или H ; x – текущий уровень возбужденности элемента АГ-памяти; f – функция активации элемента АГ-памяти; m – абстрактный символ второго порядка, $m = \langle UID, Pr, Mt \rangle$, где

UID – уникальный идентификатор символа; Pr и Mt – множества свойств и мета-свойств символов соответственно; s^* и m^* – ссылка на абстрактный символ из множества S и ссылка на абстрактный символ второго порядка из множеств C , P и H соответственно, представляющие собой идентификаторы символов с дополнительной информацией, по которой можно идентифицировать тип ссылки и саму ссылку:

$$s^* = \langle S^*, UID, UID^* \rangle, m^* = \langle M^*, UID, UID^* \rangle.$$

Здесь S^* и M^* – метки, подтверждающие релевантность ссылок; UID – уникальный идентификатор s и m , на который имеется соответствующая ссылка; UID^* – уникальный идентификатор самой ссылки.

Мета-свойства из множества Mt представляют собой семантический набор свойств, находящихся отражение в паттернах ИИ-агента и заложенных в его реализацию непосредственно в коде. Свойства из множества Pr представляют собой чисто синтаксические конструкции, семантика которых для ИИ-агента неизвестна на программном уровне и выявляется только в процессе функционирования АГ-памяти с учетом привязки всех символов к сенсорной информации. Оба множества представляют собой набор элементов следующего вида:

$$p = \langle name, value, type, unit \rangle,$$

где все объекты, входящие в состав свойства p , представляют собой строки. Строки $name$ – наименование свойства и $value$ – значение свойства – обязательно должны быть непустыми, а строки $type$ – тип свойства и $unit$ – единица измерения значения свойства – могут быть пустыми. Свойство конкретного элемента АГ-памяти может быть идентифицировано по уникальному идентификатору, такому как $UID.name$, т.е. в одном элементе АГ-памяти не может быть двух свойств с одинаковым наименованием.

В (2) g – функциональный символ, предназначенный для таких элементов знаний ИИ-агента, которые имеют особые поведенческие реакции или специальные процедуры обработки, такие как кванторы или логические пропозиционные связки (союзы «и», «или» и т.д.).

Функциональные символы могут использоваться для описания произвольных отношений между некоторыми элементами АГ-памяти и представляют собой следующий кортеж:

$$g = \langle UID, ID, \{e_i^*\}_{i=1}^Z \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор функционального символа; ID – идентификатор типа

функциональности, необходимый для указания на то, какой именно поведенческий паттерн у ИИ-агента соответствует выбранному функциональному символу; e_i^* – i -ая ссылка на элемент АГ-памяти из множества операндов (значение, переменная или выражение, расположенное слева или справа от оператора) функционального символа; Z – количество операндов функционального символа.

Символом k в (2) обозначен список элементов АГ-памяти, предназначенный для группировки элементов АГ-памяти в единый объект, что необходимо для формирования иерархий и гетерархий. Фактически k представляет собой идентифицированное и упорядоченное множество ссылок на произвольные объекты АГ-памяти, выраженное в следующем кортеже:

$$k = \langle UID, \{e_i^*\}_{i=1}^Y, Pr, Mt \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор списка элементов АГ-памяти; e_i^* – i -ая ссылка на элемент АГ-памяти; Y – количество элементов в списке; Pr и Mt – множества свойств и мета-свойств списка элементов АГ-памяти соответственно, определяющиеся аналогично пункту m .

В (2) шаблон модели управления предикатного символа T [14] представляет собой следующий кортеж:

$$T = \langle UID, s^*, A \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор шаблона модели управления предикатного символа; s^* – ссылка на абстрактный символ из множества S , которому соответствует предикат описываемого шаблона модели управления; $A = \{a_i\}_{i=1}^Q$ – множество актантов в модели управления предикатного символа, состоящее из i -го количества актантов валентности Q (общее количество актантов) предикатного символа. Актант в модели управления предикатного символа a представляет собой роль элемента, который занимает вакантное место в случае реализации шаблона модели управления [15].

Для конкретного ИИ-агента должен быть составлен классификатор ролей элементов в моделях управления предикатных символов. Ниже представлен предлагаемый авторами классификатор ролей актантов (языковых выражений, заполняющих валентность предикатного символа), который решает задачи обработки естественного языка:

1. СУБЪЕКТ (SUBJECT) – роль актанта, выполняющего действие предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде подлежащего в синтаксической конструкции предиката.

