

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт системного анализа Российской академии наук

На правах рукописи



Панов Александр Игоревич

**Исследование методов, разработка моделей и
алгоритмов формирования элементов знаковой
картины мира субъекта деятельности**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

Геннадий Семенович Осипов

Москва – 2015

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Картина мира субъекта деятельности	9
1.1. Психологические предпосылки к созданию модели картины мира	9
1.2. Нейрофизиологические исследования	16
1.3. Прикладная семиотика	28
1.4. Выводы	32
Глава 2. Модель картины мира. Синтаксический уровень	34
2.1. Знак—базовый элемент картины мира	34
2.2. Процесс формирования нового знака	36
2.3. Процедуры самоорганизации	44
Глава 3. Модель картины мира. Семантический уровень	53
3.1. Образная компонента знака	53
3.2. Исследование алгоритма \mathfrak{A}_{th} работы образной компоненты	62
3.3. Алгоритм формирования пары «образ — значение» нового знака	79
Заключение	92
Список литературы	93
Список иллюстративного материала	101
Приложение А. Типы картин мира	103
Приложение Б. Модель функции целеполагания на синтаксическом уровне	106

Введение

Актуальность темы исследования. Исследования картин мира (КМ) субъектов деятельности принадлежат одному из центральных направлений в когнитивной психологии. Высшие психические функции, в том числе связанные с приобретением и использованием знаний, являются, в широком смысле, продуктом работы КМ субъекта. Исследованию большого числа процессов, протекающих в КМ, в том числе высших когнитивных, таких как категоризация и обобщение, целеполагание, планирование, принятие решения, творческие синтез и анализ, было посвящено значительное число работ на протяжении всей истории психологической науки. Следует отметить работы по восприятию Дж. А. Фодора (J. A. Fodor), Б. Юлеза (B. Julesz), Дж. Е. Каттинга (J. E. Cutting), С. Гроссберга (S. Grossberg), А. Р. Лурия, Б. М. Величковского, В. П. Зинченко и памяти С. Стернберга (S. Sternberg), Л. Джакоби (L. Jacoby), Р. Аткинсона (R. Atkinson), Р. Шиффрина (R. Shiffrin), Е. Тулвинга (E. Tulving).

В последнее время исследованию когнитивных функций человека уделяется большое внимание не только в самой психологии, но и в нейрофизиологии и в искусственном интеллекте. Нейрофизиологи основной своей задачей ставят поиск нейронного субстрата психических функций. При этом в качестве основного инструмента здесь выступает картирование участков коры головного мозга и отслеживание динамики активности различных участков при выполнении той или иной когнитивной задачи. Большое количество накопленного фактического материала используется для подтверждения целого ряда разрозненных моделей отдельных психических функций. Примерами могут служить работы по моделям внимания Я. Б. Казановича, С. Фринтропа (S. Frintrop), С. Коха (C. Koch), Л. Итти (L. Itti), Дж. К. Сосоца (J. K. Tsotsos), А. Торралба (A. Torralba), Л. Жэнга (L. Zhang), Р. А. Ренсинка (R. A. Rensink). Единого аппарата для построения таких моделей на данный момент не существует, хотя имеется ряд работ Б. Дж. Баарса (B. J. Baars), Р. Сана (R. Sun), Дж. Хокинса

(J. Hawkins), которые можно считать первыми попытками их создания.

Искусственный интеллект в начале своего становления как науки использовал для построения интеллектуальных алгоритмов данные психологов. Однако спустя некоторое время психологические соображения уже перестали рассматриваться как определяющие при разработке того или иного алгоритма. Центральное место стали занимать вопросы вычислительной эффективности и специализации в той или иной предметной области. В связи с тем, что в большинстве интеллектуальных систем в настоящее время требуется всё большая степень универсальности и автономности, начинается процесс возвращения к психологическим основам строения психики человека. Возникает задача построения моделей процессов, например, распознавания и планирования, на некоторой «биологически инспирированной основе». К этому направлению относятся работы Дж. Р. Андерсона (J. R. Anderson), П. Леирда (J. E. Laird), П. Ленгли (P. Langley). Подтверждением повышенного интереса к этой теме служат организуемые в последнее время конференции и издаваемые журналы, посвящённые исключительно «биологически правдоподобным» архитектурам (например, ежегодные конференции BICA (Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures)[1] и журнал BICA [2]).

Потребность в единой модели КМ субъекта деятельности для нейрофизиологов и исследователей в области искусственного интеллекта определяет актуальность данной работы. Такая модель требуется как для построения моделей когнитивных функций человека на нейронном уровне, подтверждаемых нейрофизиологическими данными о строении высшей нервной системы человека и данными об активности соответствующего определённой функции участка коры головного мозга, так и для построения абстрагированных от того или иного субстрата интеллектуальных алгоритмов, которые могли бы быть использованы в автономных системах свободной конфигурации.

Один из основных вопросов, возникающих при разработке модели КМ, заключается в описании базовых элементов картины мира и построении алго-

ритма их формирования в процессе деятельности субъекта, носителя КМ. В качестве психологической основы для построения модели элемента КМ были использованы, с одной стороны, культурно—исторический подход Л. Н. Выготского и теория деятельности А. Н. Леонтьева, с другой стороны — идеи прикладной семиотики, предложенные в работах Д. А. Пospelова, А. Мейстера, Г. С. Осипова. В качестве нейрофизиологических предпосылок были использованы концепции и нейронные схемы Д. Георга (D. George).

Цели и задачи диссертационной работы. Предмет исследования — построение знаковых моделей картины мира и некоторых когнитивных функций субъекта деятельности.

Целью исследования является разработка моделей и алгоритмов формирования элементов знаковой картины мира, обладающих структурой, необходимой для построения моделей высших когнитивных функций, в том числе восприятия, внимания, планирования и целеполагания.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. исследовать модель элемента картины мира субъекта, построенную на основе психологической теории деятельности,
2. построить модель структурных компонент элемента картины мира, опирающуюся на нейрофизиологические данные, и исследовать её,
3. исследовать структуру отношений и процессы самоорганизации на множестве элементов картины мира на синтаксическом уровне,
4. исследовать процесс формирования и связывания основных компонент нового элемента картины мира и построить соответствующий алгоритм,
5. исследовать сходимость процесса формирования и связывания основных компонент нового элемента картины мира.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту.

1. Впервые построена модель структурных компонент элемента картины мира субъекта деятельности.
2. Построены операторы распознавания в статическом, динамическом и иерархическом случаях в терминах алгебраической теории для образной компоненты элемента картины мира.
3. Доказаны теоремы корректности линейных замыканий множеств построенных в работе операторов распознавания.
4. Построен алгоритм формирования и связывания основных компонент нового элемента картины мира.
5. Проведено исследование процесса формирования и связывания основных компонент нового элемента картины мира.

Теоретическая и практическая значимость. Построение модели элементов картины мира субъекта деятельности, с одной стороны, позволит создать универсальные интеллектуальные алгоритмы планирования поведения, целеполагания, локализации, распознавания и категоризации, применение которых в интеллектуальных системах повысит степень их автономности, а с другой стороны, позволит объяснить некоторые патологические явления в мозге человека и дать рекомендации к их устранению.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена строгими математическими доказательствами утверждений и результатами вычислительных экспериментов.

Основные результаты работы докладывались на: Международных конференциях по когнитивной науке (Томск, 2010 г.; Калининград, 2012 г., 2014 г.), II Всероссийской научной конференции молодых учёных с международным участием «Теория и практика системного анализа» (Рыбинск, 2012 г.), IV Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии»

(Абзаково, 2011 г.), V съезде Общероссийской общественной организации «Российское психологическое общество» (Москва, 2012 г.), X Международной конференции «Интеллектуализация обработки информации» (Крит, 2014 г.), I конференции Международной ассоциации когнитивной семиотики (Лунд, 2014 г.), Общественном научном семинаре «Проблемы искусственного интеллекта», на семинарах ИСА РАН и ВЦ РАН.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных работах [3–16], 4 из которых изданы в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ [6–8, 12], 8 — в материалах всероссийских и международных конференций [3–5, 9, 11, 13, 14, 16].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 112 страниц с 21 рисунком. Список литературы содержит 81 наименование.

В **первой главе** приводится описание предметной области и анализ существующих предпосылок к построению моделей КМ. В качестве психологических предпосылок рассматриваются культурно-историческое направление в психологии (Л. Н. Выготский и А. Р. Лурия), теория деятельности (А. Н. Леонтьев) и модель психики Е. Ю. Артемьевой. Среди нейрофизиологических моделей наибольшее внимание уделено исследованиям Б. Дж. Баарса, Дж. Хокинса и Д. Георга.

Во **второй главе** рассматривается синтаксический уровень разрабатываемой модели КМ. Приводится формальное определение знака как элемента картины мира и схема процесса формирования нового знака. Приводится классификация типов отношений, возникающих на множестве знаков, и описываются процессы самоорганизации на сети элементов КМ.

В **третьей главе** рассматривается семантический уровень разрабатываемой модели КМ. Вводится понятие распознающего автомата, являющегося базовым математическим объектом, с помощью которого определяются все компоненты знака. Подробно рассматривается модель процесса восприятия и иссле-

дуются множества операторов распознавания, которые строятся при анализе работы образной компоненты знака. Приводится алгоритм процесса формирования и связывания образа и значения знака, проводится анализ сходимости этого процесса.

В **приложения** включены описания типов картин мира, свойства которых объясняются с помощью разрабатываемой модели (приложение [А](#)) и пример описания одной из когнитивных функций (целеполагания) на синтаксическом уровне (приложение [Б](#)).

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в работе.

Глава 1

Картина мира субъекта деятельности

1.1. Психологические предпосылки к созданию модели картины мира

1.1.1. Культурно—исторический подход Выготского

Одна из первых успешных попыток формулировки общих принципов работы высших психических функций человека была предпринята отечественным психологом Л. С. Выготским в 20–30 гг. XX в. [17] и далее развивалась последователями его школы А. Н. Леонтьевым, А. Р. Лурия, П. Я. Гальпериным, П. И. Зинченко [18–20].

Культурно—исторический подход Выготского предлагает рассматривать в качестве основного фактора, который определяет формирование психических функций человека, социальную среду. Развитие мышления, формирование высших психических функций происходит не само по себе, а только путём использования человеком так называемых «психологических орудий». Одним из основных таких орудий является любая система знаков, например, язык, письмо, системы счёта.

Такие психические функции как память, восприятие, мышление в своём развитии проходят через этап внешней деятельности, когда культурные средства, «психологические орудия» имеют предметный вид и соотносятся с какой-то определённой последовательностью действий. И только затем такая последовательность действий сворачивается, *интериоризуется*, переходит из внешнего плана во внутренний.

Такая автоматизация отрабатываемых действий наблюдается в поведении человека повсеместно. Можно считать, что первым установленным свойством картины мира было свойство интериоризации некоторой последовательности

действий. Трансформация её с более высокого, энергозатратного, требующего больше времени на реализацию уровня на более низкий, быстрый и автоматизированный.

По Выготскому одной из функций картины мира в дополнение к интериоризации является также и процесс *экстериоризации* некоторой автоматизированной последовательности действий в случае возникновения каких-либо препятствий для её обычного, быстрого выполнения. Интериоризация не является, таким образом, необратимой — структуры и процедуры её реализующие при необходимости могут быть выполнены в обратном порядке.

На этапе интериоризации человек развивается в культурном, психическом плане только постоянно участвуя в деятельности с другими членами коллектива. При этом все те действия, которые пока за него выполняют другие члены коллектива составляют так называемую «зону ближайшего развития». Именно действия из этой зоны будут интериоризованы в первую очередь.

Любое развитие, в том числе и картины мира, по Выготскому это не постепенный ровный процесс, а стадийный, когда периоды достаточно медленного накопления знаний и новых возможностей, сменяются короткими этапами кризиса. За время течения кризиса происходят качественные изменения структуры некоторых частей картины мира и протекающих в них процессов, влекущие за собой перестройку других частей и процессов и т. д. Запускается лавинный процесс, который достаточно быстро заканчивается и сменяется новым периодом медленного накопления. Ступенчатый характер процессов обновления картины мира можно считать вторым установленным её свойством.

Выготский был одним из первых психологов, который указал на роль знака и коллектива в функционировании картины мира субъекта. Выготский первым дал психологическую интерпретацию знака и чётко обозначил ту роль, которую знаки играют в развитии субъекта. Однако работа интериоризованных процессов и их связь с внешними знаками осталась за скобками.

1.1.2. Теория деятельности Леонтьева

Развитием и применением идей культурно—исторического подхода занимались многие последователи Выготского, среди которых огромную роль в формировании целостной психологической модели картины мира субъекта сыграл А. Н. Леонтьев [21].

Леонтьев считается автором теории деятельности в психологии, основы которой были заложены в конце 20 гг. XX в. Любая деятельность с точки зрения Леонтьева является предметной, а любой предмет отражается, или *опосредуется*, субъектом с помощью некоторого психического образования, которое, следуя Выготскому, стали называть *знаком*. Носителем таких отражений, для которых дополнительно выполняется условие отделения от внутренних характеристик, в теории деятельности считается *сознание*.

По Леонтьеву деятельность субъекта глубоко иерархична. На самом высшем уровне находятся различные виды деятельности, отличающиеся друг от друга той потребностью, которая направляет ту или иную деятельность. На следующем уровне иерархии располагаются сознательные, не автоматизированные действия, каждое из которых задаётся некоторой целью, представлением о результате своего выполнения. Действие может иметь различный операционный состав в зависимости от условий реализации, что составляет третий уровень иерархии. Наконец, на самом нижнем уровне лежат психофизиологические механизмы, которые реализуют ограничения, накладываемые на форму операций свойствами организма субъекта деятельности.

Такая четырёхуровневая схема деятельности по Леонтьеву выделяет среди психических отражений предметов реального мира четыре вида единиц: потребности, мотивы, цели и условия. Каждая потребность рано или поздно опредмечивается, формируя мотив, который и является направляющей силой любой деятельности. Мотив при этом может не осознаваться. Мотив формирует зону целей, для достижения которых в рамках текущей деятельности выбираются

соответствующие действия. Наконец, форму реализации действий определяют те или иные предметные условия, задающие операции (Рисунок 1.1).

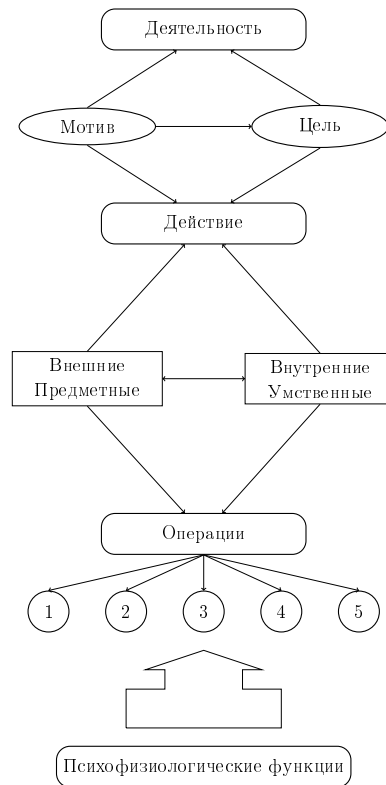


Рис. 1.1. Структура деятельности по Леонтьеву.

Для более подробного описания структуры деятельности Леонтьеву пришлось уточнить понятие знакового опосредования предметов, введённое Выготским. Были определены компоненты знака, отражающего некоторый реальный объект действительности. Первый компонент или образующая сознания — это чувственная ткань или образ, который является непосредственным, закодированным представлением предмета действительности в КМ. Второй компонент — это значение, которое Леонтьев определяет как преобразованную, свёрнутую в структуре языка идеальную форму существования предметного мира, его свойств, связей и отношений, раскрываемых совокупной общественной практикой. Система значений определяет общественно познанную реальность, поэтому изменение структуры значений происходит только как объективно— историческое движение. Третий компонент знака, личностный смысл, или «значение—для—меня», связывает имеющийся опыт субъекта, его потребности и свойства

предметов действительности. Личностные смыслы всегда переживаются и задают эмоциональную окраску КМ субъекта.

Леонтьев стал основоположником общепринятой в настоящее время психологической модели картины мира. Он определил её основные образующие элементы и выделил различные уровни как процессов протекающих в самой картине мира, так и внешних действий, являющихся продуктами функционирования этой картины мира.

1.1.3. Модель психики Артемьевой

Понятие картины мира в современном представлении было дано в модели Е. Ю. Артемьевой [22]. Согласно её изложению в этой психической структуре следы взаимодействия с объектами фиксируются в системе опыта субъекта на семантическом уровне: «мы смогли увидеть, как пристрастно отношение субъекта к входящему с ним в контакт предметному миру, как активно он (субъект) структурирует этот мир, создавая для себя его проекцию. Вещи всегда наделяются свойствами, характеризующими их взаимоотношения с субъектом. В частности, геометрические формы оказываются наделенными жестко сцепленными комплексами свойств, ведущими из которых являются эмоционально-оценочные свойства. У субъекта складывается картина мира, картина свойств вещей в их отношениях к нему и друг к другу».

Артемьева изучала вопрос соотношения субъективного опыта и представления о мире или, в её терминологии, *образа мира*, который несёт всю предысторию психической жизни субъекта. Чтобы объяснить процесс формирования представления о мире, Артемьева предположила существование некоторой структуры, являющейся регулятором и строительным материалом образа мира. Такая структура была разделена ею на три слоя. Первый слой, перцептивный мир, характеризуется существованием модальностей, соответствующих различным каналам восприятия внешнего мира. Второй слой, картина мира в узком смысле слова, представляет собой агрегацию различных семантик или систем

амодальных значений. Третий слой, образ мира в узком смысле, содержит амодальные аффективные гипотезы, направляющие мыслительный процесс субъекта.

Глубокое исследование картины мира субъекта Артемьевой несмотря на разделение модели на три слоя и выделение более узкого определения картины мира, свидетельствует о продолжающемся углублении исследований различных компонент знака по Леонтьеву: образа (перцептивный мир), значения (семантический слой) и личностного смысла (аффективный слой), не меняя принципиально структуру модели.

1.1.4. Зарубежные исследования КМ

Одним из направлений зарубежных исследований в области построения психологических моделей картины мира является направление «world view». Основные вопросы, на которые нацелены указанные исследования можно сформулировать следующим образом:

- Что такое мир, как он устроен и как он функционирует?
- Почему человек чувствует то, что чувствует и как возникает у него определённое отношение к реальности?
- Как человек действует в мире и как выбирает одну цель из множества возможных?
- Как формируется субъективный образ мира?

Группа исследователей [23] в 1994 г. опубликовала программу проекта междисциплинарных работ, целью которого является создание модели «world view», интегрирующей биологические, когнитивные, психологические, языковые, социологические, философские аспекты отношения к реальности. В качестве компонентов структуры «world view» выступают: онтология (модель существующе-

го), объяснение (модель прошлого), предсказание (модель будущего), аксиология (теория ценностей), праксиология (теория деятельности) [23]. В [24] в «world view» были выделены объективная («концепция мира»), субъективная («жизненный мир») и интерсубъективная («взгляды») составляющие.

В психологическом плане «world view» может быть сопоставлен с концепциями «философии жизни» К. Юнга, «мировоззрения» А. Маслоу, «гипотезы мира» С. Пеппера (S. C. Pepper), «возможных миров» Дж. Франка (J. D. Frank), «взгляда на реальность» С. Мессера (S. B. Messer), «системы конструкторов Я-и-Мир» Дж. Коттлера (J. A. Kottler) и Р. Хецлера (R. J. Hazler), «ценностных ориентаций», «неосознаваемых систем смыслов», «неосознаваемых оснований выбора», «ядерной культуры» Ф. Клюхона (F. R. Kluckhohn) [25].

1.1.5. Выводы параграфа 1.1

На протяжении достаточно длительного периода психологических исследований картины мира субъекта деятельности были сформулированы следующие основные принципы её строения и функционирования:

- существование двух уровней протекания психических процессов (внешний и внутренний план) и двух обратных процессов перехода процесса с одного уровня на другой: интериоризация (автоматизация) и экстериоризация («разворачивание» в случае ошибок или затруднений);
- ступенчатый характер преобразования картины мира: медленные процессы накопления опыта сменяются быстрыми процессами реструктуризации;
- иерархичность процессов протекающих как внутри картины мира, так снаружи благодаря проявляющимся результатам её функционирования (схема деятельности субъекта);
- элементарной единицей картины мира является знак, опосредующий неко-

торое явление в окружающем мире, и состоящий из трёх компонент: образа, значения и личностного смысла.

1.2. Нейрофизиологические исследования

В последнее время исследования в области поиска нейрофизиологических коррелятов когнитивных функций вошли в список приоритетных направлений практически во всех развитых странах. В 2013 г. в США была анонсирована программа BRAIN INITIATIVE, а в 2014 г. под эгидой Департамента здравоохранения был запущен один из проектов данной программы под названием BRAIN [26]. В 2013 г. в ЕС стартовал один из двух мегапроектов The Human Brain project (HBP, Проект моделирования мозга человека), объединяющий более 100 институтов из 24 стран [27]. Оба эти проекта, как и многие менее крупные со схожей тематикой, имеют своей основной целью составление подробной карты участков головного мозга с указанием той когнитивной психической функции, за которую преимущественно отвечает та или иная область. Построение такой карты возможно только при наличии модели, которая бы на основе нейрофизиологических данных о строении головного мозга (как коры, так и подкорковых древних структур), предсказывала бы, какой вклад вносит определённая область в формирование интересующей функции. Подобные проекты базируются на огромном фактическом материале, накопленном за десятилетия проведения исследований строения мозга млекопитающих, и призваны заполнить пробел между сведениями о работе нейронов и их ансамблей и психологическими описаниями высших когнитивных функций.

Поиск когнитивных коррелятов и описание общих нейрофизиологических оснований высших психических функций находится пока только в самом начале. Большинство тех работ в этой области, где проводится не только анализ фактического материала, но и приводится нейронная модель работы исследуемого процесса, ограничиваются попытками осветить только некоторые аспек-

ты исследуемой функции. Примером могут служить многочисленные работы по моделям внимания, которые успешно объясняют и предсказывают только такие эффекты, как слепота к изменениям, ограниченность ресурса внимания, временные характеристики и т. п. [28].

1.2.1. Состояние исследований на данный момент

Попытки сформулировать базовые принципы, на основе которых необходимо проводить построение нейрофизиологических моделей предпринимались в ряде работ как в России (работы А. М. Иваницкого [29, 30]), так и за рубежом (Д. М. Эделмен (G. M. Edelman) [31]) с 70 гг. XX в. Так гипотеза повторного входа (или информационного синтеза) предполагает наличие некоторого замкнутого контура, состоящего из определённых участков и структур головного мозга (зрительная кора, ассоциативная кора, гиппокамп, гипоталамус, лобная кора). Прохождение сигнала по такому контуру активирует взаимосвязанные нейронные ансамбли, которые хранят информацию о значимости сигнала. Поступающие от них нервные импульсы возвращаются обратно в проекционную кору и накладываются на ещё сохраняющийся там след стимульного возбуждения. Только при успешном замыкании такого контура возникает ощущение и поступивший сигнал интерпретируется в контексте КМ субъекта (Рисунок 1.2).

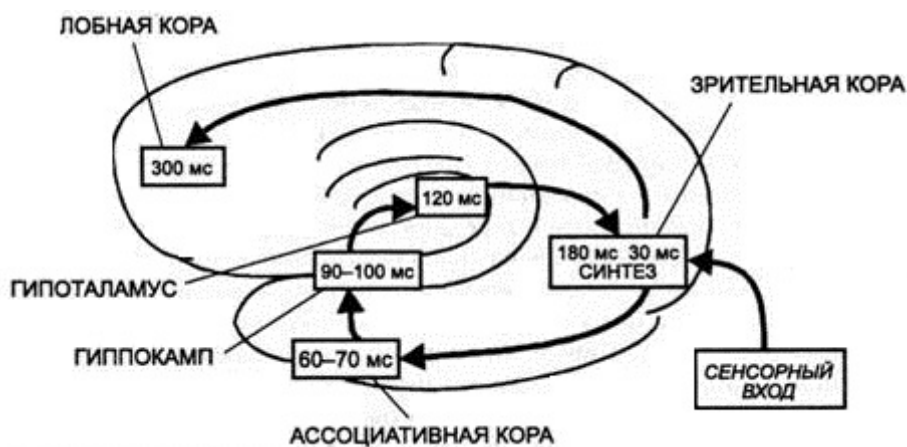


Рис. 1.2. Круг ощущений по А. М. Иваницкому (источник [29]).

Другой взгляд на базовые принципы организации моделей высших психи-

ческих функций и картины мира субъекта содержится в так называемой теории рабочего пространства Б. Дж. Баарса (B. J. Baars) [32]. В её нейронной реализации [33] утверждается, что существует некоторое множество нейронов рабочего пространства, которые связаны с большим количеством автономных участков коры головного мозга. Эти участки коры, реализующие простые когнитивные функции, конкурируют за активацию нейронов рабочего пространства. Активация некоторого подмножества этих нейронов приводит к подавлению активации других таких нейронов и распространению самоподдерживающейся активности практически на всю кору. Таким образом, информация от захватившего глобальный ресурс когнитивного процесса становится доступной другим автономным процессам. Такая модель хорошо объясняет эффекты последовательности и избирательности высших психических функций, однако ничего не проясняет в механизмах их реализации. Подробнее см. подпараграф 1.2.3.

Идея нейронов рабочего пространства схожа с описанием нейронов сознания известным отечественным нейрофизиологом Е. Н. Соколовым [34]. Соколов вводит понятие гештальт—пирамид, состоящих из нейронов-детекторов отдельных признаков. Вершиной такой пирамиды служит нейрон, гештальт—детектор, представляющий некоторый сложный объект в картине мира субъекта.

Среди последних работ на тему базовых принципов можно выделить исследование Дж. Хокинса (J. Hawkins) [35], где высказывается идея о том, что работа коры головного мозга базируется на множестве шестислойных колонок нейронов, организованных в иерархию и выполняющих достаточно простой набор элементарных функций. К таким функциям относятся фильтрация за счёт подавления слабого сигнала и предсказание формы следующей порции сигнала, поступающего с нижних слоев иерархии. В описании модели используется множество марковских цепей, элементы которых представляют низкоуровневые признаки. Каждая марковская цепь служит для вычисления вероятности наличия высокоуровневого признака на текущий момент. Подтверждение наличия признака проводится за счёт вероятностного вывода (распространения

свидетельств), аналогичного выводу в байесовских сетях доверия. Построенная Хокинсом модель иерархической временной памяти (НТМ, Hierarchical temporal memory) хорошо решала задачи по моделированию восприятия, была применена в некоторых работах по распознаванию [36] и легла в основу нескольких коммерческих проектов (Grok, Sighthound и др. [37]). Несмотря на свою высокую перспективность, попыток дальнейшего развития модели для построения описания более сложных функций на данный момент предпринято не было.

Идея иерархической организации большого количества одинаковых достаточно простых базовых элементов используется практически во всех попытках построить нейрофизиологические модели когнитивных функций. Из отечественных работ здесь можно отметить исследования В. Я. Сергина [38–40], в которых вводится концепция объемлющих характеристик. Концептуальная модель Сергина предполагает наличие обратных связей в небольшом участке коры головного мозга, замкнутых на ту же область. Их наличие обеспечивает механизм процесса автоотождествления, который постулируется как основа всех когнитивных функций. Временные характеристики образующихся циклов на разных уровнях иерархии хорошо согласуются с экспериментом и могут объяснить некоторые психические феномены, однако математической модели в работах автора представлено не было.

Иерархия нейроподобных элементов встречается и в некоторых других отечественных работах. Так в [41, 42] делается попытка построить иерархию элементов, которые бы могли кодировать поступающие сигналы в некоторые семантические структуры с использованием обратных связей и «внутренних экранов». В этих работах используются те же идеи повторного входа, однако, реальных экспериментов, моделирующих хотя бы простейшие когнитивные функции, представлено пока не было.

1.2.2. Теория глобального рабочего пространства

Одной из основных теорий, которая предлагает объяснение некоторым особенностям работы высших когнитивных функций и которая на данный момент является самой распространённой в европейских работах, является теория Баарса [32, 43].

Центральной идеей в теории глобального рабочего пространства (ГРП, Global workspace) Баарса является тот факт, что содержание высших психических функций доступно всем более низкоуровневым психическим процессам, таким как внимание, мышление, память и речь (Рисунок 1.3, а). В связи с тем, что доступ к этому содержанию ограничен единственным потоком, теория ГРП естественным образом объясняет последовательную природу сознательного опыта.

Теория ГРП была изначально представлена в версии классной доски, когда отдельные, квази—независимые процессы сообщаются с центральным общедоступным ресурсом. Такая архитектура была впервые реализована в вычислительной модели взаимодействующих программных агентов С. Франклина (S. Franklin) и А. Грессера (A. Graesser) [44].

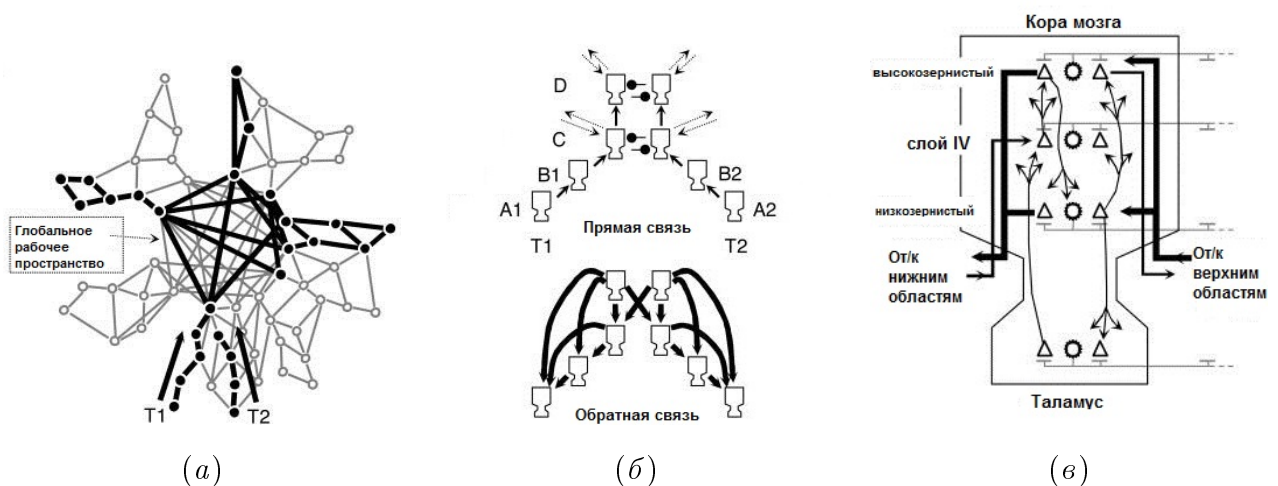


Рис. 1.3. Реализация теорий глобального рабочего пространства в работе Дехане ([33]).

С. Дехане (S. Dehaene) с коллегами [33] предложили нейронную реализацию архитектуры глобального рабочего пространства, так называемое нейрон-

ное глобальное рабочее пространство (НГРП). Дехане, ссылаясь на нейрофизиологические данные о существовании стадии процесса восприятия с низкой пропускной способностью [45], постулирует общедоступность сигнала, поступающего с задних областей зрительной коры в НГРП и активирующего нейроны с длинными аксонами, распространяющими активность практически на всю кору. Возбуждённые нейроны подавляют активность остальных нейронов рабочего пространства, которые перестают обрабатывать поступающие сигналы.

В своей модели Дехане с коллегами использовали простейшие спайковые нейроны, выдающие спонтанную активность при превышении уровня деполяризации мембраны некоторого порога. Эти нейроны организованы в простые трёхслойные колонки соединённые с сетью таламуса, через которую поступает входной сигнал (Рисунок 1.3). Колонки в свою очередь связаны в иерархию, в которой присутствуют как близко действующие восходящие каналы распространения сенсорной информации, так и дальнедействующие нисходящие модулирующие связи, что согласуется с анатомическими и нейрофизиологическими данными [46, 47]. Первый тип связей реализуется с помощью AMPA—рецепторов, а второй — с помощью NMDA—рецепторов. Наиболее вероятен случай, когда глобальная активность обуславливается «резонансом» [48] между восходящей сенсорной информацией и нисходящим сигналом.

Для моделирования эффектов внимания (мигание внимания), была реализована простая четырёхуровневая иерархия, в которой конкурировали два типа сигналов T_1 и T_2 (Рисунок 1.3, 6), обрабатываемые невзаимодействующими параллельными перцептивными областями A_i и B_i . По достижении сигналами T_1 и T_2 ассоциативных областей C и D начинается конкуренция между ними за активизацию соответствующих колонок рабочего пространства.

Модель порогового спайкового нейрона (зависимость напряжения на мембране нейрона V от ёмкости мембраны C_m и силы тока по времени) задавалась следующей формулой:

$$C_m dV/dt = -g_{Leak}(V - V_{rest}) - I_{NaP} - I_{KS} - I_{GABA} - I_{AMPA} - I_{NMDA} - I_{SRA} - I_{input} - I_{neuromodul}, \quad (1.1)$$

где g_{Leak} означает ёмкость утечки, а I_x — соответствующие веществам и типам нейромедиаторов x токи, I_{SRA} — ток адаптации в спайковой модели, I_{input} — ток в момент подачи сигнала, $I_{neuromodul}$ — суммарные нейромодулирующие токи. Каждая таламо—кортикальная колонка была представлена 80 активными нейронами и 40 тормозными, схема связей между которыми представлена на Рисунок 1.3, в.

Такая нейронная структура позволила Дехане с коллегами довольно успешно смоделировать известный психологический эффект мигания внимания [49], который заключается во временном прерывании процесса восприятия сигналов с сохранением их обработки на нижних уровнях. Идея временного подавления активности небольшого количества нейронов глобального пространства достаточно просто объясняет этот эффект. Подбор временных характеристик порогового уравнения поляризации мембраны нейрона позволяет достаточно точно повторить временные характеристики этого явления. Однако смещение акцентов на модель нейрона, а не на общие характеристики коры головного мозга является и основным препятствием для построения моделей более сложных эффектов и процессов в рамках этого подхода.

1.2.3. Иерархическая временная память

Смещение акцентов на рассмотрение общих свойств строения коры головного мозга было предпринято в работах Дж. Хокинса и Д. Георга [35, 50]. Хокинс постулирует, что основным инструментом построения картины мира субъекта является кора головного мозга, которая имеет одинаковое колоночное строение во всех своих областях и использует пространственно—временную иерархию для хранения построенной модели действительности, так называемую

временную иерархическую память (ИВП).

Хокинс предлагает моделировать работу неокортекса с помощью узлов, организованных в дерево и использующих один и тот же алгоритм обучения и вывода, за счёт которого происходит сохранение пространственных шаблонов и их последовательностей. Прямой выход каждого узла состоит из представления тех или иных активных в данный момент последовательностей. Пространственные шаблоны фиксируют совпадение во времени последовательностей дочерних узлов. Иерархия узлов организована таким образом, что узлы более высокого уровня хранят шаблоны, представляющие большие масштабы пространства и большие промежутки времени, чем узлы более низкого уровня.

Математическое описание ИВП дано Георгом в виде порождающей модели (Рисунок 1.4). Каждый узел N^i (i — индекс узла) иерархии содержит множество синхронных шаблонов $c_1^i, c_2^i, \dots, c_{|C|}^i$ и множество марковских цепей $g_1^i, g_2^i, \dots, g_{|G|}^i$, где $|C|$ — общее количество шаблонов в узле, $|G|$ — общее количество марковских цепей в узле. Каждая марковская цепь g_k^i определена на подмножестве множества синхронных шаблонов этого узла. Например, марковская цепь $g_1^{1,1}$ узла $N^{1,1}$ состоит из 4 синхронных шаблонов: $c_1^{1,1}$, $c_3^{1,1}$, $c_4^{1,1}$ и $c_7^{1,1}$. Синхронный шаблон c_j^i узла представляет одновременно активированные марковские цепи дочерних узлов. Например, шаблон $c_1^{2,1}$ узла $N^{2,1}$ на Рисунок 1.4 определяется двумя марковскими цепями $g_1^{1,1}$ и $g_2^{1,2}$ дочерних узлов $N^{1,1}$ и $N^{1,2}$ соответственно. Синхронный шаблон, который задаётся путём отбора марковской цепи в высокоуровневом узле, активирует свои составляющие марковские цепи низкоуровневых дочерних узлов. Для конкретных синхронного шаблона и марковской цепи, которая активна в высокоуровневом узле, задаются конкурирующие последовательности синхронных шаблонов путём отбора активированных марковских цепей дочерних узлов.

Процесс обучения ИВП на пространственно—временных данных представляет собой процесс построения синхронных шаблонов и марковских цепей в каждом узле на каждом уровне иерархии. Базовый алгоритм обучения состоит

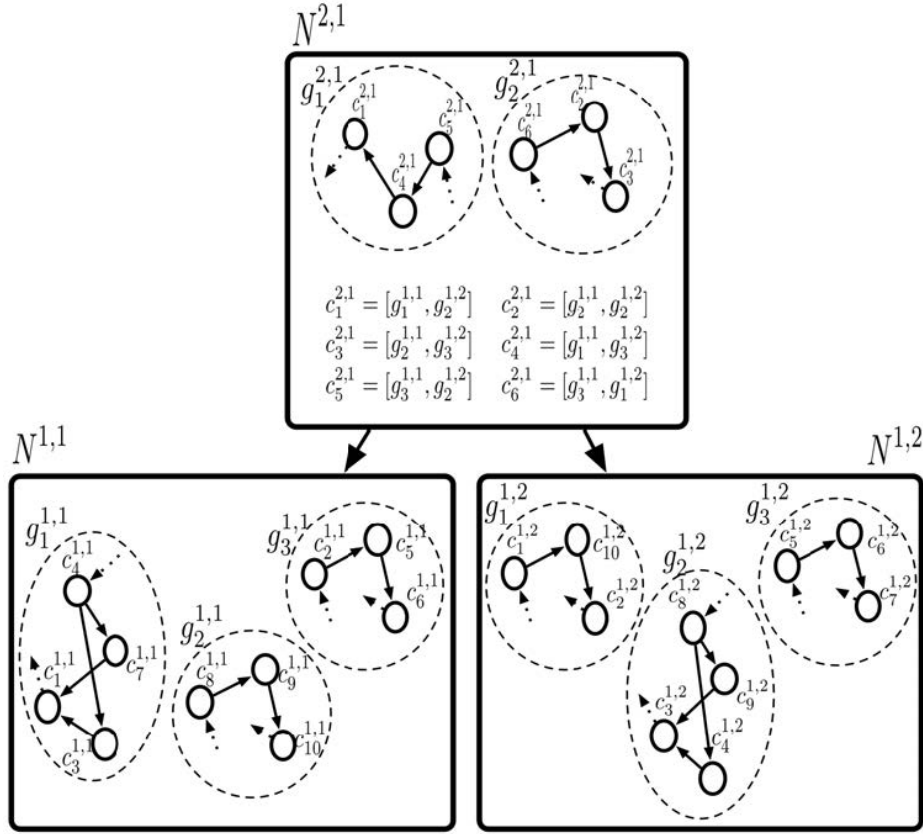


Рис. 1.4. Порождающая модель ИВП. Приведена простая двухуровневая порождающая модель ИВП, состоящая из трёх узлов ([35]).

из двух операций:

- сохранение некоторого фиксированного количества случайно выбранных генерируемых синхронных шаблонов,
- построение набора марковских цепей на множестве синхронных шаблонов путём обучения достаточно большой матрицы переходов.

В дальнейшем примере будет рассматриваться только тот случай, когда в один и тот же момент времени активен только один шаблон, хотя в работе авторов были реализованы и тот случай, когда активировалось определённое разреженное количество шаблонов.

Механизм вывода в сети ИВП основывается на распространении нового факта из одного узла сети вверх на все остальные. Распространение нового факта приводит к обновлению состояний узлов. Информация также распространяется и вниз по иерархии, обеспечивая механизмы внимания, сегментации

и заполнения пропущенных фрагментов. В качестве алгоритма, реализующего вывод, Хокинсом был выбран алгоритм байесовского распространения степени уверенности.

В общем случае, сигнал, пришедший в узел ИВП с нижнего уровня, представляет функцию доверия на множестве дочерних марковских цепей. Данный узел преобразует этот сигнал в собственную функцию доверия на множестве своих синхронных шаблонов. Основываясь на истории полученных ранее сигналов, он вычисляет уровень доверия для каждой своей марковской цепи. Формируемый таким образом сигнал передаётся далее вверх по иерархии. В обратном направлении узел получает от родительских узлов функцию доверия на множестве своих марковских цепей. Далее марковские цепи шаг за шагом «разворачиваются» с целью вычисления нисходящего распределения вероятности на множестве синхронных шаблонов. Исходя из этого вычисляется функция уровня доверия узла на множестве дочерних марковских цепей. Формируемый таким образом сигнал передаётся дочерним узлам.

В качестве примера в работе авторов приводится узел, содержащий 5 синхронных шаблонов и 2 марковские цепи (Рисунок 1.5, а). Вероятностная матрица переходов марковской цепи g_r обозначается как $P(c_i(t)|c_j(t-1), g_r)$. Как было сказано ранее, каждый узел получает на вход сигнал от дочерних узлов ($\lambda^{child\ index}$) и отправляет сигналы родительским узлам (λ). В обратном направлении, узел получает сигналы от родительских узлов (π) и отправляет обратные сигналы дочерним узлам ($\pi^{child\ index}$) (Рисунок 1.5, б). Поступивший в момент времени t с нижнего уровня факт обозначается ^-e_t , а с верхних уровней — ^+e_t .