2. ОБЪЕКТ (OBJECT) – роль актанта, над которым выполняется действие предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде прямого дополнения в синтаксической конструкции предиката.

3. ЛОКАЦИЯ (LOCATION) – роль актанта, которая указывает место выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде обстоятельства места в синтаксической конструкции предиката, либо дополнения в каком-либо грамматическом локативе. Также эта роль может разбиваться на несколько подролей, в числе которых могут быть такие часто используемые, как ЛОКАЦИЯ-ИЗ (LOC-FROM) и ЛОКАЦИЯ-В (LOC-TO), обозначающие места – источник и назначение – движения, реализуемого действием предикатного символа.

4. ВРЕМЯ (TIME) – роль актанта, которая указывает время выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде обстоятельства времени в синтаксической конструкции предиката.

5. ПРИЧИНА (CAUSE) – роль актанта, которая указывает на причину выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде подчиненной синтаксической конструкции, которая вводит каузальные отношения в высказывание.

6. ЦЕЛЬ (PURPOSE) – роль актанта, которая указывает на цель выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке также выражается в виде подчиненной синтаксической конструкции, которая вводит каузальные отношения в высказывание. При этом сам предикат, описывающий действие, выступает в качестве причины для актанта-цели.

7. ИНСТРУМЕНТ (TOOL) – роль актанта, которая указывает на способ (инструмент) выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде непрямого дополнения в синтаксической конструкции предиката в инструментальном грамматическом падеже.

8. МАТЕРИАЛ (MATERIAL) – роль актанта, которая указывает на материал, из которого производится объект во время выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. На естественном языке

эта роль выражается при помощи непрямого дополнения в предложном падеже с использованием таких предлогов, как «из» (либо сходных грамматических конструкций в других языках).

9. ОБРАЗ ДЕЙСТВИЯ (HOW-TO) – роль актанта, которая указывает на способ (атрибут) выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается при помощи наречия, относящегося к сказуемому в предложении, описывающему факт.

Здесь под действием также подразумевается и состояние субъекта или смена такого состояния – это также может выражаться предикатными символами на естественном языке.

Поскольку предикат со своей моделью управления представляет собой описание факта о жизнедеятельности ИИ-агента, представленный классификатор ролей актантов в модели управления целостно и полно описывает возможные ситуации, в которых оказывается ИИ-агент в рамках различных фактов своей личной истории.

Для конкретного предиката шаблон модели управления может содержать подмножество выделенных актантов. Вместе с тем, практически любой предикат должен содержать в своей модели управления актанты с ролями СУБЪЕКТ и ОБЪЕКТ.

В качестве примера можно рассмотреть предикат «Создавать» (CREATE). Его шаблон будет иметь 7 актантов, перечисленных в представленном классификаторе ролей актантов. На рис. 3 показана схема шаблона предиката «Создавать».

Необходимо отметить, что при реализации шаблона предикатного символа не все вакантные роли актантов могут быть заполнены.

Гиперсвязь N между объектами АГ-памяти из множеств C , P или H представляет собой конкретную

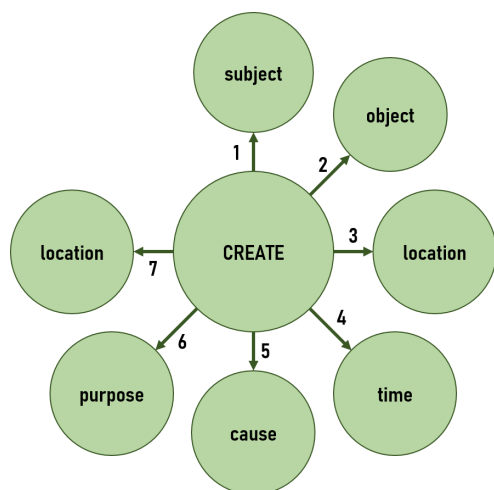


Рис. 3. Шаблон модели управления предикатного символа «Создавать»

реализацию модели управления предикатного символа. Каждая гиперсвязь в АГ-памяти представляет собой предикатный символ, описывающий какой-либо факт из личной истории ИИ-агента. Таким образом, гиперсвязь N представляет собой следующий объект:

$$N = \langle UID, w, t^*, \{s_i^* | e_i^*\}_{i=1}^Q \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор гиперсвязи; w – все активации гиперсвязи ($w \in [0,1]$); t^* – ссылка на шаблон управления предикатного символа; s_i^* – ссылка на абстрактный символ множества S , замещающий вакантную роль i в модели управления предикатного символа; e_i^* – ссылка на элемент множеств C , P или H , замещающая вакантную роль i в модели управления предикатного символа.