Итоговая восходящая вероятность синхронного шаблона c_i в момент времени t вычисляется как произведение тех частей сообщения, которые соответствуют этому шаблону:

$$y_t(i) = P(^-e_t|c_i(t)) \propto \prod_{j=1}^M \lambda_t^{m_j}(r_i^{m_j}), \quad (1.2)$$

где $r_i^{m_j}$ обозначает номер марковской цепи j -го дочернего узла. Восходящая

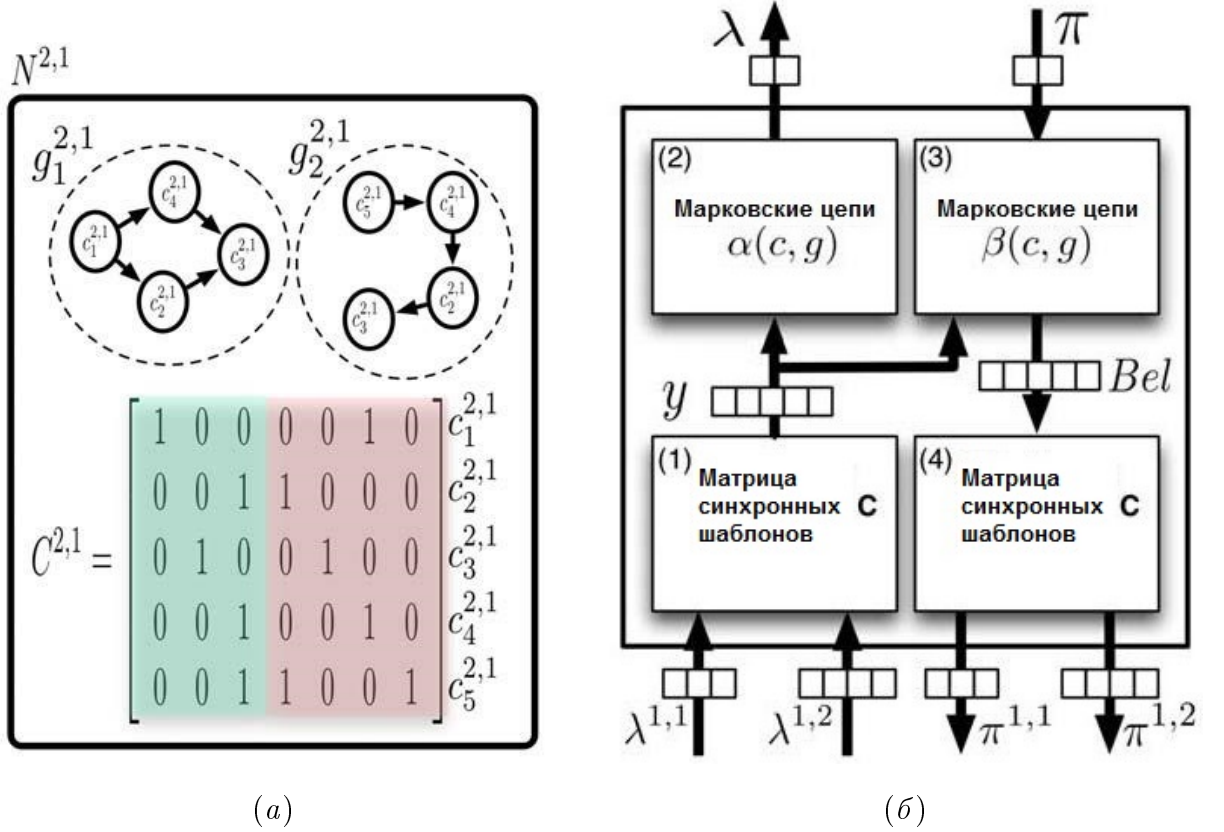


Рис. 1.5. Структура узла ИВП, входные и выходные данные узла ([35]).

вероятность марковской цепи g_r в момент времени t вычисляется через специальную переменную состояния α :

$$\lambda_t(g_r) = P(^{-}e_0^t | g_r(t)) = \sum_{c_t(t) \in C^k} \alpha_t(c_i, g_r),$$

$$\alpha_t(c_i, g_r) = P(^{-}e_t | c_i(t)) \sum_{c_i(t-1) \in C^k} P(c_i(t) | c_j(t-1), g_r) \alpha_{t-1}(c_j, g_r), \quad (1.3)$$

$$\alpha_0(c_i, g_r) = P(^{-}e_0 | c_i(t=0)) P(c_i(t=0) | g_r),$$

где символом $^{-}e_0^t$ обозначена последовательность входных сигналов с момента времени 0 по момент времени t . Последовательность вычисления α представляет из себя процесс обновления переменной динамического программирования.

Степень уверенности для синхронного шаблона c_i вычисляется с помощью сообщений от родительских узлов и с использованием переменной состояния β :

$$\begin{aligned}
Bel_t(c_i) &\propto \sum_{g_r \in G^k} \beta_t(c_i, g_r), \\
\beta_t(c_i, g_r) &= P(^-e_t | c_i(t)) \sum_{c_j(t-1) \in C^k} P(c_i(t) | c_j(t-1), g_r) \beta_{t-1}(c_j, g_r), \\
\beta_0(c_i, g_r) &= P(^-e_0 | c_i(t=0)) P(c_i | g_r) \pi_0(g_r).
\end{aligned} \tag{1.4}$$

В свою очередь, посылаемый дочерним узлам сигнал вычисляется как

$$\pi^{m_j}(g_r) \propto \sum_i I(c_i) Bel(c_i), \tag{1.5}$$

где

$$I(c_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } g_r^{m_i} \text{ — часть шаблона } c_i, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \tag{1.6}$$

В модели Георга собраны практически все существенные для построения картины мира принципы, однако математическое описание с использованием марковских цепей оказывается слишком громоздким, чтобы можно было изучать какие-либо математические свойства узлов и их иерархий. Идея с матричным представлением, которая и используется в программной реализации ИВП, выглядит более перспективной.

1.2.4. Выводы параграфа 1.2

В большом количестве работ нейрофизиологов, посвящённых построению нейронных моделей тех или иных психических процессов, выделяются следующие основные свойства «физиологической реализации» КМ:

- существуют ансамбли нейронов одинаковой структуры, являющиеся элементарными ячейками для описания процессов, протекающих в коре головного мозга (колонки неокортекса),
- колонки организованы в иерархию, обладающую обратными связями,

- колонки хранят в себе пространственно—временные шаблоны, нарабатываемые с течением времени.

1.3. Прикладная семиотика

Среди многих исследований, заложивших основы построения моделей картин мира, следует отметить отечественное направление в искусственном интеллекте появившееся в конце 90 гг. XX в. благодаря работам Д. А. Поспелова, А. М. Мейстера, Г. С. Осипова и др. [51–57]. Данное направление получило название прикладная семиотика и уходило корнями в первые семиотические модели конца 60 гг. [58]. Основная идея этого направления заключалась в использовании знакового описания когнитивных процессов, картины мира, для построения интеллектуальных систем представления знаний. Знак при этом определялся как исходный элемент любой семиотической системы и включал в себя три аспекта:

- имя знака или синтаксический аспект знака,
- содержание знака или семантический аспект знака,
- назначение знака или прагматический аспект знака.

Данное определение хорошо реализуется в виде фреймовой структуры, в которой имя фрейма соответствует имени знака, имена обычных слотов, связанные с ними ограничения, условия, области определения значений — содержанию знака, а слоты, содержащие в качестве значений имена присоединённых процедур — назначению знака [54].

Одной из основных задач, формулируемых в прикладной семиотике была задача изучения природы и свойств отношений моделирования, которые возникают между системой знаков и той областью реального мира, которая с помощью неё описывается. Объектами изучения прикладной семиотики являются

не знаки и знаковые системы сами по себе, а их применение в системах представления знаний при решении различных практических задач.

Введение понятия семиотической системы, в которой состояния соответствуют фиксированным формальным системам, а смена состояний определяется изменением договорённостей об аспектах знака, позволяет моделировать процессы, протекающие в открытых, динамических системах. При этом под сменой состояний подразумевается изменение параметров формальной системы: аксиом, правил вывода, стратегий поиска решений и т. д. Всё вышесказанное формализуется следующим определением [56].

Определение 1. *Семиотической системой W называется упорядоченная восьмёрка множеств:*

$$W = \langle T, R, A, P, \tau, \rho, \alpha, \pi \rangle, \quad (1.7)$$

где T — множество основных символов, R — множество синтаксических правил, A — множество знаний о предметной области, P — множество правил вывода решений (прагматических правил), τ — правила изменения множества T , ρ — правила изменения множества R , α — правила изменения множества A , π — правила изменения множества P .

Именно в семиотике, в том числе прикладной, были сформулированы первые схемы образования нового знака. Приведём такую схему в случае моделирования знака с помощью треугольника Фреге (Рисунок 1.6) [59, 60]. В реальном мире имеются такие сущности как объекты, процессы, все они называются денотатами. В результате отражения этих сущностей в сознании субъекта возникает представление о денотатах. При этом представление — это интегрированный образ (в психологии — гештальт), скрывает за собой денотат, делая его недоступным непосредственно.

Сталкиваясь с различными денотатами, человек накапливает определённую информацию о них. Некоторые из них он не различает, считая их проявлением одной и той же сущности, другие чем-то отличаются друг от друга.

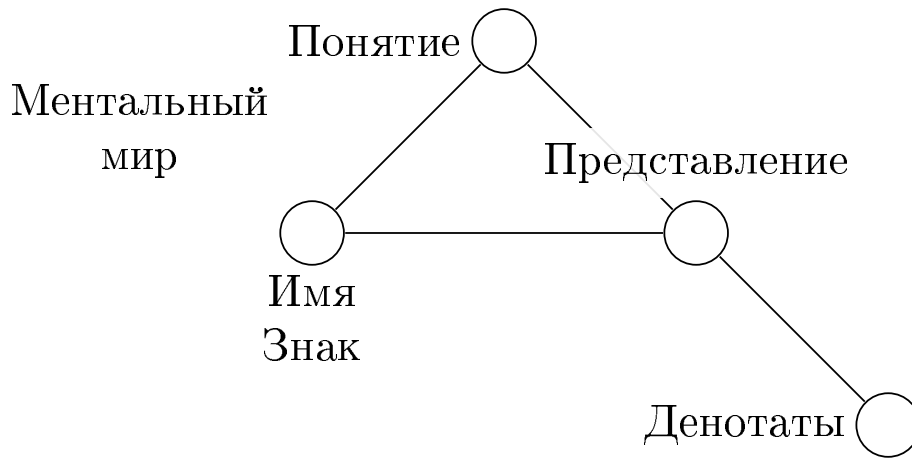


Рис. 1.6. Треугольник Фреге.

Для реализации такого различения и вводятся специфические имена, связанные с представлениями о том или ином виде сущности. На основе врождённой у человека процедуры выявления сходства—различия формируется и понятие о сущностях с данным именем.

Таким образом, наблюдение за единичным экземпляром сущности вызывает необходимость сформировать процедуру её узнавания, дать ей имя, а затем сформировать обобщённое представление об этой сущности (понятие). Со связями между именем, представлением и понятием ассоциированы процедуры, характерные для мышления человека.

Связь «имя — понятие» позволяет с одной стороны активизировать в памяти все сведения о свойствах данной сущности, а с другой, действуя в обратном направлении, позволяет по имплицитному описанию определить имя сущности. Связь «представление — понятие» позволяет по представлению сущности найти информацию о её свойствах и наоборот. Наконец, связь «имя — представление» необходима для соотнесения представления о денотате с его именем, примером работы которой могут служить алгоритмы распознавания образов.

В прикладной семиотике даётся и первое определение знака, позволяющее использовать его для построения моделей картины мира субъекта.

Определение 2. Информационная единица, структурой которой является треугольник Фреге, где вершины отождествляются с именем, понятием и

представлением, называется знаком.

Компоненты знака могут иметь свою, достаточно сложную, структуру. Так, знак может содержать информацию о связях наследования, при этом множество знаков с отношениями наследования образуют иерархическую структуру. При этом типов отношений наследования может быть несколько: «элемент — класс», «часть — целое», «вид — род» — отличающихся тем, какие свойства наследуются. Таким образом, в прикладной семиотике впервые описываются отношения на множестве знаков и их свойства. Кроме отношения наследования в прикладной семиотике вводятся и горизонтальные типы отношений, например отношение «причина — следствие». Система знаков с иерархическими и одноуровневыми отношениями называется *семиотической сетью*, в которой каждая вершина может быть в свою очередь сетью.

Важным понятием, которое вводится в прикладной семиотике, является понятие активности сети знаков (по аналогии с понятием активности баз знаний С. К. Дулина [61]). На семиотической сети специальными процедурами определяются те её участки, для которых имеется некоторое «напряжение», т. е. существует диссонанс. При задании некоторой меры такой рассогласованности и при достижении её критического уровня, запускаются отдельные процедуры по устранению диссонанса. Для их активации вводится специальный тип знаков, *метазнаки*, у которых денотатами служат определённые фрагменты сети знаков. Формируется так называемый метауровень описания.

С введением метауровня треугольник Фреге превращается в более сложную структуру, называемую квадратом Пospelова [55] (Рисунок 1.7). Первая вершина квадрата определяет синтаксис, или способ кодирования знака, вторая — семантику, или понятие о знаке, третья соответствует прагматике — тем процедурам, которые связаны с этим знаком. Новая, четвёртая вершина соответствует фрагменту некоторой структуры на множестве знаков и играет роль денотата метазнака. Стороны квадрата и его диагональ соответствуют различ-

ным процедурам, связывающим компоненты знака.

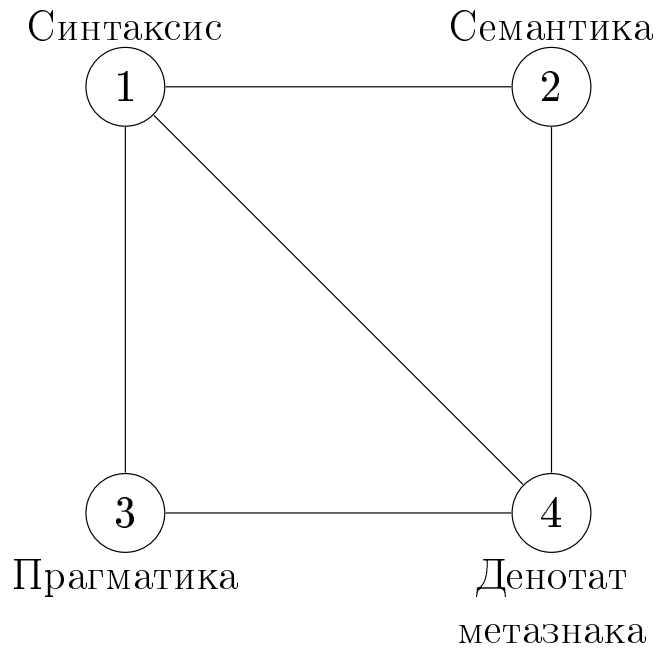


Рис. 1.7. Квадрат Пospelова.

Наличие метауровня позволяет ввести внутреннюю интерпретируемость, а также снабжает знаковые системы свойством рефлексии, что является ключевым моментом на пути моделирования высших когнитивных функций, протекающих в картине мира субъекта деятельности.

1.4. Выводы

Несмотря на большое количество имеющихся работ, в самых различных областях знаний, таких как психология, нейрофизиология, семиотика, искусственный интеллект, единого описания модели высших психических функций и процессов, протекающих в картине мира субъекта, выполнено не было. Однако были сформулированы базовые принципы, на которых должна строиться такая единая модель. К таким принципам и свойствам относятся: иерархичность как строения, так и протекающих в КМ процессов, активность КМ, существование элементарной единицы КМ, кодирование пространственно—временных шаблонов, наличие обратных связей.

Из анализа проведённых исследований в данном направлении можно сделать вывод, что базовым элементом модели картины мира должен служить знак, строение которого на внешнем, синтаксическом уровне, задаётся в рамках психологических данных и теорий психических функций, а строение на внутреннем, семантическом уровне, согласуется с нейрофизиологическими данными о строении коры головного мозга человека.

Глава 2

Модель картины мира. Синтаксический уровень

По представлениям психологов [62, 63] когнитивные функции субъекта, носителя картины мира, работают в двух «режимах»: биологическом и культурном. В первом режиме базовой отправной точкой работы психики является сигнал — абиотический стимул, используемый субъектом как указатель на определённый биотический стимул, при этом психические функции работают на распознавание биологически значимой ситуации удовлетворения некоторой потребности (физиологической или социальной). Во втором режиме определяющую роль играет знак — материальный объект, его свойство или некоторое явление, используемые субъектом как указатель на смысл события, т. е. на собственное желание или желание другого. Знак в этом случае связывает природное и культурное явления, а психические функции работают над задачей понимания сообщения. В данной главе будет рассмотрен внешний, синтаксический уровень модели картины мира, в которой когнитивные функции выполняются именно в знаковом, культурном «режиме».

2.1. Знак—базовый элемент картины мира

По А. Н. Леонтьеву [21] представление каждого объекта или процесса в картине мира включает три компонента: *образ* явления, его *значение* и *личностные смыслы* субъекта, связанные с этим явлением. Для краткости далее вместо словосочетания представление каждого явления в картине мира будет использоваться словосочетание элемент картины мира.

Образ явления представляет собой процедуру обнаружения и отделения этого явления от других, которая реализуется либо низкоуровневыми физиологическими механизмами восприятия, либо высокоуровневыми действиями, требующими специального предварительного акта планирования. Значение пред-

ставляет собой выработанные в рамках культурно-исторического процесса коллективом, которому принадлежит данный субъект, общепринятые способы использования данного явления в деятельности субъекта, в том числе наборы ситуаций с участием данного явления, в которых принято совершать определённые действия. Наконец, личностный смысл определяет отношение данного явления к той или иной потребности субъекта, которая может быть удовлетворена с помощью набора действий, определяемым самим субъектом на основе своего опыта.

Образ потенциального элемента картины мира, его значение и смыслы могут не связываться в единое целое, и тогда не происходит формирования (в филогенезе) или актуализации (в микрогенезе) знака. В таком случае психическое отражение фиксирует для субъекта не личностный, а *биологический смысл* объекта, не образ мышления, но образ восприятия (*перцепт*), и *функциональное значение* объекта в решаемой задаче вместо значения, выработанного в ходе общественно-исторической практики. Такое внезапное отражение реальности позволяет осуществлять лишь «парные» переходы между двумя компонентами знания о явлении:

- от перцепта к функциональному значению — выбор способа использования конкретного объекта,
- от функционального значения к биологическому смыслу — выбор «цели» для конкретного действия,
- от биологического смысла к перцепту — выбор конкретного объекта, удовлетворяющего заданным критериям.

Поскольку три аспекта знания об объекте связаны в этом случае лишь парными зависимостями, то нужен «внешний наблюдатель», чтобы увидеть, что это три компоненты отражения одного явления реального мира [62].

До момента связывания в знак три компоненты будем называть перцептом,

биологическим смыслом и функциональным значением соответственно. Связывание упомянутых трёх компонент в единую структуру позволяет перейти к рассмотрению явления как целостного и существующего независимо от текущего состояния действующего субъекта. Такое связывание становится возможным благодаря именованию возникающей структуры, что приводит к конструкции, называемой *знаком*. При этом знак и его компоненты становятся элементами *языковой системы*, т. е. осуществляется включение знака в картину мира субъекта (чего не происходит без именования). Сам объект приобретает при этом устойчивое и общепринятое значение, личный опыт действия с ним отражается в личностном смысле как компоненте знака, а событие восприятия объекта, представляющее собой в простейшем случае отражение в симультанном «рисунке» процедуры воспроизведения свойств объекта моторикой воспринимающего органа, фиксируется как образ явления.

2.2. Процесс формирования нового знака

Следуя [8] приведём схему процесса формирования (актуализации) знака.

0. Локализация явления. Происходит это в пространстве, в котором наряду с четырьмя измерениями физического пространства—времени существует пятое квази—измерение — измерение значений [64]. При этом субъект определяет положение явления относительно самого себя. Это значит, что он должен реализовывать функцию самосознания (рефлексию), знать свои «координаты» в этом пространстве, т. е. пребывать, как говорят психиатры, в состоянии ясного сознания (уметь определить не только физические, но и социальные параметры самого себя и ситуации, в которой он оказался).
1. Формирование перцепта. Основано на работе процедуры воспроизведения свойств явления моторикой воспринимающего органа (для живых су-

ществ) или на обработке методами распознавания образов информации, снимаемой с датчиков (для искусственных систем).

2. Порождение на основе прошлого опыта или на основе прецедентов в виде множества пар «перцепт — функциональное значение» и сформированного на шаге 1 перцепта — функционального значения явления.
3. Оценка специальным механизмом степени близости функционального значения, полученного на стадии 2 к функциональному значению, полученному на стадии 0; в случае недостаточной близости — переход к шагу 1 и продолжение формирования перцепта (в психологии сенсорно—перцептивных процессов этот механизм получил название «сенсорная уверенность»).
4. Стадии 1–3 выполняются до получения степени близости, достаточной с точки зрения специального механизма, упомянутого на шаге 3.
5. Получение субъектом из культурной среды, аккумулированной в системе естественного языка, пары «имя знака — значение» и оценка специальным механизмом степени близости функционального значения, построенного на стадии 4 к значению, полученному из культурной среды; в случае недостаточной близости — переход к шагу 1 и продолжение формирования перцепта.
6. Связывание имени из пары «имя знака — значение» с перцептом, построенным после завершения выполнения шагов 1–5. С этого момента перцепт превращается в образ.
7. Формирование личностных смыслов знака на основе прецедентов действий с явлением.
8. Связывание имени из пары «имя знака — значение» со сформированным личностным смыслом. С этого момента функциональное значение превращается в значение, а биологический смысл — в личностный смысл.

9. Продолжение отображения «биологический смысл — перцепт» включением в область определения отображения личностного смысла, полученного в предыдущем пункте, а в область значений — образа из шага 6.

В результате образован знак, соответствующий явлению. При этом следует отметить, что в следствие шага 2 формирование знака вне культурной среды невозможно. Далее будет дано уточнение приведённой схеме.

2.2.1. Компоненты знака и процедуры связывания

Итак, пусть:

- A — множество смыслов (как личностных, так и биологических),
- M — множество значений,
- P — множество признаков объектов.

Тогда:

- $a \subseteq A$ — подмножество множества личностных смыслов (возможно пустое),
- $m \subseteq M$ — подмножество множества значений (функциональное либо культурно—историческое),
- $p \subseteq P$ — подмножество множества признаков (перцепт либо образ) (Рисунок 2.1).

Переходы от множества признаков к его различным подмножествам реализуются благодаря наличию у субъекта действия встроенных процедур распознавания образов. Процесс формирования знака начинается с работы именно этих процедур. Благодаря им происходит переход от универсального множества свойств к его подмножеству, представляющему рассматриваемое явление и отделяющему его от остальных. На первом этапе формирования знака этот

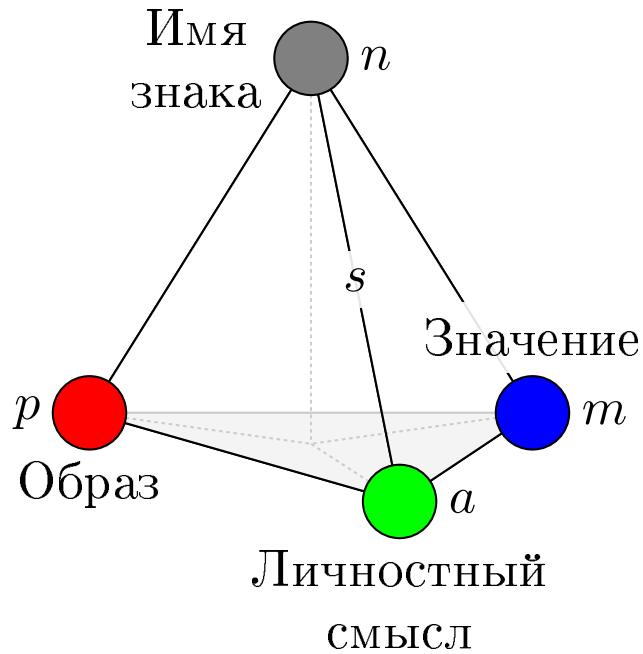


Рис. 2.1. Знак и его структура.

процесс приводит к формированию образа восприятия или перцепта. На внутреннем или семантическом уровне построению перцепта соответствует последовательное применение некоторого множества процедур распознавания образов, чему посвящён параграф 3.1.

Что касается значения t , то на первом этапе формирования знака подмножества t из суть функциональные назначения предмета, т.е. способы его использования, далее превращающиеся в значения. Итерационная процедура формирования функционального значения подробно описана в параграфе 3.2.

Подмножество множества личностных смыслов возникает благодаря опыту действия с предметом. Всякое подмножество личностных смыслов а будем интерпретировать как множество таких действий с предметом, соответствующим знаку, которые некоторым специальным механизмом оценены как успешные. Этот «специальный» механизм есть одна из процедур самосознания и в данной работе подробно не рассматривается. Формирование личностного смысла осуществляется на основе прецедентов.

Введём далее отображения связывания. Заметим, что эти отображения являются частичными функциями из булеанов P , M и A в булеаны M , A и P соот-

ветственно. Наша цель — продемонстрировать, каким образом эти отображения строятся субъектом деятельности. Разумеется, будем полагать, что субъект уже обладает минимальным опытом, т.е. ранее выполнял какие-то действия.

Первое из таких отображений $\Psi_p^m : 2^P \rightarrow 2^M$ — процедура связывания образа (или перцепта) p с (функциональным) значением m так, что $\Psi_p^m(p^{(i)}) = m^{(i)}$, где $p^{(i)} \in 2^P$, $m^{(i)} \in 2^M$, 2^P и 2^M — булеаны P и M соответственно.

Второе отображение $\Psi_m^a : 2^M \rightarrow 2^A$ связывает значения (или функциональные значения) с личностными (или биологическими) смыслами таким образом, что $\Psi_m^a(m^{(i)}) = a^{(i)}$, где $m^{(i)} \in 2^M$, $a^{(i)} \in 2^A$, 2^A — булеан A . Отображение $\Psi_a^p : 2^A \rightarrow 2^P$ связывает личностные (или биологические) смыслы с образом (перцептом) так, что $\Psi_a^p(a^{(i)}) = p^{(i+1)}$, где $a^{(i)} \in 2^A$, $p^{(i+1)} \in 2^P$.

Все перечисленные выше процедуры являются итерационными (верхние индексы в скобках соответствуют номеру итерации). Действуя на основе приведённой в начале настоящего параграфа схемы рассмотрим стадии формирования знака предмета в микрогенезе или стадии актуализации знака.

2.2.2. Формирование функционального значения и образа восприятия

Как было сказано выше, считается, что субъект обладает некоторым опытом действия, который зафиксирован, в частности, в прецедентах (примерах) применения отображения $\Psi_p^m : 2^P \rightarrow 2^M$. Будем считать, что множество прецедентов есть множество упорядоченных пар вида $\langle p, m \rangle$ таких, что $\Psi_p^m(p^{(i)}) = m^{(i)}$, где $p^{(i)} \in 2^P$, $m^{(i)} \in 2^M$.

Применим для описания процесса формирования перцепта и функционального значения элементарные топологические соображения. Заметим, что (P, T_P) и (M, T_M) суть дискретные топологические пространства с топологиями $T_P = 2^P$ и $T_M = 2^M$ соответственно. Тогда отображение $\Psi_p^m : 2^P \rightarrow 2^M$ есть отображение топологического пространства (P, T_P) в топологическое пространство (M, T_M) . Пусть $N = \langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle$ — последовательность итераций

отображения Ψ_p^m топологического пространства (P, T_P) в топологическое пространство (M, T_M) . Тогда бинарное отношение \geq является направлением на N , а $(\Psi_p^m|N, \geq)$ — последовательностью по направленному множеству N . Поскольку $\Psi_p^m(p^{(i)}) = m^{(i)}$, где $m^{(i)} \in (M, T_M)$, то Ψ_p^m — направленность в .

Пусть m — некоторая точка в пространстве (M, T_M) , σ — система окрестностей точки m . В результате применения отображения Ψ_m^p (т.е. отображения, обратного Ψ_p^m) возникает некоторый начальный перцепт $p^{(0)}$.

В результате работы механизмов распознавания образов (рассмотрение которых здесь опущено) в (P, T_P) формируется перцепт $p^{(1)}$. Отображение Ψ_p^m ставит ему в соответствие функциональное значение $m^{(1)}$ из (M, T_M) .

Далее возможны три случая:

1. $m^{(1)} = m$,
2. $m^{(1)} \notin \sigma$,
3. $m^{(1)} \in \sigma$.

Начнём со случая 2. Для большей определённости допустим, что $p^{(1)}$ — одноэлементное множество. Тогда если $m^{(1)} \notin \sigma$, то следует выбрать, вообще говоря, другое одноэлементное множество $p^{(2)}$ и вновь применить отображение $\Psi_p^m(p^{(2)}) = m^{(2)}$. Содержательно это означает, что признак $p^{(1)}$ был выбран неудачно и не являлся существенным. С точки зрения распознавания образов требуется настройка процедур распознавания. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет получен случай 3.

В случае 3 имеет место следующее: тогда и только тогда, когда, начиная с некоторого k , последовательность (Ψ_p^m, \geq) по направленному множеству $(\Psi_p^m|N, \geq)$ остается в окрестности σ точки m , тогда она сходится к точке m . Однако топология (M, T_M) является дискретной, в которой любое множество открыто; тогда из того, что m — предел последовательности (Ψ_p^m, \geq) , следует,

что $m^{(i)} = m$, начиная с некоторого k . Этим исчерпывается и случай 1. Следовательно, $p^{(i)} = (\Psi_p^m)^{-1}(m) = \Psi_m^p(m)$.

Далее в соответствие с приведённой схемой субъект получает из внешней культурно—исторической среды пару «имя — значение» — $\langle n, m^0 \rangle$. Пусть σ^0 — система окрестностей точки m^0 в (M, T_M) . Тогда вновь следует рассмотреть три случая:

1. $m = m^0$,
2. $m \notin \sigma^0$,
3. $m \in \sigma^0$.

Если $m \notin \sigma^0$, то необходимо вновь применить процедуры распознавания и отображение Ψ_p^m до тех пор, пока не будет получен случай 3. Остаётся только использовать приведённые в предыдущем абзаце соображения, заменив σ на σ^0 , а m — на m^0 . Завершается эта стадия монотонным продолжением функции Ψ_p^m на множество $\{\langle p^{(i)}, m^0 \rangle\}$.

2.2.3. Именованное

Будем рассматривать процедуру получения из внешней среды пары $\langle n, m \rangle$ как функцию $\mathfrak{M}(n)$, выдающую по имени n значение m . Тогда $(\Psi_p^m)^{-1}(\mathfrak{M}(n))$ есть функция, присваивающая имя n перцепту p' . Обозначим ее через $\mathfrak{P}(n)$. Иначе говоря, $\mathfrak{P}(n)$ есть функция именования перцепта. С получением имени n перцепт p' превращается в образ p . На следующем шаге выполняется именование биологических смыслов и тем самым — трансформация их в личностные смыслы.

Множество личностных смыслов, как было замечено выше, формируется на основе опыта действий субъекта деятельности с предметом, соответствующим рассматриваемому знаку, и оценки успешности этих действий с помощью механизмов самосознания. Для определённости будем полагать, что этот опыт

зафиксирован в отображении $a = \Psi_m^a(m)$, т.е. в виде пары $\langle m, a \rangle$. Тогда функция $\mathfrak{A}(n)$ именованная биологического смысла a' будет иметь следующий вид: $\mathfrak{A}(n) = \Psi_m^a(\mathfrak{M}(n))$. Биологический смысл a' становится личностным смыслом a (Рисунок 2.2). Завершается этот процесс монотонным продолжением функции Ψ_a^p на множество $\{a\}$.

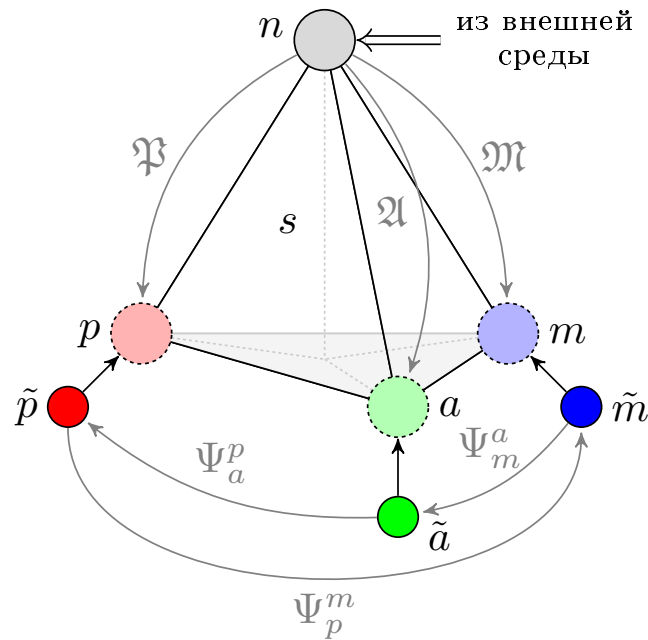


Рис. 2.2. Процедуры связывания компонент знака и функция именования.

Легко видеть, что имеют место следующие факты.

Утверждение 1. Если s — знак, p, t, a — его образ, значение и личностный смысл, соответственно, то тройка $\langle p, t, a \rangle$ есть неподвижная точка оператора $\Psi_a^p \Psi_t^a \Psi_p^m$.

Доказательство. Действительно, если n — имя знака s , то тогда значениями функций именования \mathfrak{P} , \mathfrak{M} и \mathfrak{A} в точке n являются соответствующие компоненты знака. В этом случае из определения процедур связывания следует, что $\Psi_p^m(\mathfrak{P}(n)) = \mathfrak{M}(n)$, $\Psi_m^a(\mathfrak{M}(n)) = \mathfrak{A}(n)$ и $\Psi_a^p(\mathfrak{A}(n)) = \mathfrak{P}(n)$. Рассмотрим пространство Z , в котором каждая точка z_i представлена тройкой $\langle p_i, m_i, a_i \rangle$. В этом пространстве действие операторов Ψ_x^y , $x, y \in \{p, m, a\}$, является поординатным преобразованием точки, т.е. применение, к примеру, оператора Ψ_p^m к

точке $z_i = \langle p_i, m_i, a_i \rangle$ означает преобразование второй координаты таким образом, что в результирующей точке $z'_i = \langle p_i, m'_i, a_i \rangle$ $m'_i = \Psi_p^m(p_i)$. Тогда последовательное покоординатное применение операторов Ψ_a^p , Ψ_m^a , Ψ_p^m к точке $\langle p, m, a \rangle$, для которой существуют указанные выше функции именования, не приведёт к изменению её координат, т.е. $\Psi_a^p \Psi_m^a \Psi_p^m(\langle p, m, a \rangle) = \langle p, m, a \rangle$, что и требовалось доказать. ■

Утверждение 2. Если s — знак, то $\Psi_m^a \Psi_p^m \Psi_a^p$, $\Psi_a^p \Psi_m^a \Psi_p^m$ и $\Psi_p^m \Psi_a^p \Psi_m^a$ — тождественные операторы.

Доказательство. Так как задан знак со своими компонентами, то выполняется условие утверждения 1 и действие оператора $\Psi_a^p \Psi_m^a \Psi_p^m$ можно записать следующим образом: $p = \Psi_a^p(a) = \Psi_a^p(\Psi_m^a(m)) = \Psi_a^p(\Psi_m^a(\Psi_p^m(p)))$, что и означает тождественность данного оператора. Аналогичным образом выписывается тождественность остальных операторов. ■

Утверждение 3. Если s — знак, то $\Psi_p^m(\mathfrak{P}(n)) = \mathfrak{M}(n)$, $\Psi_m^a \Psi_p^m(\mathfrak{P}(n)) = \mathfrak{A}(n)$.

Доказательство. Данные тождества следуют из доказательства утверждения 1. ■

Подобным образом выписываются ещё шесть фактов такого рода.

2.3. Процедуры самоорганизации

Рассмотрим структуры, которые могут возникать на множестве знаков как результат их самоорганизации. Моделирование самоорганизации в картине мира позволяет операционализировать представления об «активности знаний» [57], сформировавшееся в искусственном интеллекте под влиянием предложенной Л. Фестингером в 1956 г. концепции побуждающей роли знаний в поведении человека. Согласно Л. Фестингеру, знания не просто накапливаются и используются субъектом — знания живут своей жизнью, вступают в отношения, образуют то гармоничные, согласованные системы представлений, то оказываются

втянуты в конфликты и противопоставляются друг другу. Последний случай, случай рассогласования в знаниях, и выступает как побуждающая поведение сила: «...взгляды и установки имеют свойство объединяться в систему, характеризующуюся согласованностью входящих в неё элементов ... существование противоречивых отношений между отдельными элементами в системе знаний, само по себе является мотивирующим фактором» [65].

2.3.1. Отношения и операции на множестве образов

Пусть $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ — множество знаков, $p = (x_1, x_2, \dots, x_g)$ и $q = (y_1, y_2, \dots, y_h)$ — образы знаков s_p и s_q соответственно ($p, q \in (2, \dots, k)$). Пусть π — множество образов знаков из S . Образы p и q из π суть множества значений признаков; индексы признаков указывают на их принадлежность тем или иным множествам признаков (доменам); так равенство $i = j$ свидетельствует о принадлежности значений признаков x_i и y_j одному и тому же множеству, например X_i .

Упорядоченные множества $\tau_p = \langle i_1, i_2, \dots, i_p \rangle$ и $\tau_q = \langle j_1, j_2, \dots, j_q \rangle$, где $i_1, i_2, \dots, i_p \in (1, \dots, g)$, $j_1, j_2, \dots, j_q \in (1, \dots, h)$, будем называть типами образов знаков s_p и s_q соответственно.

Введём оператор Pat , который для всякого знака s_p , просматривает все остальные знаки и выполняет указанные ниже действия (пополняет бинарные отношения).

1. Если для знака s_p и некоторого знака s_q ($p \neq q$) $\tau_p = \tau_q$ и $x_i = y_i$, то $R_1 := R_1 \cup \{(p, q)\}$, $R_1 \subseteq \pi \times \pi$.

Легко видеть, что отношение R_1 является отношением эквивалентности на множестве образов π . Определённые ниже отношения R_2 , R_3 , R_4 есть отношения включения, сходства и противопоставления соответственно.

2. Если для знака s_p и некоторого знака q $\tau_p \subset \tau_q$ и $\forall i \in \tau_p$ имеет место $x_i = y_i$, то $R_2 := R_2 \cup \{(p, q)\}$, $R_2 \subseteq \pi \times \pi$ (отношение включения).

3. Если для знака s_p и некоторого знака s_q $\tau_p \cap \tau_q \neq \emptyset$ и $\forall i \in (\tau_p \cap \tau_q)$ имеет место $x_i = y_i$, то $R_3 := R_3 \cup \{(p, q)\}$, $R_3 \subseteq \pi \times \pi$ (отношение сходства).
4. Если для знака s_p и некоторого знака s_q $\tau_p \cap \tau_q \neq \emptyset$ и $\forall i \in (\tau_p \cap \tau_q)$ имеет место $x_i \neq y_i$, то $R_4 := R_4 \cup \{(p, q)\}$, $R_4 \subseteq \pi \times \pi$ (отношение противопоставления).

По существу, приведённые определения суть процедуры порождения новых элементов отношений на множестве знаков. Стартуя всякий раз, когда множество знаков пополняется новым знаком (или когда множество знаков начинает использоваться), описанные процедуры либо формируют новое отношение, либо пополняют какое-либо из отношений на знаках новым элементом. Это означает, что взаимодействие образов различных знаков приводит к формированию на множестве образов неоднородной семантической сети [66] с четырьмя типами отношений: эквивалентность образов, включение образов, сходство образов и противопоставление образов.

Рассмотрим в качестве примера операцию обобщения. Частичная операция обобщения Θ определена на множестве пар образов, принадлежащих отношению R_3 ; результатом работы Θ является новый образ, включающий все общие признаки исходных образов. Пусть π — множество образов, $p_1, p_2 \in \pi$, $p_1 = (x_1, x_2, \dots, x_g)$ и $p_2 = (y_1, y_2, \dots, y_h)$, тогда $\Theta : \pi \times \pi \rightarrow \pi$ так, что для всяких $p_1, p_2 \in \pi$ таких, что $(p_1, p_2) \in R_3$, $\Theta(p_1, p_2) = p_3$, где $p_3 = (z_1, z_2, \dots, z_l)$ так, что для $\forall j \exists j, k$, такие, что $z_i = x_j = y_k$.

Построенный в результате выполнения операции обобщения образ может послужить основой для формирования нового знака. Новый знак образуется аналогично формированию знака, описанному в разд. 2.2, с некоторыми модификациями.

1. Порождение на основе прошлого опыта или на основе прецедентов множества пар вида «образ — значение» — значения знака.

2. Получение субъектом из культурной среды, аккумулированной в системе естественного языка, пары «имя знака — значение».
3. Связывание имени из пары «имя знака — значение» с образом.
4. Формирование личностных смыслов знака на основе прецедентов действий с предметами, описываемыми обобщённым образом.
5. Связывание имени из пары «имя знака — значение» со сформированным личностным смыслом.
6. Продолжение отображения «личностный смысл — образ» включением в область определения отображения личностного смысла, полученного в предыдущем пункте, а в область значений — образа, построенного в п.1.

В результате образуется знак, соответствующий обобщённому образу. При этом пары образов $(3, 1)$ и $(3, 2)$ пополняют отношение включения R_2 . Новый знак s_3 является для знаков s_1 и s_2 их обобщением по образам (Рисунок 2.3).

2.3.2. Отношения и операции на множестве личностных смыслов

Как мы видели, с каждым знаком связан некоторый личностный смысл. На множествах личностных смыслов различных знаков оператор *Mean* естественным образом порождает отношения поглощения, противопоставления и агглютинации (т.е. склеивания, присоединения) смыслов. Определим эти отношения. Пусть по-прежнему $S = \{s_1 s_2, \dots, s_k\}$ — множество знаков.