Наиболее интересным вариантом из представленных возможностей по замещению вакантного актанта модели управления предикатного символа является элемент типа e_i^* , поскольку этот тип элемента фактически позволяет в качестве актанта предиката выступать любому другому элементу множеств C , P или H , в т.ч. и гиперсвязям N . Это делает АГ-гиперсеть очень гибкой для описания фактов из личной истории ИИ-агента, т.к. в качестве любого актанта может выступать другой факт из личной истории, что делает АГ-гиперсеть именно гиперграфом с математической точки зрения. Эта структура, таким образом, позволяет очень гибко обрабатывать ЕЯ-факты, выявленные в текстах, описывающих личную историю ИИ-агента.

Наконец, множество ассоциативных связей L состоит из объектов следующего вида:

$$l = \langle UID, ID, w(e_1^*, e_2^*) \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор конкретной связи; ID – неуникальный идентификатор (тип) связи; w – вес активации связи ($w \in [0,1]$); e_1^* и e_2^* – ссылки на элементы множеств C , P или H . При этом связь l является направленной и идет от элемента e_1^* к элементу e_2^* .

Для конкретного проявления ИИ-агента необходимо создать исчерпывающее множество возможных идентификаторов связей, семантика которых может быть прописана на уровне программного кода конкретного ИИ-агента.

Осталось отметить, что вес активации $w[0,1]$, используемый в связях и гиперсвязях АГ-памяти, уровень возбужденности элемента x и функция активации элемента АГ-памяти f применяются в процедурах обработки знаний и вывода на фактах, записанных в АГ-памяти, что будет детально описано в последующих статьях.

На рис. 4 представлена сводная схема структуры АГ-памяти.