Введём множество действий ACT и функцию I , отображающую множество личностных смыслов в булеан 2^{ACT} множества действий [67], т.е. функцию, каждому личностному смыслу a из 2^A ставящую в соответствие некоторое подмножество $act \in ACT$: $I : 2^A \rightarrow 2^{ACT}$ так, что для $\forall \in 2^A I() = act, act \in 2^{ACT}$.

Для всякого знака s отображение I ставит в соответствие каждому личностному смыслу этого знака множество действий act , применимых к объекту, опосредуемому знаком s . Эту функцию назовём интерпретацией.

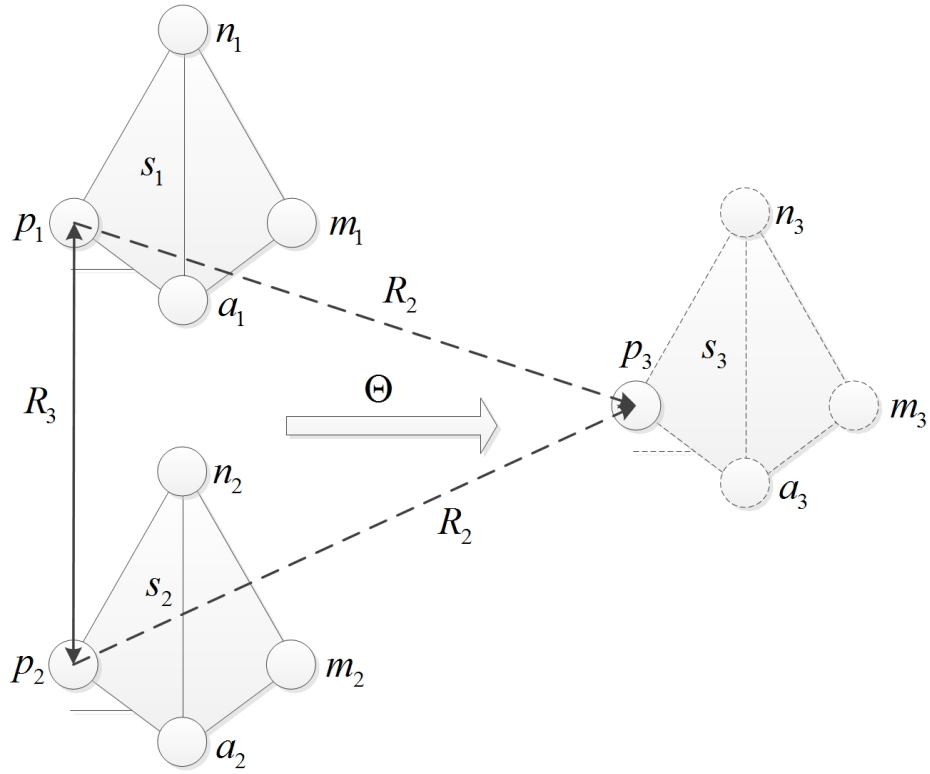


Рис. 2.3. Пример обобщения по признакам. В результате работы операции обобщения Θ пары знаков s_1 и s_2 , принадлежащих отношению сходства R_3 , формируется образ p_3 нового знака s_3 так, что пары (p_3, p_1) и (p_3, p_2) пополняют отношение включения R_2 .

Пусть теперь $I(a_1) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_g)$ и $I(a_2) = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_h)$ — интерпретации личностных смыслов знаков s_1 и s_2 . Если действие α_i добавляет некоторый факт [67], а действие β_j удаляет тот же факт [67], то будем говорить, что α_i и β_j противопоставлены друг другу и принадлежат отношению $R_5 := R_5 \cup \{(\alpha_i, \beta_j)\}$, $R_5 \subseteq A \times A$ — отношению оппозиции, т.е. множеству пар действий, образующих оппозиционные шкалы в смысле [68].

Определим следующие отношения на множестве личностных смыслов:

1. $\sqsubseteq (a_1, a_2)$ или $a_1 \sqsubseteq a_2$ (читается «смысл a_2 поглощает смысл a_1 »), если $I(a_1) \subseteq I(a_2)$;
2. $\perp (a_1, a_2)$ или $a_1 \perp a_2$ («смысл a_1 противопоставлен смыслу a_2 »), если $\exists \alpha_1 \in a_1, \beta_j \in a_2$, что $(\alpha_i, \beta_j) \in R_5$;
3. $\sqcup(a_1, a_2, a_3)$ — трёхместное отношение агглютинации смыслов, если $I(a_1) \cup I(a_2) = I(a_3)$.

2.3.3. Отношения и операции на множестве значений

Как было сказано выше, значение всякого знака отражает принятые в обществе способы использования соответствующего знаку предмета и поэтому может интерпретироваться некоторым действием. Тогда интерпретация значения напрямую связана с интерпретациями элементов личностного смысла знака. Отметим, что личностный смысл, в отличие от значения, отражает индивидуальные предпочтения субъекта, в то время как значение отражает принятые в обществе способы использования соответствующего знаку предмета. В лексике языка значение, таким образом, может отражаться некоторой группой синонимичных предикатных слов: глаголом, девербативом (т. е. отглагольным существительным), причастием, деепричастием, которые единственным образом характеризуются своим набором семантических валентностей [69].

Пусть $I = \{i_1, i_2, \dots, i_q\}$ — множество всех возможных семантических валентностей, тогда каждую группу синонимичных предикатных слов можно характеризовать каким-либо подмножеством этого множества: $I_m = \{j_1, j_2, \dots, j_k\}$, $I_m \subseteq I$. Например, группу предикатных слов движения («ехать», «бежать», «идти») можно охарактеризовать набором семантических валентностей «субъект», «средство», «направление движения», «цель», «количественная характеристика».

Пусть s — некоторый знак со значением t . Экземпляр μ значения t знака s выражается, в силу сказанного, некоторым предикатным словом и семантической валентностью. Это обстоятельство будем обозначать следующим образом: $\mu(I_m, i)$, где $\mu \in t$ — экземпляр значения знака s и $i \in I_m$ — семантическая валентность предикатного слова, характеризуемого набором I_m . На Рисунке 2.4 приведён пример знака s , значение t которого включает два экземпляра: $\mu_1(I_1, i_3)$ и $\mu_2(I_2, j_2)$.

Рассмотрим знаки s_1 и s_2 ; $\mu_1(I_1, i)$ и $\mu_2(I_2, j)$ — экземпляры значений s_1 и s_2 соответственно. Введём оператор Des , который для всякого знака s_1 про-

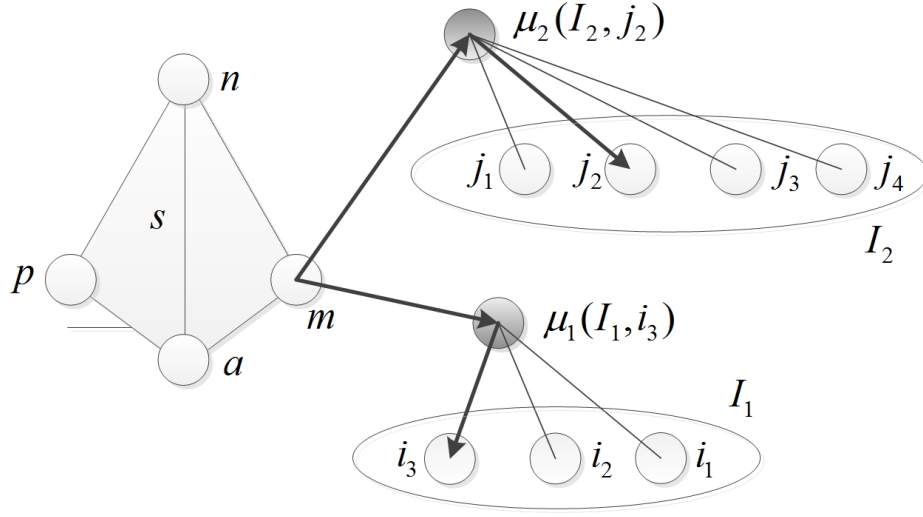


Рис. 2.4. Пример структуры значения m знака s , которое включает в себя два экземпляра $\mu_1(I_1, i_3)$ и $\mu_2(I_2, j_2)$, где $I_1 = \{i_1, i_2, i_3\}$ и $I_2 = \{j_1, j_2, j_3, j_4\}$ — наборы семантических валентностей.

смаатривает все остальные знаки и пополняет указанные ниже отношения по следующим правилам.

1. Если $I_1 = I_2$ и $i = j$, то $R'_1 := R'_2 \cup \{(\mu_1, \mu_2)\}$, $R'_2 \subseteq M \times M$.
2. Если для экземпляра значения μ_1 знака s_1 существует экземпляр значения μ_2 знака s_2 такое, что $I_1 \cap I_2 \neq \emptyset$, $I_1 \neq I_2$ и $i = j$, то $R'_2 := R'_2 \cup \{(\mu_1, \mu_2)\}$, $R'_2 \subseteq M \times M$.
3. Если для экземпляра значения μ_1 знака s_1 существует экземпляр значения μ_2 знака s_2 такое, что $I_1 = I_2$, и $i \neq j$, то $R_6 := R_6 \cup \{(\mu_1, \mu_2)\}$, $R_6 \subseteq M \times M$ — ситуационное отношение.

Аналогично отношениям R_1 и R_3 , отношения R'_1 и R'_3 являются соответственно отношениями эквивалентности и сходства на множестве значений.

С каждым экземпляром значения μ свяжем теперь метку τ , и будем записывать $\mu_1(\tau_1, I_1, i)$ и $\mu_2(\tau_2, I_2, j)$. На множестве меток вводится линейный порядок: для $\forall \tau_1, \tau_2$ справедливо $\tau_1 \leq \tau_2$ либо $\tau_1 \geq \tau_2$. Рассмотрим некоторое отношение на $M \times M$. Ограничение этого отношения на $M_{scen} \times M_{scen}$, где

$M_{scen} \subseteq M$, будем называть сценарным отношением R_7 , если оно строится следующим образом.

4. Если $\mu_1 \in M_{scen}$, $\mu_2 \in M_{scen}$, $I_1 \neq I_2$, $i \neq j$ и $\tau_1 < \tau_2$, то $R_7 := R_7 \cup \{(\mu_1, \mu_2)\}$.

Элементарным сценарием, порождённым знаком s , будем называть множество экземпляров значений $M_{est}(s)$ такое, что для $\forall \mu_1 \in M_{est}(s)$ и $\mu_2 \in M_{est}(s)$ имеет место:

- если $\mu_1 \in m$, $\mu_2 \in m$ и $\tau_1 \geq \tau_2$, то $(\mu_1, \mu_2) \in R_7$ (в этом случае сценарное отношение R_7 определено на множестве экземпляров значения знака s , т.е. $M_{scen} = m$);
- если $\mu_1 \in m$ и $\mu_2 \notin m$ и $\tau_1 \geq \tau_2$, то $(\mu_1, \mu_2) \in R_6$.

На Рисунке 2.5 приведён пример элементарного сценария $M_{est}(s_1)$, порождённого знаком s_1 , а именно сформированного двумя экземплярами μ_2 и μ_3 значения знака s_1 такими, что $(\mu_2, \mu_3) \in R_7$. В примере на Рисунке 2.5 в $M_{est}(s_1)$ входят и экземпляры значений μ_1 и μ_4 такие, что $\{(\mu_1, \mu_2), (\mu_3, \mu_4)\} \subseteq R_6$, где μ_1 и μ_4 суть экземпляры значений знаков s_2 и s_3 соответственно.

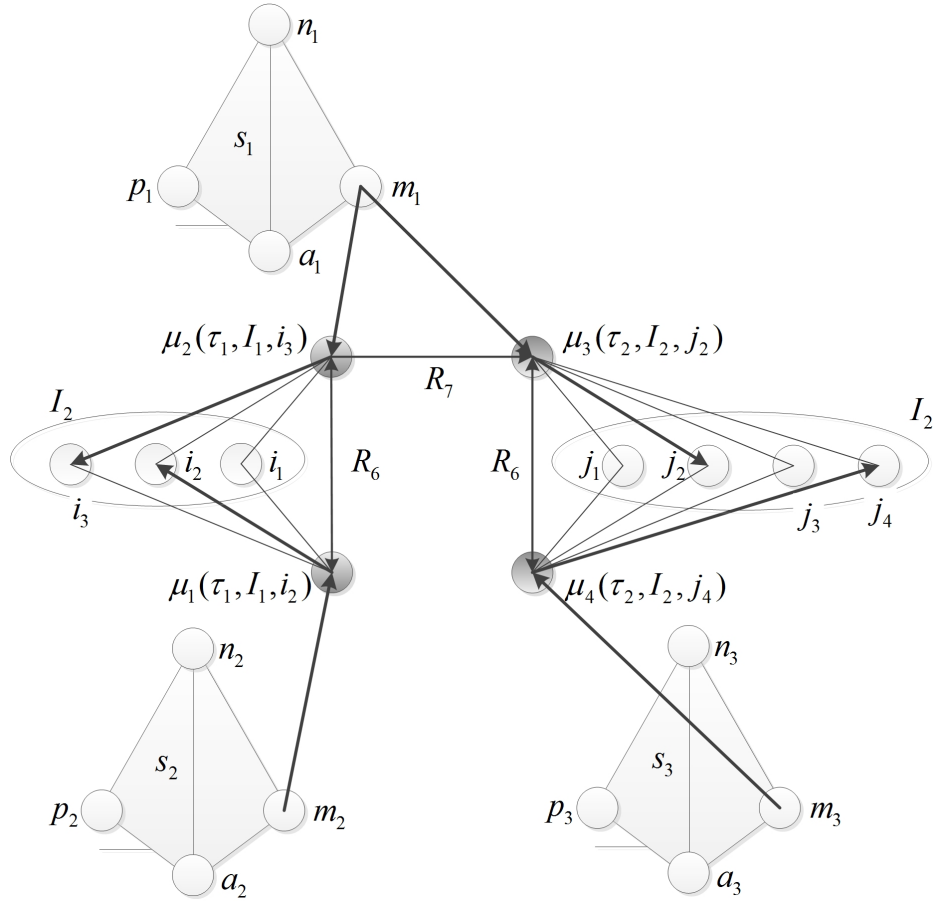


Рис. 2.5. Пример элементарного сценария $M_{est}(s_1) = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\}$, порождённого значениями знака s_1 . Так как в приведённом примере пары экземпляров значений (μ_1, μ_2) и (μ_3, μ_4) принадлежат отношению R_6 , а пара (μ_1, μ_3) — отношению R_7 , то по определению эти экземпляры принадлежат элементарному сценарию $M_{est}(s_1)$.

Глава 3

Модель картины мира. Семантический уровень

Как было сказано в выводах главы 1, внутренний, семантический уровень описания картины мира субъекта деятельности с необходимостью должен быть согласован с нейрофизиологическими данными о строении коры головного мозга человека. В данной главе будет введено такое описание с рядом существенных упрощений, призванных облегчить изложение и позволяющих сконцентрироваться на изучении основных свойств возникающих математических объектов. В начале будет дано семантическое определение образной компоненты и процедуры её функционирования в процессе восприятия, а затем будут введены описания остальных компонент знака, синтаксические определения которых давались в главе 2. В конце главы дано описание одной из основных функций картины мира — процедуры образования нового знака на семантическом уровне и приведены результаты исследования процесса формирования и связывания образа и значения нового знака.

3.1. Образная компонента знака

3.1.1. Основные принципы работы образной компоненты

Далее будем рассматривать модель образной компоненты знака, которая возникают при описании моделей зрительного восприятия, построенных на следующих основных принципах:

1. иерархичность,
2. реализация функции выдвижения перцептивных гипотез,
3. реализация способности распознавать как динамические так и статические явления,

4. управляемость.

Эти принципы согласуются с выводами, сделанными при анализе существующей литературы по нейрофизиологическим данным (см. параграф 1.2). Приведём обоснование выбора именно этих свойств в качестве базовых для построения семантического уровня модели КМ.

Первый принцип был выдвинут в работах когнитивных психологов А. Трисман (A. M. Triesman) и Дж. Джелед (G. Gelade) [70] и заключается в том, что на уровне работы сетчатки имеется набор базовых признаков или протобъектов (на уровне вторичных зрительных отделов коры головного мозга) [71], из которых в процессе научения образуются более сложные признаки. Из полученных сложных признаков строятся ещё более сложные и т. д. При этом процесс восприятия представляет собой последовательную активацию части получающейся иерархии, начиная с базовых признаков и заканчивая сложным объектом, предъявляемым зрительной системе. Основным критерием принадлежности разных признаков одному объекту (сложному признаку) является пространственная и временная когерентность. Иерархичность процесса восприятия, как одного из процессов протекающих в картине мира, также проявляется и в функциональной иерархичности коры головного мозга, что подтверждается большим количеством нейрофизиологических данных [35, 36].

Основной задачей образной компоненты на каждом уровне иерархии, таким образом, становится выявление повторяющихся временных и пространственных шаблонов в поступающем наборе сигналов и низкоуровневых признаков.

По данным анализа движения глаз испытуемых доказано, что любой процесс восприятия, как динамического так и статического явления, представляет собой развёрнутый во времени процесс, каждый этап которого с той или иной степенью точности предсказывается на основе предыдущих этапов [35, 72]. Именно в этом заключается второй принцип: модель элемента картины мира

должна включать в себя процессы выдвижения гипотез о том, какая часть иерархии признаков будет активирована в следующий момент времени.

Третий принцип определяет важность параметра времени: образная компонента должна с самого начала уметь работать с меняющимися во времени признаками, не выделяя явно случай статического изображения. Наконец, четвёртый принцип основан на теории активного зрения и том факте, что каждый этап распознавания признака на каком-либо уровне иерархии в процессе восприятия чередуется с активным этапом моторной реакции. Особенно ярко этот факт проявляется в случае зрительного восприятия при наблюдении саккадических движений глаза.

Учитывая перечисленные принципы, на которых строятся большинство существующих моделей восприятия (не только зрительного), в следующем параграфе вводится определение распознающего автомата, являющегося основным структурным элементом как образной, так и других компонент знака (Рисунок 3.1). Далее приводится алгоритм работы образной компоненты, исследуются его свойства путём постановки ряда задач распознавания.

3.1.2. Распознающий автомат

Рассмотрим автомат R_i^j вида $\langle A, Q, B, \varphi, \eta \rangle$ с множествами входов A , выходов B и состояний Q и определёнными в соответствии с нейрофизиологическими данными функциями переходов φ и выходов η . Такой автомат будем называть *распознающим автоматом* уровня j с индексом i или просто R -автоматом. Опишем кратко его автоматную функцию [73], а затем определим алгоритм его работы формально. Для этого воспользуемся понятием *признака*, который будем понимать как составную часть информационного представления некоторой сущности, явления или процесса [74].

Каждый распознающий автомат распознает или, применительно к низкочастотным сигналам, измеряет, некоторые признаки на основе входного вектора данных. Процесс распознавания (измерения) заключается в сопоставлении при-

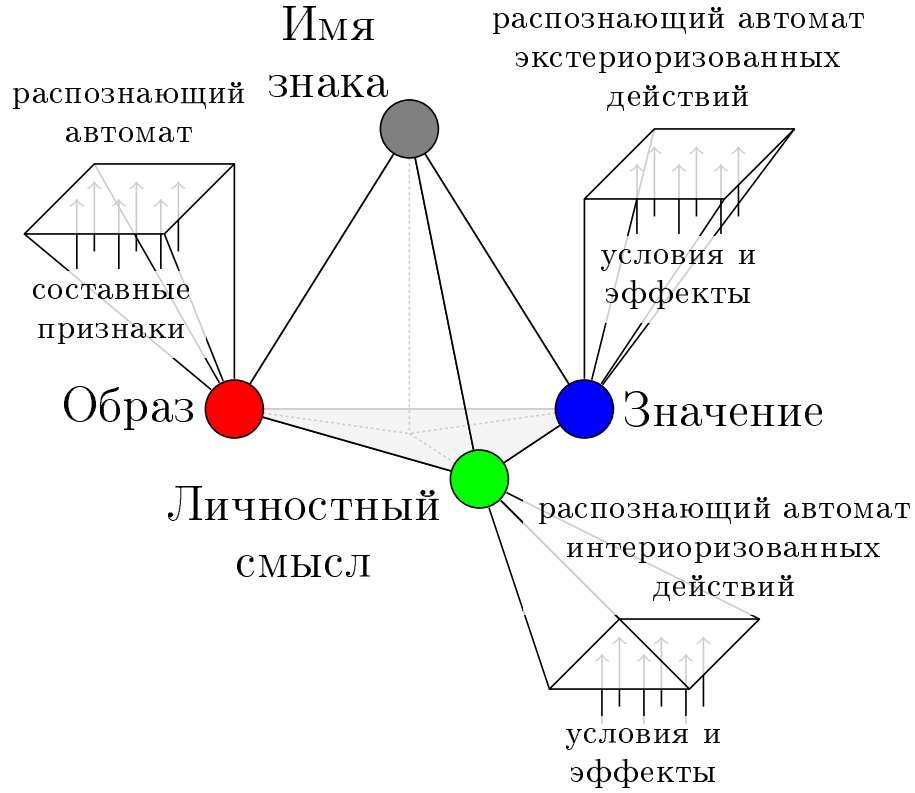


Рис. 3.1. Знак и его компоненты.

знака числу, которое определяет оценку успешности построения (измерения) признака из составляющих его входных признаков, информация о которых содержится во входном векторе. Такое число будем называть *весом признака*.

Входной вектор, в свою очередь, представляет собой вектор весов признаков предыдущего уровня иерархии, по которым распознаются выходные признаки. Распознающий автомат обладает множеством состояний, каждое из которых представляет собой набор бинарных матриц, каждый столбец которых задаёт ожидание входных признаков в следующий момент времени. Такие матрицы будем называть *матрицами предсказаний*. Опишем сказанное более строго.

Пусть заданы множества \mathcal{R} и \mathcal{F} . Множество \mathcal{R} будем называть совокупностью распознающих автоматов, а множество \mathcal{F} — совокупностью допустимых признаков. Введём бинарное отношение \dashv , определённое на паре множеств \mathcal{F} и \mathcal{R} , и будем читать $f_k \dashv R_i^j$, $f_k \in \mathcal{F}$, как «признак f_k распознаётся R -автоматом R_i^j » или как «признак f_k измеряется R -автоматом R_i^j ». Множество всех распознаваемых R -автоматом R_i^j признаков будем обозначать F_i^{*j} ,

т.е. $\forall f^* \in F_i^{*j} f^* \dashv R_i^j, F_i^{*j} \subseteq \mathcal{F}$.

Рассмотрим связный ориентированный (ярусный) граф $G_R = (V, E)$, где $V = \mathcal{R}$ — множество вершин, $E \subset \mathcal{R} \times \mathcal{R}$ — множество рёбер. Каждая вершина v , принадлежащую j -ому ярусу графа G_R , является распознающим автоматом $R_{i_1}^{j_1}$ уровня j_1 , а ребро $e = (R_{i_1}^{j_1}, R_{i_2}^{j_2}) \in E$ обозначает иерархическую связь между R -автоматом $R_{i_1}^{j_1}$ и R -автоматом $R_{i_2}^{j_2}$. R -автомат $R_{i_1}^{j_1}$ в данном случае будем называть дочерним, а R -автомат $R_{i_2}^{j_2}$ — родительским (Рисунок 3.2).

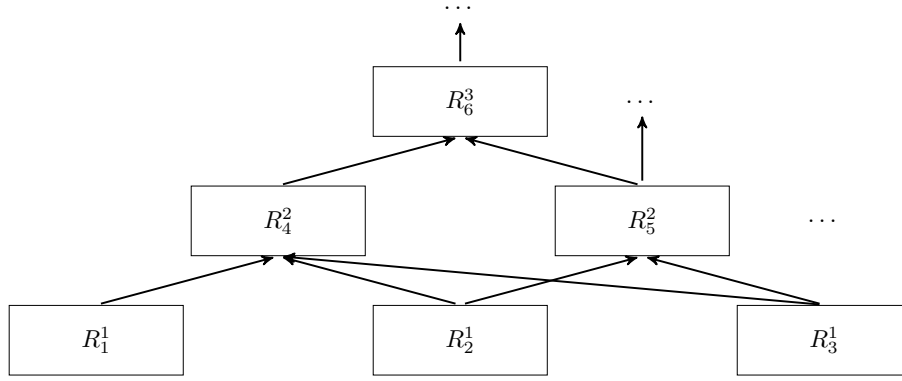


Рис. 3.2. Пример иерархии распознающих автоматов. Так, узел $R_{i_2}^{j_2}$ является родительским распознающим автоматом, а узел $R_{i_1}^{j_1}$ — дочерним автоматом.

Рассмотрим распознающий автомат R_i^j . Определим множество $F_i^j \subseteq \mathcal{F}$ таких признаков, что для любого $f \in F_i^j$ существует распознающий автомат R_k^{j-1} уровня $j - 1$, дочерний по отношению к R -автомату R_i^j , такой, что $f \dashv R_k^{j-1}$. Такое множество F_i^j будем называть совокупностью входных признаков распознающего автомата R_i^j . Некоторые части векторов весов выходных признаков распознающих автоматов $R_{i_1}^j, R_{i_2}^j, \dots, R_{i_q}^j$ путём конкатенации составляют вектор весов входных признаков для родительского автомата R_k^{j+1} следующего уровня иерархии.

Для каждого признака $f^* \in F_i^{*j}$ введём функцию распознавания $\hat{f} : X \rightarrow \mathbb{R}$, $\hat{f}(x_1, \dots, x_q) = x^*$, где $x^* \in [0, 1]$ — вес распознаваемого признака f^* в выходном векторе, а $x_1, \dots, x_q \in [0, 1]$ — веса признаков из множества F_i^j в текущем входном векторе. Множество таких функций для распознающего автомата R_i^j обозначим как \hat{F}_i^j .

Пусть мощность множества распознаваемых признаков F_i^{*j} и множества функций распознавания \hat{F}_i^j равна l_i^j , а мощность множества входных признаков F_i^j равна q_i^j . Введём упорядоченное множество локальных моментов времени T_i^j для распознающего автомата R_i^j . Будем называть *вычислительным циклом* полуинтервал между соседними моментами времени поступления сигналов обратной связи с верхнего уровня иерархии (см. ниже). Для каждого распознающего автомата определим характерное время h_i^j , за которое выполняется один цикл вычисления.

В начале s -ого цикла вычисления (момент времени $\tau_s \in T_i^j$) распознающий автомат R_i^j получает на вход вектор длины l_i^j ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$, вычисляемый по формуле среднего от векторов ожиданий, поступающих от родительских относительно R -автомата R_i^j распознающих автоматов R_k^{j+1} :

$$\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{k \in K_i^{j+1}} \hat{x}_k^{j+1}(\tau_s), \quad (3.1)$$

где N_i^j - количество родительских R -автоматов, K_i^{j+1} - множество индексов родительских относительно R_i^j распознающих автоматов. Далее в каждый момент времени $t \in T_i^j$, $\tau_s \leq t \leq \tau_s + h_i^j$, распознающий автомат R_i^j получает на вход вектор весов $\bar{x}_i^j(t)$ входных признаков из множества F_i^j длины l_i^j , вычисляет выходной вектор весов $\bar{x}_i^{*j}(t)$ распознаваемых признаков из множества F_i^{*j} длины l_i^j , вычисляет вектор ожиданий $\hat{x}_i^j(t)$ входных признаков в следующий момент времени длины q_i^j (Рисунок 3.3). Параметр h_i^j , таким образом, служит характеристикой глубины памяти R -автомата.

3.1.3. Алгоритм \mathfrak{A}_{th} работы распознающего автомата

Будем рассматривать распознающий автомат R_i^j как автомат с конечным множеством состояний. Для этого каждой функции распознавания \hat{f}_k из множества \hat{F}_i^j будем ставить в соответствие набор *матриц предсказания* $Z_k = \{Z_1^k, \dots, Z_m^k\}$ размерности $q_i^j \times h_i^j$, где h_i^j — характерное время распозна-

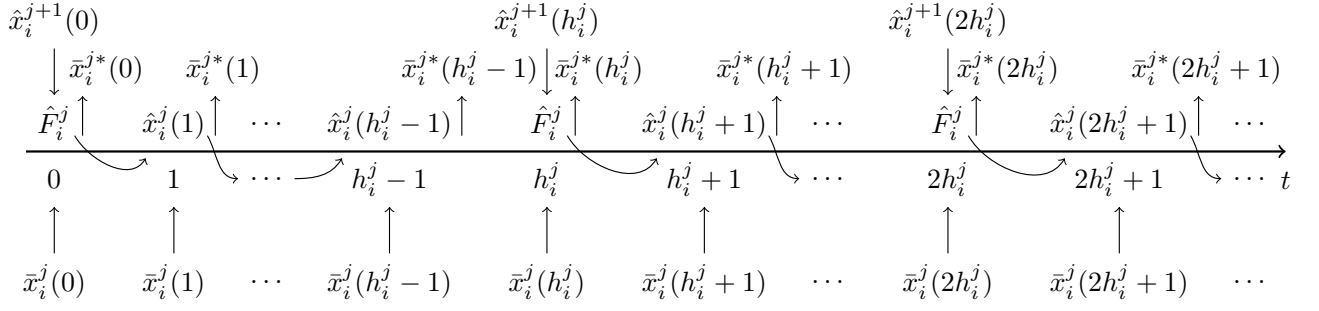


Рис. 3.3. Вычислительные циклы распознающего автомата. В моменты времени $0, h_i^j, 2h_i^j, \dots$ происходит определение нового начального состояния.

ющего автомата R_i^j . Столбец $\bar{z}_u^r = (z_{u1}^k, \dots, z_{uq}^k)$ матрицы Z_r^k интерпретируется как вектор предсказания присутствия входных признаков из множества F_i^j в момент времени $\tau_s + u$, при этом $z_{uv}^k \in \{0, 1\}$, т.е. вектор \bar{z}_u^r является булевым вектором. Сама матрица Z_r^k задаёт, таким образом, последовательность событий, наличие которых свидетельствует о присутствии распознаваемого функцией \hat{f}_k признака. Множество всех матриц предсказания распознающего автомата R_i^j будем обозначать как \mathcal{Z}_i^j .

Таким образом, R -автомат R_i^j является бесконечным автоматом Мили с переменной структурой и конечной памятью и определяется следующим набором $R_i^j = \langle X_i^j \times \hat{X}_i^{j+1}, 2^{\mathcal{Z}_i^j}, X_i^{*j} \times \hat{X}_i^j, \varphi_i^j, \eta_i^j, \rangle$, где

- X_i^j — множество входных сигналов (пространство векторов длины q_i^j действительных чисел от 0 до 1),
- X_i^{*j} — множество выходных сигналов (пространство векторов длины l_i^j действительных чисел от 0 до 1),
- \hat{X}_i^{j+1} — множество управляющих сигналов с верхнего уровня иерархии (пространство векторов длины l_i^j действительных чисел от 0 до 1),
- \hat{X}_i^j — множество управляющих сигналов на нижний уровень иерархии (пространство векторов длины q_i^j действительных чисел от 0 до 1),
- $2^{\mathcal{Z}_i^j}$ — множество состояний (множество подмножеств множества матриц

предсказания),

- $\varphi_i^j : X_i^j \times \hat{X}_i^{j+1} \rightarrow 2^{\mathcal{Z}_i^j}$ — функция переходов,
- $\eta_i^j : 2^{\mathcal{Z}_i^j} \rightarrow X_i^{*j} \times \hat{X}_i^j$ — вектор—функция выходов.

Для удобства определения автоматной функции обозначим *входное воздействие* через $\omega_i^j : T \rightarrow X_i^j$, а *выходную величину* через $\gamma_i^j : T \rightarrow X_i^{*j}$ как это принято в теории динамических систем [75] (Рисунок 3.4).

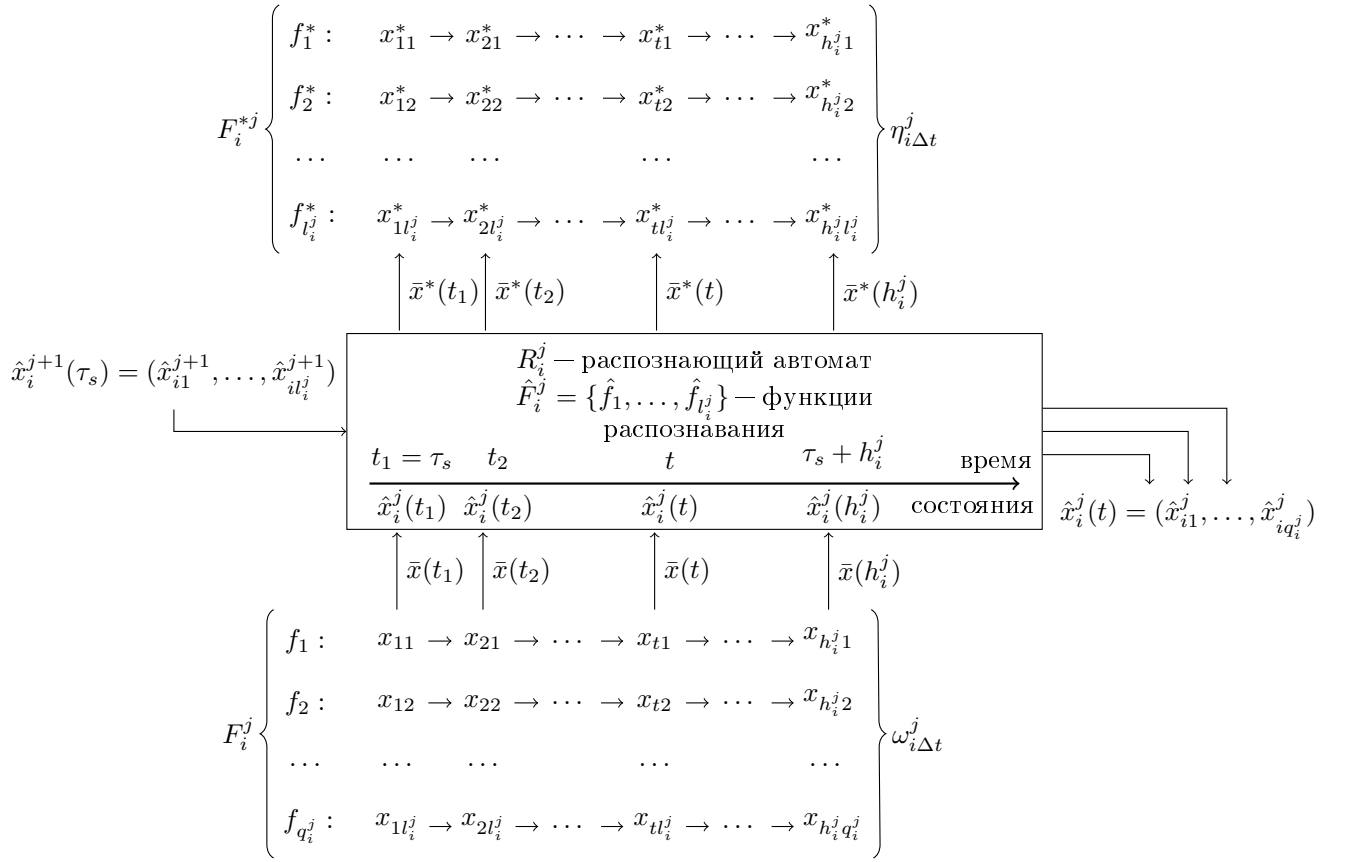


Рис. 3.4. Схема входных и выходных отображений распознающего автомата.

На страницах 77 и 78 приведён алгоритм \mathfrak{A}_{th} вычислительного цикла распознающего R -автомата, в котором рассчитываются значения функции переходов $\varphi_i^j(\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s + t), \omega_i^j)$, $1 \leq t \leq h_i^j - 1$, и выходной функции $\eta_i^j(\mathcal{Z}_i^{*j}(\tau_s + t))$, $1 \leq t \leq h_i^j - 1$, $\mathcal{Z}_i^{*j}(\tau_s + t)$ — текущее состояние. В алгоритме используется функция W нормировки весовых значений:

$$W(\bar{x}) = \left(\frac{x_1}{\max_i x_i}, \dots, \frac{x_n}{\max_i x_i} \right), \quad (3.2)$$

где $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ — вектор с ненормированными компонентами. Кратко опишем шаги алгоритма.

Вычислительный цикл распознающего автомата начинается с определения начального состояния при помощи управляющего воздействия с верхних уровней иерархии — вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаги 3–14). Начальное состояние определяется как подмножество таких распознаваемых признаков множества F_i^{*j} , которые предсказываются на основе состояния R -автоматов верхнего уровня. Первая константа c_1 определяет порог предсказываемого веса распознаваемых признаков, выше которого соответствующие функции распознавания попадают во множество активных функций \hat{F}^* (шаг 4). Далее производится отбор тех матриц предсказания активных функций распознавания, для которых обычное расстояние по норме $\|x\| = \sum_i |x_i|$ первого столбца \bar{z}_1^r от входного вектора \bar{x}_i^j в начальный момент времени не превышает второй константы c_2 (шаг 9). Множество полученных таким образом активных матриц предсказания и является текущим состоянием распознающего автомата (шаг 11). На основе активных матриц предсказания методом голосования вычисляется выходной вектор в начальный момент времени $\bar{x}_i^{j*}(\tau_s)$ (шаги 12 – 13).

Вектор управления $\hat{x}_i^j(\tau_s + 1)$ определяется как нормированный вектор, s -ый компонент которого равен сумме всех s -ых элементов вторых колонок активных матриц предсказания с весами, соответствующими элементам вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 14). Т. к. используется представление о будущем входном сигнале (вторая колонка матриц предсказания), то $\hat{x}_i^j(\tau_s + 1)$ играет роль предсказывающего вектора для нижних уровней иерархии.

После определения начального состояния начинает выполняться тело основного цикла, в котором до тех пор, пока время не превысит характерное время распознающего автомата h_i^j повторяется вычисление выходного вектора и состояния в следующий момент времени (шаги 16–26). В начале обновляется состояние, т. е. множество активных матриц предсказания Z^* , за счёт удаления тех матриц, соответствующие столбцы которых достаточно сильно отличаются

от текущего входного вектора \bar{x}_i^j (шаг 19). Далее методом голосования по количеству матриц в множестве активных матриц предсказания, отвечающих за соответствующий выходной признак, вычисляется выходной вектор \bar{x}_i^{j*} (шаги 22–23).

В завершение тела основного цикла вычисляется выходной управляющий вектор ожиданий в следующий момент времени $\hat{x}_i^j(\tau_s + t + 1)$. Как и на этапе определения начального состояния, вектор ожиданий равен нормированному вектору, элементы которого равны сумме элементов столбцов всех активных матриц предсказания, соответствующих текущему моменту времени с учётом весов начального управляющего вектора $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 26).

3.2. Исследование алгоритма \mathfrak{A}_{th} работы образной компоненты

Для обоснования корректности сформулированного алгоритма работы образной компоненты знака, в данном параграфе будет поставлен ряд задач распознавания (классификации) и построено семейство операторов распознавания. Корректность алгоритма будет продемонстрирована за счёт корректности линейных замыканий множеств построенных операторов распознавания.

3.2.1. Статическая задача классификации

Начальный момент времени

В начале рассмотрим статический случай, т. е. зафиксируем момент времени t , равный началу некоторого s -го вычислительного цикла τ_s . В этом случае, распознающий автомат R_i^j можно рассматривать как *статический оператор распознавания* $R_i^j(\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \bar{x}_i^j(\tau_s)) = R_i^j(\hat{x}_i^{j+1}, \mathcal{Z}_i^j, \bar{x}_i^j) = \bar{x}_i^{*j}$. Напомним, что \bar{x}_i^{*j} — это вектор весов распознаваемых признаков f_1^*, \dots, f_l^* из множества F_i^{*j} . Далее кратко будем записывать $R^0(\hat{x}, \mathcal{Z}, \bar{x}) = \bar{x}^*$ и везде, где это возможно,

будем опускать индексы j и i .

Введём совокупность задач \mathcal{Q}^0 аналогично работам Ю. И. Журавлёва [76]. Задача $Q^0(\hat{x}, \bar{x}, \alpha_1, \dots, \alpha_l) \in \mathcal{Q}^0$ состоит в построении оператора, вычисляющего по поступившему вектору ожиданий \hat{x} и входному вектору \bar{x} значения $\alpha_1, \dots, \alpha_l \in \{0, 1\}$ присутствия признаков f_1^*, \dots, f_l^* . Другими словами, искомый алгоритм A^{0*} переводит набор (\hat{x}, \bar{x}) в вектор $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_l)$, который будем называть *информационным вектором* входного вектора \bar{x} (Рисунок 3.5).

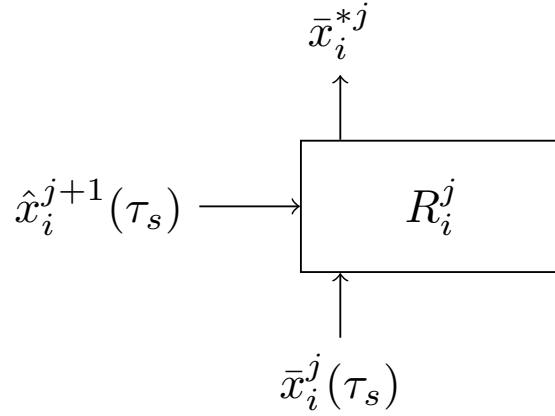


Рис. 3.5. Статическая схема корректности для момента времени τ_s .

Пусть множество \mathcal{A}^0 состоит из алгоритмов, переводящих пары (\hat{x}, \bar{x}) в векторы $\bar{\beta}$, составленные из элементов $0, 1, \Delta$: $A(\hat{x}, \bar{x}) = \bar{\beta}$. Если $\beta_i \in \{0, 1\}$, то β_i — значение величины α_i , вычисленное алгоритмом A . Если $\beta_i = \Delta$, то алгоритм A не вычислил значение α_i информационного вектора $\bar{\alpha}$.

Определение 3. Алгоритм A^0 называется корректным для задачи Q^0 , если выполнено равенство

$$A^0(\hat{x}, \bar{x}) = \bar{\alpha}. \quad (3.3)$$

Алгоритм A , не являющийся корректным для Q^0 , называется некорректным.