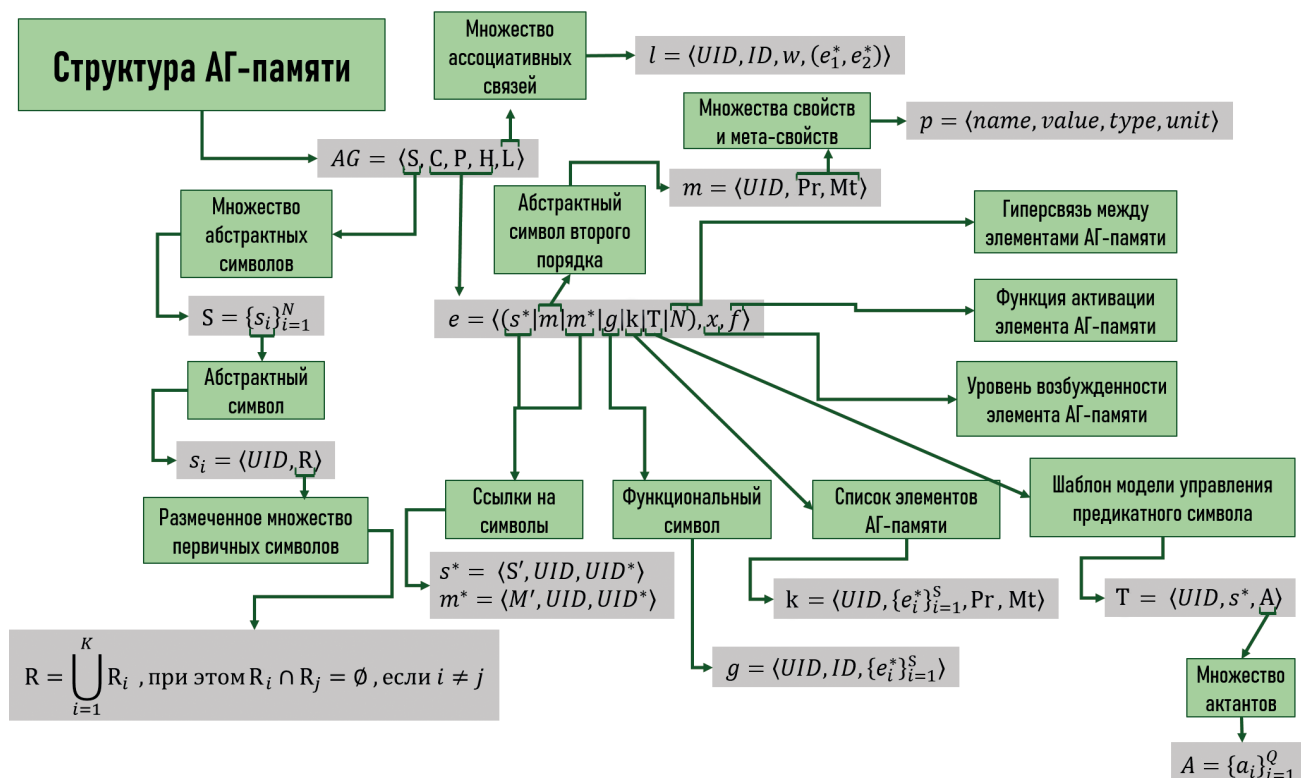


Рис. 4. Структура АГ-памяти

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При реализации конкретного ИИ-агента его проектировщик и разработчик должен выбирать те элементы АГ-памяти из описанных, которые требуются для успешного и эффективного функционирования конкретно этого ИИ-агента. В настоящей статье представлена максимально универсальная структура АГ-памяти, однако в каждом специфическом случае следует выбирать, какие именно ее компоненты следует использовать.

Вклад авторов

Р.В. Душкин – разработка АГ-памяти, представление теоретической базы для реализации в форме статьи.

В.А. Лелекова – анализ теоретических научных материалов, написание текста статьи.

В.Ю. Степанков – разработка АГ-памяти, консультации по техническим деталям АГ-памяти.

С. Фадеева – анализ теоретических научных материалов, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

R.V. Dushkin – development of AG-memory, presentation of theoretical basis for implementation in the form of an article.

V.A. Lelekova – analysis of theoretical scientific materials, writing the text of the article.

V.Y. Stepankov – development of AG-memory, consultations on technical details of AG-memory.

S. Fadeeva – analysis of theoretical scientific materials, editing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Душкин Р.В. *Искусственный интеллект*. М.: ДМК-Пресс; 2019. 280 с. ISBN 978-5-97060-787-9.
2. Душкин Р.В. Обзор подходов и методов искусственного интеллекта. *Радиоэлектронные технологии*. 2018;3:85–89.
3. Николенко С., Архангельская Е., Кадури А. *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. СПб: Питер; 2018. 480 с. ISBN 978-5-496-02536-2.
4. Sarker M.K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P. Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *AI Communications*. 2021. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05330>

REFERENCES

1. Dushkin R.V. *Iskusstvennyi intellekt (Artificial intelligence)*. Moscow: DMK-Press; 2019. 280 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-787-9
2. Dushkin R.V. Review of artificial intelligence approaches and methods. *Radioelektronnye tekhnologii*. 2018;3: 85–89 (in Russ.).
3. Nikolenko S., Arkhangel'skaya E., Kadurin A. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neuronnykh setei (Deep learning. Immersion in the world of neural networks)*. St. Petersburg: Piter; 2018. 480 p. (in Russ.). ISBN 978-5-496-02536-2