Далее будем считать, что множество \mathcal{A}^0 является совокупностью, вообще говоря, некорректных алгоритмов.

Утверждение 4 (аналог теоремы Ю. И. Журавлёва о введении пространства оценок из [76]). *Каждый алгоритм $A^0 \in \mathcal{A}^0$ представим как последовательность выполнения алгоритмов R^0 и C^0 , где $R^0(\hat{x}, \bar{x}) = \bar{x}^*$, \bar{x}^* — вектор действительных чисел, $C^0(\bar{x}^*) = \bar{\beta}$, $\beta_i \in \{0, 1, \Delta\}$.*

Доказательство. Пусть D — алгоритм перехода вектора $\bar{\beta}$ к числовому вектору \bar{y} . В качестве D можно рассмотреть, например, $y_i = \beta_i$, если $\beta_i \in \{0, 1\}$, и $y_i = 1/2$, если $\beta_i = \Delta$. Очевидно, что существует обратный алгоритм D^{-1} перехода от \bar{y} к $\bar{\beta}$. Положим $R^0 = A^0 \cdot D$, $C^0 = D^{-1}$. Тогда очевидно, что $A^0 = R^0 \cdot C^0 = (A^0 \cdot D) \cdot D^{-1} = A^0$. ■

Из утверждения 4 следует, что множество алгоритмов \mathcal{A}^0 порождает множества \mathcal{R}^0 и \mathcal{C}^0 , которые будем называть *множеством операторов распознавания* и *множеством решающих правил*, соответственно. В качестве операторов из множества \mathcal{R}^0 будем рассматривать операторы $R^0(\hat{x}, \mathcal{Z}, \bar{x})$.

Определение 4. *Решающее правило C^{0*} называется корректным на множестве входных векторов X , если для всякого вектора \bar{x} из X существует хотя бы один числовой вектор \bar{x}^* такой, что $C^{0*}(\bar{x}^*) = \bar{\alpha}$, где $\bar{\alpha}$ — информационный вектор входного вектора \bar{x} .*

В множестве операторов \mathcal{R}^0 введём операции умножения на скаляр, сложения и умножения. Пусть r' — скаляр, $R', R'' \in \mathcal{R}^0$. Определим операторы $r' \cdot R'$, $R' + R''$ и $R' \cdot R''$ следующим образом:

$$r' \cdot R' = (r' \cdot x_1^{*'}, \dots, r' \cdot x_l^{*'}), \quad (3.4)$$

$$R' + R'' = (x_1^{*'} + x_1^{*''}, \dots, x_l^{*'} + x_l^{*''}), \quad (3.5)$$

$$R' \cdot R'' = (x_1^{*'} \cdot x_1^{*''}, \dots, x_l^{*'} \cdot x_l^{*''}). \quad (3.6)$$

Утверждение 5. Замыкание $L(\mathcal{R}^0)$ множества \mathcal{R}^0 относительно операций (3.4) и (3.5) является векторным пространством.

Определение 5. Множество $L(\mathcal{A}^0)$ алгоритмов $A^0 = R^0 \cdot C^{0*}$ таких, что $R^0 \in L(\mathcal{R}^0)$, называются линейным замыканием множества \mathcal{A}^0 .

Зафиксируем пару (\hat{x}, \bar{x}) вектора ожидания и входного вектора. Аналогично [76] будем рассматривать задачи $Q^0(\hat{x}, \bar{x})$, обладающие следующим свойством относительно множества операторов распознавания \mathcal{R}^0 .

Определение 6. Если множество векторов $\{R^0(\hat{x}, \bar{x}) | R^0 \in \mathcal{R}^0\}$ содержит базис в пространстве числовых векторов длины l , то задача $Q^0(\hat{x}, \bar{x}, \bar{\alpha})$ называется полной относительно \mathcal{R}^0 .

Утверждение 6 (аналог теоремы Ю. И. Журавлёва о корректности линейного замыкания из [76]). Если множество задач \mathcal{Q}^0 состоит лишь из задач, полных относительно \mathcal{R}^0 , то линейное замыкание $L(\{R^0 \cdot C^{0*} | R^0 \in \mathcal{R}^0\})$ (C^{0*} — произвольное фиксированное корректное решающее правило) является корректным относительно \mathcal{Q}^0 .

Следствие 1. Пусть \mathcal{A}^0 — совокупность некорректных алгоритмов, \mathcal{R}^0 — соответствующее множество операторов распознавания, C^{0*} — фиксированное корректное решающее правило. Тогда $L(\mathcal{A}^0) = L(\{R^0 \cdot C^{0*} | R^0 \in \mathcal{R}^0\})$ является корректным относительно множества задач \mathcal{Q}^0 , если \mathcal{Q}^0 состоит из задач, полных относительно \mathcal{R}^0 .

Будем рассматривать только такие задачи $Q^0(\hat{x}, \bar{x}, \bar{\alpha})$, для которых удовлетворяется следующее условие: $\exists k$ такое, что \bar{x} не равен нулевому вектору. Такое условие является естественным, иначе вектор \bar{x} , в котором отсутствуют веса больше 0, не может рассматриваться как достоверный с точки зрения порогового алгоритма \mathfrak{A}_{th} .

Теорема 1. *Линейное замыкание $L(\mathcal{A}^0)$ семейства алгоритмов $\mathcal{A}^0 = \{R^0 \cdot C^{0*} | R^0 \in \mathcal{R}\}$ с произвольным корректным решающим правилом C^* и операторами распознавания \mathcal{R} , определёнными шагами 3–14 алгоритма \mathfrak{A}_{th} , является корректным на множестве задач \mathcal{Q}^0 .*

Доказательство. В силу утверждения 6 достаточно доказать, что произвольная задача $Q^0 \in \mathcal{Q}^0$ является полной относительно \mathcal{R}^0 . Доказательство полноты Q^0 состоит в прямом построении операторов $R_k, k = 1, 2, \dots, l$ из $L(\mathcal{R}^0)$, переводящих пару $(\hat{x}, \bar{x}), \hat{x} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_l), \bar{x} = (x_1, \dots, x_q)$ в числовой вектор

$$\bar{x}_k^* = (x_{k1}^*, \dots, x_{kl}^*), \quad x_{kk}^* = 1, \quad \forall u \neq k \quad x_{ku}^* = 0. \quad (3.7)$$

Пусть мощность множества Z_k признака f_k равна N , норма $\|\bar{x}\|$ равна $M \leq q$, максимальная компонента вектора \bar{x} равна x_{max} . Зафиксируем величину k и коэффициенты $c_1 = \min_v \hat{x}_v, c_2 = \frac{M}{1+M}$. Рассмотрим матрицы предсказания из множеств Z_1, \dots, Z_l признаков f_1^*, \dots, f_l^* , удовлетворяющие следующим условиям:

1. в каждой матрице предсказаний $Z_r^k \in Z_k$ в столбце $\bar{z}_1^r = (z_{11}^r, \dots, z_{1q}^r)$ компонента $z_{1v}^r = 1$, если $x_v = x_{max}$, и $z_{1v}^r = 0$, если $x_v < x_{max}$;
2. в каждой матрице предсказаний $Z_r^u \in Z_u, u \neq k$ в столбце $\bar{z}_1^r = (z_{11}^r, \dots, z_{1q}^r)$ компонента $z_{1v}^r = 0$ при любых v .

Вычислим величину x_{kk}^* . Т. к. $c_1 = \min_u \hat{x}_u$, то условие $\hat{x}_k \geq c_1$ на шаге 4 алгоритма \mathfrak{A}_{th} автоматически выполняется и функция измерения \hat{f}_k попадает в множество \hat{F}^* . Из условия 1 следует, что каждая матрица $Z_r^k \in Z_k$ попадает в множество Z^* на шаге 9 алгоритма \mathfrak{A}_{th} :

$$\frac{\|\bar{z}_1^r - \bar{x}\|}{\|\bar{z}_1^r\| + \|\bar{x}\|} < \frac{\sum_v |z_{1v}^r - x_v|}{1 + M} < \frac{M}{1 + M} = c_2, \quad (3.8)$$

так как минимум один компонент в \bar{z}_1^r равен 1 и существует элемент $x_v > 1/2$.

В этом случае $x_{kk}^* = \gamma \cdot N$, где γ — весовой коэффициент.

Вычислим величины x_{ku}^* . Т. к. $c_1 = \min_v \hat{x}_v$, то условие $\hat{x}_u \geq c_1$ на шаге 4 алгоритма \mathfrak{A}_{th} автоматически выполняется и все функции измерения \hat{f}_u попадают в множество \hat{F}^* . Из условия 2 следует, что каждая матрица $Z_r^u \in \mathcal{Z}_u$ не попадает в множество Z^* на шаге 9 алгоритма \mathfrak{A}_{th} :

$$\frac{\|\bar{z}_1^r - \bar{x}\|}{\|\bar{z}_1^r\| + \|\bar{x}\|} = \frac{M}{M} = 1 > \frac{M}{1+M} = c_2. \quad (3.9)$$

В этом случае $x_{ku}^* = 0$.

Рассмотрим оператор распознавания $\frac{1}{\gamma \cdot N} R_k(\hat{x}, \mathcal{Z}, \bar{x})$, матрицы предсказания которого $\mathcal{Z} = \{Z_1, \dots, Z_l\}$ удовлетворяют условиям 1–2 и который переводит задачу Q^0 в вектор \bar{x}_k^* , причём $\bar{x}_{kk}^* = 1$, а $\bar{x}_{ku}^* = 0, u \neq k$. Данный оператор удовлетворяет критериям (3.7) на вектор \bar{x}_k^* , а значит, необходимый базис в пространстве выходных векторов построен. Полнота задачи Q^0 доказана. ■

Произвольный момент времени

Фиксация момента времени не в начале вычислительного цикла, а на любом другом значении $\tau_s < t < \tau_s + h_i^j$, приводит к операторам вида $R_i^j(\hat{x}_i^j(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \omega_{i\Delta t}^j)$, $\Delta t = [\tau_s, t]$, которые кратко будем записывать R^t . Использование здесь функции входного воздействия $\omega_{i\Delta t}^j$, которую в виду дискретности времени можно представлять в виде последовательности входных векторов, связано с тем, что состояние распознающего автомата к моменту времени t зависит не только от текущего входа $\bar{x}_i^j(t)$, но и от предыстории поступления входных векторов с момента начала вычислительного цикла τ_s . Для операторов R^t постановка задачи распознавания выглядит аналогичным образом, как и для операторов R начального времени: задача $Q^t(\hat{x}_i^j(\tau_s), \omega_{i\Delta t}^j, \bar{\alpha}) \in \mathcal{Q}^t$ состоит в построении алгоритма A^{t*} , переводящего набор $(\hat{x}_i^j(\tau_s), \omega_{i\Delta t}^j)$ в информационный вектор $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_l)$.

Определения свойств корректности алгоритма и полноты задачи, а также корректного решающего правила C^{t*} , идентичны случаю с начальным моментом времени (Рисунок 3.6). Аналогично, рассматривая только такие зада-

чи $Q^t(\hat{x}_i^j(\tau_s), \omega_{i\Delta t}^j, \bar{\alpha})$, в которых последовательность $\omega_{i\Delta t}^j$ не содержит нулевых векторов, можно сформулировать следующую теорему (будем далее опускать индексы i, j).

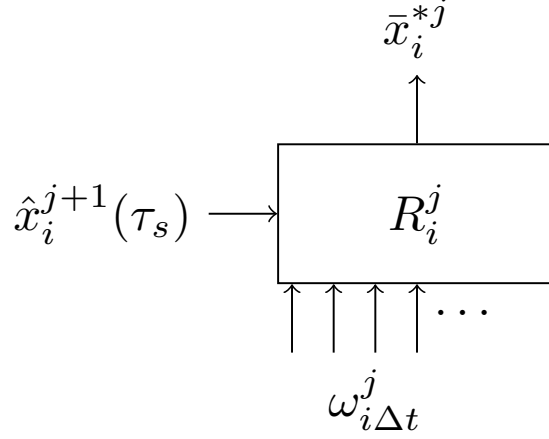


Рис. 3.6. Статическая схема корректности для момента времени $\tau_s < t \leq \tau_s + h_i^j$.

Теорема 2. *Линейное замыкание $L(\mathcal{A}^t)$ семейства алгоритмов $\mathcal{A}^t = \{R^t \cdot C^{t*} | R^t \in \mathcal{R}^t\}$ с произвольным корректным решающим правилом C^{t*} и операторами распознавания \mathcal{R}^t , определёнными шагами 16–26 алгоритма \mathfrak{A}_{th} , является корректным на множестве задач \mathcal{Q}^t .*

Доказательство. Пусть для простоты $\tau_s = 0$, т. е. будем рассматривать первый вычислительный цикл распознающего автомата. Как и в случае доказательства теоремы 1 будем строить для некоторой задачи $Q^t \in \mathcal{Q}^t$ базис из операторов R_k^t , $k = 1, 2, \dots, l$ из \mathcal{R}^t , переводящих пару $(\hat{x}(\tau_s), \omega_{\Delta t})$ в числовой вектор

$$\bar{x}_k^*(t) = (x_{k1}^*, \dots, x_{kl}^*), \quad x_{kk}^* = 1, \quad \forall u \neq k \quad x_{ku}^* = 0. \quad (3.10)$$

Зафиксируем, как и в случае доказательства теоремы 1, константы c_1 и c_2 : $c_1 = \min_v \hat{x}_v$, $c_2 = \frac{M}{1+M}$, где M — норма последнего вектора $\bar{x}(t)$ из последовательности $\omega_{\Delta t}$. Зафиксировав индекс k , рассмотрим матрицы предсказания из множеств Z_1, \dots, Z_l признаков f_1^*, \dots, f_l^* , удовлетворяющие следующим условиям:

- в каждой матрице предсказания $Z_r^k \in Z_k$ первые t столбцов равны соответствующим t элементам последовательности $\omega_{\Delta t}$, а в $t + 1$ -ом столбце $\bar{z}_{t+1}^r = (z_{(t+1)1}^r, \dots, z_{(t+1)q}^r)$ компонента $z_{(t+1)v}^r = 1$, если $x_v = x_{max}$, и $z_{(t+1)v}^r = 0$, если $x_v < x_{max}$, где x_{max} — максимальная компонента вектора $\bar{x}(t)$;
- в каждой матрице предсказания $Z_r^u \in Z_u$, $u \neq k$ первые t столбцов также равны соответствующим t элементам последовательности $\omega_{\Delta t}$, а $t + 1$ -ый столбец \bar{z}_{t+1}^r — нулевой.

Вследствие значения константы c_1 условие $\hat{x}_s \geq c_1$ на шаге 4 алгоритма \mathcal{A}_{th} автоматически выполняется при любых s и все функции измерения попадают в множество \hat{F}^* . Т. к. до момента времени t столбцы всех матриц из множества \mathcal{Z} равны друг другу и при этом в точности соответствуют текущему входному вектору, то ни одна матрица не отсеивается на шагах 9 и 19 алгоритма \mathcal{A}_{th} .

В момент времени t состояние распознающего автомата совпадает с состоянием в начальный момент времени и мы, таким образом, получаем аналогичную доказательству теоремы 1 ситуацию. В виду выбора константы c_2 компонента x_{kk}^* выходного вектора \bar{x}^* в момент времени t равняется $\gamma \cdot N$, где γ — весовой коэффициент, а компоненты x_{uk}^* , $u \neq k$, равны нулю.

В итоге, операторы распознавания $\frac{1}{\gamma} R_k^t(\hat{x}(\tau_s), \mathcal{Z}_k^t, \omega_{\Delta t})$ (γ — некоторый весовой коэффициент) выдают выходные вектора, удовлетворяющие условию 3.10, и эти операторы, таким образом, составляют необходимый базис в пространстве выходных векторов. Полнота задачи Q^t доказана. ■

3.2.2. Динамические постановки задачи классификации

Случай одного распознающего автомата

Теперь рассмотрим динамическую постановку задачи. Зафиксируем не конкретный момент времени t , а полуинтервал времени $\Delta t = [\tau_s, \tau_s + h_i^j)$. В этом

случае распознающий автомат R_i^j можно рассматривать как *динамический оператор распознавания* $\hat{R}_i^j(\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \omega_{i\Delta t}^j) = \gamma_{i\Delta t}^j$, преобразующий функцию входного воздействия $\omega_{i\Delta t}^j$, ограниченную на полуинтервале Δt , в функцию выходной величины $\gamma_{i\Delta t}^j$ на том же временном полуинтервале. Так как время полагается дискретным, то действие динамического оператора \hat{R}_i^j можно заменить последовательным по времени действием статических операторов

$$R(\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \bar{x}_i^j(\tau_s)), R^1(\hat{x}_i^j(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \bar{x}_i^j(\tau_s + 1)), \dots, \\ R^{h_i^j-1}(\hat{x}_i^j(\tau_s), \mathcal{Z}_i^j, \bar{x}_i^j(\tau_s + h_i^j - 1)), \quad (3.11)$$

выдающих последовательность

$$\{\bar{x}_i^{*j}(t) | t \in \Delta t\} = \{\bar{x}_i^{*j}(\tau_s), \bar{x}_i^{*j}(\tau_s + 1), \dots, \bar{x}_i^{*j}(\tau_s + h_i^j - 1)\}. \quad (3.12)$$

Так как параметр h_i^j фиксирован, то конечные последовательности векторов $\omega_{i\Delta t}^j$ и $\gamma_{i\Delta t}^j$ можно считать матрицами размерности $l_i^j \times h_i^j$. Далее будем опускать индексы i и j .

Формулировка задачи в динамическом случае будет выглядеть следующим образом: задача $\hat{Q}(\hat{x}, \omega_{\Delta t}, \bar{\alpha}) \in \hat{\mathcal{Q}}$ состоит в построении алгоритма $\hat{\mathcal{A}}^*$, вычисляющего по поступившему начальному вектору ожиданий \hat{x} и матрице входных воздействий $\omega_{\Delta t}$ информационный вектор $\bar{\alpha}$. Однако искомый оператор распознавания \hat{R} должен выдавать матрицу весов присутствия распознаваемых признаков $\gamma_{\Delta t}$, столбцы которой должны сходиться (с учётом корректного решающего правила) к информационному вектору: $\lim_{t \rightarrow \tau_s + h} \bar{x}^*(t) = \bar{\alpha}$ (Рисунок 3.7).

Т. к. из всех столбцов выходной матрицы $\gamma_{\Delta t}$ равенство информационному вектору требуется только для последнего столбца, а на остальные накладывается некоторое ограничение, то при разложении алгоритма $\hat{\mathcal{A}}$ будем использовать статический оператор R^{h-1} со следующим ограничением на выходные вектора в моменты времени $0 \leq t < h$:

$$\|\bar{x}^*(\tau_s) - \alpha\| \geq \|\bar{x}^*(\tau_s + 1) - \alpha\| \geq \dots \geq \|\bar{x}^*(\tau_s + h - 1) - \alpha\|, \quad (3.13)$$

где последнее слагаемое приравнивается нулю. В простейшем случае $\bar{x}^*(\tau_s + i) = \bar{\alpha}$, $0 \leq i < h$. Будем обозначать такие операторы как \hat{R}' , а их множество соответственно $\hat{\mathcal{R}}'$.

Определение корректности алгоритма \hat{A} в данном случае эквивалентно определению в статическом случае.

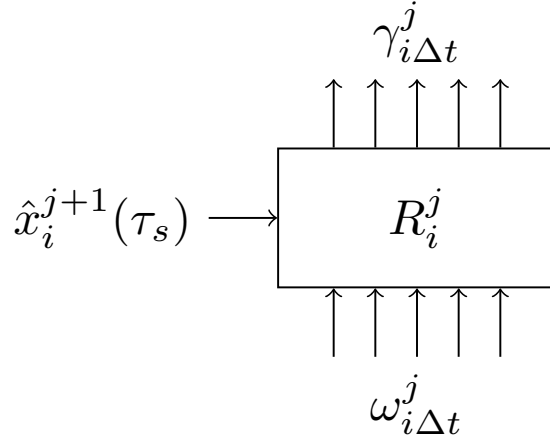


Рис. 3.7. Динамическая схема корректности для одиночного распознающего автомата.

Утверждение 7. Каждый алгоритм $\hat{A} \in \hat{\mathcal{A}}$ представим как последовательность выполнения алгоритмов \hat{R}' и C , где $\hat{R}'(\hat{x}, \mathcal{Z}, \omega_{\Delta t}) = \bar{x}^*(\tau_s + h - 1)$, $\bar{x}^*(\tau_s + h - 1)$ — вектор действительных чисел, $C(\bar{x}^*(\tau_s + h - 1)) = \bar{\beta}$, $\bar{\beta}$ — вектор значений $\beta_i \in \{0, 1, \Delta\}$.

В качестве корректного решающего правила C^* используется то же правило, что и в статических случаях. Аналогично статическому случаю вводится определение линейного $L(\hat{\mathcal{R}}')$ замыкания над множеством $\hat{\mathcal{R}}'$.

Определение 7. Если множество векторов $\{\hat{R}'(\hat{x}, \omega_{\Delta t}) | \hat{R}' \in \hat{\mathcal{R}}'\}$ содержит базис в пространстве числовых векторов размерности l , то задача $\hat{Q}(\hat{x}, \omega_{\Delta t}, \bar{\alpha})$ называется полной относительно $\hat{\mathcal{R}}$.