5. Raina V., Krishnamurthy S. Natural language processing. In: *Building an Effective Data Science Practice*. Apress, Berkeley, CA; 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7419-4_6
6. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words – From manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2002;12(3):307–324. URL: <https://www.zbc.uz.zgora.pl/Content/2928/1zade.pdf>
7. Душкин Р.В. Развитие методов адаптивного обучения при помощи использования интеллектуальных агентов. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019;1:87–96. <https://doi.org/10.14357/20718594190108>
8. Zhu L., Gao W. Hypergraph ontology sparse vector representation and its application to ontology learning. In: Tan Y., Shi Y., Zomaya A., Yan H., Cai J. (Eds.). *Data Mining and Big Data*. International Conference on Data Mining and Big Data (DMBD 2021). Part of the *Communications in Computer and Information Science*. Book series. Singapore: Springer; 2021. V. 1454. P. 16–27. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7502-7_2
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. *Алгоритмы. Построение и анализ*. М.: Вильямс; 2011. 1296 с. ISBN 0-07-013151-1
10. Horiguchi H., Winawer J., Dougherty R.F., Wandell B.A. Human trichromacy revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012;110(3):E260–E269. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214240110>
11. Harnad S. The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990;42(1–3):335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
12. Jentzsch R., Feustel D., Topf B. *Unique identifier, method for providing the unique identifier and use of the unique identifier*: US Pat. US8578162B2. Publ. 05.11.2013.
13. Kaminski B., Pralat P., Theberge F. Hypergraphs. In: *Mining Complex Networks*. NY: Chapman and Hall/CRC; 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003218869-7>
14. Попов Э.В. *Общение с ЭВМ на естественном языке*. М.: Наука; 1982. 360 с.
15. Malchukov A., De Swart P. Differential case marking and actancy variation. In: *The Oxford Handbook of Case*. Oxford: Oxford University Press; 2012.
4. Sarker M.K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P. Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *AI Communications*. 2021. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05330>
5. Raina V., Krishnamurthy S. Natural language processing. In: *Building an Effective Data Science Practice*. Apress, Berkeley, CA; 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7419-4_6
6. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words – From manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2002;12(3):307–324. Available from URL: <https://www.zbc.uz.zgora.pl/Content/2928/1zade.pdf>
7. Dushkin R.V. Development of adaptive learning methods using intelligent agents. *Iskustvennyi intellekt i prinyatie reshenii*. 2019;1:87–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718594190108>
8. Zhu L., Gao W. Hypergraph ontology sparse vector representation and its application to ontology learning. In: Tan Y., Shi Y., Zomaya A., Yan H., Cai J. (Eds.). *Data Mining and Big Data*. International Conference on Data Mining and Big Data (DMBD 2021). Part of the *Communications in Computer and Information Science*. Book series. Singapore: Springer; 2021. V. 1454. P. 16–27. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7502-7_2
9. Kormen T., Leizeron Ch., Rivest R., Shtain K. *Algoritmy. Postroenie i analiz*. Moscow: Vil'yams; 2011. 1296 p. (in Russ.). ISBN 0-07-013151-1 [Cormen T.H., Leiseron C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. London: The MIT Press; 2009. 1312 p.]
10. Horiguchi H., Winawer J., Dougherty R.F., Wandell B.A. Human trichromacy revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012;110(3):E260–E269. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214240110>
11. Harnad S. The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990;42(1–3):335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
12. Jentzsch R., Feustel D., Topf B. *Unique identifier, method for providing the unique identifier and use of the unique identifier*: US Pat. US8578162B2. Publ. 05.11.2013.
13. Kaminski B., Pralat P., Theberge F. Hypergraphs. In: *Mining Complex Networks*. NY: Chapman and Hall/CRC; 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003218869-7>
14. Popov E.V. *Obshchenie s EVM na estestvennom yazyke (Communication with a computer in natural language)*. Moscow: Nauka; 1982. 360 p. (in Russ.).
15. Malchukov A., De Swart P. Differential case marking and actancy variation. In: *The Oxford Handbook of Case*. Oxford: Oxford University Press; 2012.

Об авторах

Душкин Роман Викторович, эксперт в области искусственного интеллекта, директор по науке и технологиям, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: drv@aiagency.ru. Scopus Author ID 14070035900, SPIN-код РИНЦ 1371-0337, <https://orcid.org/0000-0003-4789-0736>

Лелекова Василиса Алексеевна, аналитик, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: lv@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6150-980X>

Степаньков Владимир Юрьевич, технический директор, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: svu@aiagency.ru. Scopus Author ID 57226776426, <https://orcid.org/0000-0003-0783-000X>

Фадеева Сандра, главный аналитик, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: sf@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9064-0017>

About the authors

Roman V. Dushkin, Expert in the Field of Artificial Intelligence, Science and Technology Director, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: drv@aiagency.ru. Scopus Author ID 14070035900, RSCI SPIN-code 1371-0337, <https://orcid.org/0000-0003-4789-0736>

Vasilisa A. Lelekova, Analyst, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: lv@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6150-980X>

Vladimir Y. Stepankov, Technical Director, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: svu@aiagency.ru. Scopus Author ID 57226776426, <https://orcid.org/0000-0003-0783-000X>

Sandra Fadeeva, Chief Analyst, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: sf@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9064-0017>