Утверждение 8 (аналог теоремы Журавлёва о корректности линейного замыкания из [76]). Если множество задач $\hat{\mathcal{Q}}$ состоит лишь из задач, полных

относительно $\hat{\mathcal{R}}$, то линейное замыкание $L(\{\hat{R}' \cdot C^* | \hat{R}' \in \hat{\mathcal{R}}'\})$ (C^* — произвольное фиксированное корректное решающее правило) является корректным относительно $\hat{\mathcal{Q}}$.

Зафиксируем начальный вектор ожиданий \hat{x} и последовательность входных векторов $\omega_{\Delta t}$. Если, как и в статическом случае, мы будем рассматривать только такие задачи $\hat{Q}(\hat{x}, \omega_{\Delta t}, \bar{\alpha})$, для которых в матрице $\omega_{\Delta t}$ нет нулевых столбцов, то можно сформулировать следующую теорему.

Теорема 3. *Линейное замыкание $L(\hat{\mathcal{A}})$ семейства алгоритмов $\hat{\mathcal{A}} = \{\hat{R}' \cdot C^* | \hat{R}' \in \hat{\mathcal{R}}'\}$ с константным корректным решающим правилом C^* и операторами распознавания $\hat{\mathcal{R}}'$, определёнными алгоритмом \mathfrak{A}_{th} , является корректным на множестве задач $\hat{\mathcal{Q}}$.*

Доказательство. В силу того, что динамический оператор \hat{R} эквивалентен по действию введённому статическому оператору \hat{R}' , то для доказательства корректности линейного замыкания необходимо показать полноту произвольной задачи $\hat{Q} \in \hat{\mathcal{Q}}$ относительно $\hat{\mathcal{R}}'$. Для этого, как и ранее, построим такие операторы \hat{R}'_k , $k = 1, 2, \dots, l$, что

$$\bar{x}_k^*(\tau_s + h - 1) = (x_{k1}^*, \dots, x_{kl}^*), x_{kk}^* = 1, \forall u \neq k x_{ku}^* = 0.$$

Рассмотрим статические операторы распознавания R_k^{h-1} , матрицы предсказания которых строятся по следующим принципам (считаем для упрощения выкладок, что $\tau_s = 0$):

- в каждой матрице предсказания $Z_r^k \in Z_k$ первые $h - 1$ столбцов равны соответствующим $h - 1$ столбцам матрицы $\omega_{\Delta t}$, а в h -ом столбце $\bar{z}_h^r = (z_{h1}^r, \dots, z_{hq}^r)$ компонента $z_{hv}^r = 1$, если $x_v = x_{max}$, и $z_{hv}^r = 0$, если $x_v < x_{max}$, где x_{max} — максимальная компонента вектора $\bar{x}(h - 1)$;

- в каждой матрице предсказания $Z_r^u \in Z_u$, $u \neq k$ первые $h-1$ столбцов также равны соответствующим $h-1$ столбцам матрицы $\omega_{\Delta t}$, а h -ый столбец \bar{z}_h^r — нулевой.

Такие операторы, в силу доказательства теоремы 2, образуют необходимый базис. Композитный оператор, который строится на их основе, удовлетворяет также и условию 3.13, т. к. все выходные вектора до момента времени $h-1$ являются единичными векторами \bar{e} , а в момент $h-1$ становятся равными информационному вектору:

$$\|\bar{e} - \alpha\| = \|\bar{e} - \alpha\| = \dots \leq \|bar\alpha - \bar{\alpha}\|.$$

Полнота задачи \hat{Q} доказана. ■

Случай двухуровневой иерархии распознающих автоматов

Рассмотрим иерархическую постановку задачи, в которой будет учитываться иерархическая связь между операторами распознавания. Будем рассматривать не единичный распознающий автомат, а двухуровневую иерархию E_j^2 , на каждом уровне которой будет по одному распознающему автомату $R_{i_1}^{j+1}$ и $R_{i_2}^j$. Зафиксируем, как и в динамическом случае, полуинтервал времени $\Delta t = [\tau_s, \tau_s + h_{i_2}^j)$. Иерархию E_j^2 можно рассматривать как *иерархический оператор распознавания* $\hat{R}_{e,j}^2(\hat{x}_{i_1}^{j+1}(\tau_s), \mathcal{Z}_{i_1}^{j+1}, \mathcal{Z}_{i_2}^j, \omega_{i_2\Delta t}^j) = \bar{x}_{i_1}^{*j+1}$, принимающий функцию входного воздействия $\omega_{i_2\Delta t}^j$ нижнего уровня, ограниченную на полуинтервал времени Δt , и выдающий вектор весов распознаваемых признаков $\bar{x}_{i_1}^{*j+1}$.

Т. к. в иерархии E_j^2 управляющий выходной вектор R -автомата $R_{i_1}^{j+1}$ является одновременно и вектором ожидания для R -автомата $R_{i_2}^j$, а конечный выходной вектор $\bar{x}_{i_2}^{*j}$ — входным вектором $\bar{x}_{i_1}^{j+1}$, то действие иерархического оператора $\hat{R}_{e,j}^2$ можно заменить последовательным действием динамического оператора $\hat{R}_{i_2}^j(\hat{x}_{i_2}^{j+1}(\tau_s), \mathcal{Z}_{i_2}^j, \omega_{i_2\Delta t}^j)$ нижнего уровня и статического оператора

$R_{i_1}^{j+1,t}(\hat{x}_{i_1}^{j+2}(\tau_s), \mathcal{Z}_{i_1}^{j+1}, \bar{x}_{i_1}^{j+1}(\tau_s))$ верхнего уровня, где для распознающего автомата $R_{i_1}^{j+1}$ рассматривается начальный момент времени вычислительного цикла, соответствующему моменту окончания вычислительного цикла распознающего автомата $R_{i_2}^j$.

Формулировка задачи в иерархическом случае будет выглядеть следующим образом: задача $\hat{Q}_{e,j}^2(\hat{x}_{i_1}^{j+2}, \omega_{i_2\Delta t}^j, \bar{\alpha}_{i_1}^{j+1}) \in \hat{Q}_{e,j}^2$ состоит в построении алгоритма \hat{A}_e , вычисляющего по поступившему начальному вектору ожиданий $\hat{x}_{i_1}^{j+2}$ и матрице входных воздействий $\omega_{i_2\Delta t}^j$ значения информационного вектора $\bar{\alpha}_{i_1}^{j+1}$ (Рисунок 3.8). Определения свойств корректности алгоритма и полноты задачи, а также корректного решающего правила, в данном случае с точностью до обозначений совпадают с аналогичными определениями для статического случая.

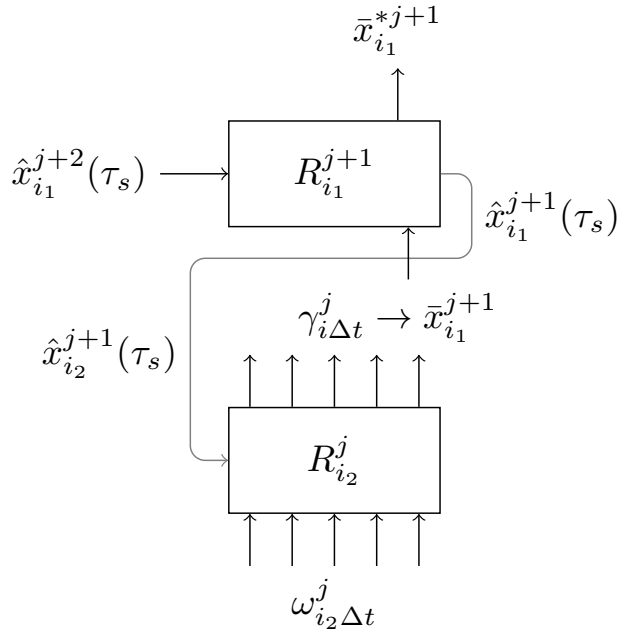


Рис. 3.8. Динамическая схема корректности для случая двухуровневой иерархии.

Зафиксируем начальный вектор ожиданий $\hat{x}_{i_1}^{j+2}$ и последовательность входных векторов $\omega_{i_2\Delta t}^j$. Если мы будем рассматривать только такие задачи $\hat{Q}_{e,j}^2(\hat{x}_{i_1}^{j+2}, \omega_{i_2\Delta t}^j, \bar{\alpha}_{i_1}^{j+1})$, для которых в матрице $\omega_{i_2\Delta t}^j$ нет нулевых столбцов, то можно сформулировать следующую теорему.

Теорема 4. *Линейное замыкание $L(\hat{A}_e)$ семейства алгоритмов $\hat{A}_e = \{\hat{R}_{e,j}^2 \cdot$*

$\hat{C}_e^* | \hat{R}_{e,j}^2 \in \hat{\mathcal{R}}_{e,j}^2 \}$ с произвольным корректным решающим правилом \hat{C}_e^* и операторами распознавания $\hat{\mathcal{R}}_{e,j}^2$, определёнными алгоритмом \mathfrak{A}_{th} , является корректным на множестве задач $\hat{\mathcal{Q}}_{e,j}^2$.

Доказательство. Доказательство корректности в данном случае сводится к формулировке задачи нижнего уровня $\hat{Q}_2(\hat{x}_{i_2}^{j+1}, \omega_{i_2 \Delta t}^j, \bar{\alpha}_{i_2}^j)$. Т. е. необходимо сформировать по задаче $\hat{Q}_{e,j}^2$ информационный вектор $\bar{\alpha}_{i_2}^j$ и вектор ожидания $\hat{x}_{i_2}^{j+1}$.

Следуя определению вычислительного цикла в алгоритме \mathfrak{A}_{th} , будем считать, что $\hat{x}_{i_2}^{j+1}$ равен тому управляющему воздействию распознающего автомата $R_{i_1}^{j+1}$, которое было вычислено в начальный момент времени τ_s , т. е. вектору $\hat{x}_{i_1}^{j+1} = W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_2^r)$ (см. шаг 14 алгоритма \mathfrak{A}_{th}). Каждый компонент $\alpha_{i_2 u}^j$ информационного вектора $\bar{\alpha}_{i_2}^j$ будем вычислять по следующему правилу:

$$\alpha_{i_2 u}^j = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{v=1}^{l_{i_1}^{j+1}} \frac{\alpha_{i_1 v}^{j+1}}{|\mathcal{Z}_v|} \sum_{w=1}^{|\mathcal{Z}_v|} z_{1v}^w > 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Т. к. входной вектор распознающего автомата $R_{i_1}^j$ равен вектору $\bar{\alpha}_{i_2}^j$, то такие значения компонентов информационного вектора позволяют удовлетворить ограничениям теоремы 2 (существование ненулевого входного вектора). С другой стороны, формулируя задачу $\hat{Q}_2(\hat{x}_{i_2}^{j+1}, \omega_{i_2 \Delta t}^j, \bar{\alpha}_{i_2}^j)$ мы попадаем в условия теоремы 3. В силу этих теорем, можно сделать вывод, что среди алгоритмов линейного замыкания $L(\hat{\mathcal{A}}_e)$ имеется оператор, переводящий пару $(\hat{x}_{i_1}^{j+1}, \omega_{i_2 \Delta t}^j)$ в информационный вектор $\bar{\alpha}_{i_1}^{j+1}$. ■

3.2.3. Выводы параграфа 3.2

На основании исследуемых в работе свойств автоматной функции распознающих автоматов, построенных в соответствии с данными нейрофизиологов для образной компоненты знака, можно сделать следующие выводы:

1. динамические характеристики образной компоненты описываются в терминах классической теории автоматов;
2. построенные автоматы могут быть представлены в виде операторов распознавания, которые можно изучать в рамках классических алгебраических теорий;
3. построенные операторы распознавания обладают свойством корректности относительно входных данных и требуемых результатов классификации, что означает существования такого процесса обучения, в рамках которого будут сформирована иерархия базовых элементов, корректно распознающая (классифицирующая) поступающие сигналы.

Алгоритм 1 Алгоритм \mathfrak{A}_{th} (часть I, задание начального состояния)

Вход: $\tau_s, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \omega_i^j$.

Выход: $\varphi_{i\Delta t}^j, \eta_{i\Delta t}^j$.

- 1: $\hat{F}^* = \emptyset, Z^* = \emptyset, t = 0;$ // активные функции распознавания и матрицы предсказания
 - 2: $c_1 \in (0, 1), c_2 \in (0, 1);$ // пороговые константы
 // определение начального состояния
 - 3: **для всех** компонент \hat{x}_{ik}^{j+1} вектора $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s) = (\hat{x}_{i1}^{j+1}, \hat{x}_{i2}^{j+1}, \dots, \hat{x}_{il}^{j+1})$
 - 4: **если** $\hat{x}_{ik}^{j+1} \geq c_1$ **то**
 - 5: $\hat{F}^* := \hat{F}^* \cup \{\hat{f}_k\};$
 - 6: $\bar{x}_i^j := \omega_i^j(\tau_s);$
 - 7: **для всех** функций распознавания $\hat{f}_k \in \hat{F}^*$
 - 8: **для всех** $Z_r^k \in Z_k$, соответствующих функции распознавания \hat{f}_k ,
 - 9: **если** $\frac{\|\bar{z}_1^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_1^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} < c_2$ **то**
 - 10: $Z^* := Z^* \cup \{Z_r^k\};$
 - 11: $\varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*;$ // значение функции переходов в начальный момент времени
 - 12: $\bar{N} := (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \dots, |\{Z_r^{l_i^j} | Z_r^{l_i^j} \in Z^*\}|);$
 - 13: $\eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N});$ // значение функции выходов в начальный момент времени
 - 14: $\hat{x}_i^j = W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_2^r);$
-

Алгоритм 2 Алгоритм \mathfrak{A}_{th} (часть II, основной цикл)

// основной цикл

15: $t = 1$;

16: **пока** $t \leq h_i^j - 1$

17: $\bar{x}_i^j := \omega(\tau_s + t)$;

18: **для всех** матриц предсказания Z_r^k из множества Z^*

19: **если** $\frac{\|\bar{z}_{t+1}^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_{t+1}^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} \geq c_2$ **то**

20: $Z^* := Z^* \setminus \{Z_r^k\}$;

21: $\varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*$; // значение функции переходов в момент времени t

22: $\bar{N} = (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \dots, |\{Z_r^{l_i^j} | Z_r^{l_i^j} \in Z^*\}|)$;

23: $\eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N})$; // значение функции выходов в момент времени t

24: $t = t + 1$;

25: **если** $t \leq h_i^j - 2$ **то**

26: $\hat{x}_i^j := W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_t^r)$;

вернуть $\varphi_{i\Delta t}^j, \eta_{i\Delta t}^j$.

3.3. Алгоритм формирования пары «образ — значение» нового знака

3.3.1. Общая схема образования знака

В соответствии с тем, что было сказано при описании синтаксического уровня модели картины мира в главе 2, до того, как происходит связывание компонент знака в единую структуру под одним именем, существуют лишь «парные» переходы между компонентами знания агента о том или ином явлении. До моментов именования эти компоненты образуют «протознак»:

- перцепт становится образом знака после выполнения процедуры именования,
- функциональное значение — значением знака,
- биологический смысл — личностным смыслом знака.

С введением этой структуры схема алгоритма формирования нового знака будет иметь следующий вид [8].

1. Формирование перцепта.
2. Порождение на основе прошлого опыта или на основе прецедентов — множества пар вида «перцепт — функциональное значение» — функционального значения объекта.
3. Получение субъектом из культурной среды, аккумулированной в системе естественного языка, пары «имя знака — значение» и оценка специальным механизмом степени близости функционального значения, построенного на стадии 1 к значению, полученному из культурной среды; в случае недостаточной близости — переход к стадии 1 и продолжение формирования перцепта.

4. Связывание имени из пары «имя знака — значение» с перцептом, построенным после завершения выполнения стадий 1–3; с этого момента перцепт превращается в образ.
5. Формирование личностных смыслов знака на основе прецедентов действий с предметом.
6. Связывание имени из пары «имя знака — значение» со сформированным личностным смыслом. С этого момента функциональное значение превращается в значение, а биологический смысл — в личностный смысл.
7. Продолжение отображения «биологический смысл — перцепт» включением в область определения отображения личностного смысла, полученного в предыдущем пункте, а в область значений отображения — образа из стадии 4.

Наиболее существенным моментом в приведённом алгоритме является итерационный процесс на стадиях 1–3. Данный параграф будет посвящён исследованию этого процесса.

3.3.2. Процедурные и объектные признаки

Введём семейство бинарных отношений $\{\sqsubset, \sqsubset^1, \sqsubset^2, \dots\}$, определённых на декартовом произведении $\mathcal{F} \times \mathcal{F}$. Будем считать, что признак f_1 поглощается признаком f_2 , $(f_1, f_2) \in \sqsubset$ или $f_1 \sqsubset f_2$, в том случае, если $f_1 \dashv R_1^j, f_2 \dashv R_2^{j+1}$, R_2^{j+1} — родительский R -автомат по отношению к R_1^j и в множестве матриц предсказания \mathcal{Z}_2 признака f_2 существует как минимум одна матрица Z_r^2 , содержащая некоторый столбец \bar{z}_u^r с элементом $z_{uv}^r \neq 0$, где v — индекс признака f_1 во входном векторе для распознающего автомата R_2^{j+1} (Рисунок 3.9).

Пара признаков $(f_1, f_2) \in \sqsubset^t$ или $f_1 \sqsubset^t f_2$, где $t \in \{1, 2, \dots\}$, в том случае, если $f_1 \dashv R_1^j, f_2 \dashv R_2^{j+1}$, R_2^{j+1} — родительский R -автомат по отношению к R_1^j и в множестве матриц предсказания \mathcal{Z}_2 признака f_2 существует как минимум одна

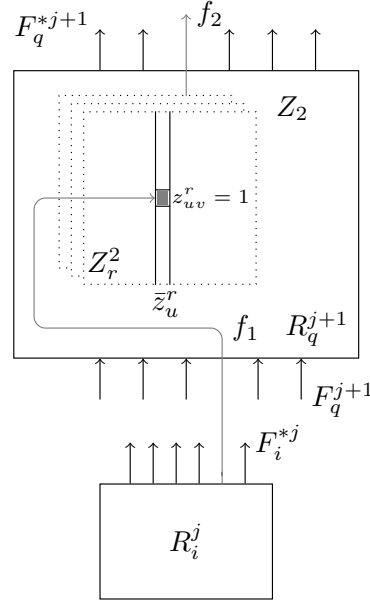


Рис. 3.9. Определение отношения поглощения на множестве признаков.

матрица Z_r^2 , содержащая t -ый столбец \bar{z}_t^r с элементом $z_{tv}^r \neq 0$, где v — индекс признака f_1 во входном векторе для распознающего автомата R_2^{j+1} .

Каждый элемент векторов—столбцов соотносится с признаком из входного множества признаков распознающего автомата, что означает задание индекса для каждого входного признака. Индекс признака $f_k \in F_i^j$ равен q , если ему соответствует q -ый элемент векторов—столбцов матриц предсказания распознающего автомата R_i^j .

Введём операцию Λ , которая по множеству матриц распознавания Z_k признака f_k определяет два набора индексов столбцов матриц из Z_k . Первый набор $I_c = \{i_1^c, i_2^c, \dots\}$, $\forall k$ $0 \leq i_k^c < h$, составляют индексы *столбцов условий*, в которых ненулевые элементы определяют условия проявления признака f_k . Вторым набор $I_e = \{i_1^e, i_2^e, \dots\}$, $\forall k$ $0 \leq i_k^e < h$, состоит из индексов *столбцов эффектов*, в которых ненулевые элементы определяют эффекты проявления признака f_k . Примером реализации процедуры Λ может служить алгоритм Норриса по поиску максимального прямоугольного подмножества в бинарном отношении [77].

Определение 8. Признаки, для матриц предсказания которых процедура Λ выдаёт не пустые множества индексов I_c и I_e , будем называть процедурными

признаками, остальные — объективными признаками.

Введение данного определения означает, что всё множество признаков делится на два подмножества: $\mathcal{F} = \mathcal{F}^{proc} \cup \mathcal{F}^{obj}$ и $\mathcal{F}^{proc} \cap \mathcal{F}^{obj} = \emptyset$.

Для любого процедурного признака выполняются следующие естественные условия:

- условие всегда предшествует эффекту,
- условие всегда влечёт за собой эффект и
- все условия всегда отделены от своих эффектов.

Иными словами, если f_1 — процедурный признак, то если столбец \bar{z}_u^r матрицы предсказания Z_r^1 является столбцом условий, т. е. $u \in I_c$, этот столбец не может одновременно являться столбцом эффектов, т. е. $u \notin I_e$, и существует такое $t > 0$, что столбец \bar{z}_{u+t}^r является столбцом эффектов, т. е. $u + t \in I_e$.

Пополним семейство отношений $\{\sqsubset, \sqsubset^1, \sqsubset^2, \dots\}$ двумя отношениями: \sqsubset^c и \sqsubset^e , принадлежность к которым пары признаков (f_1, f_2) свидетельствует о том, что признак f_1 присутствует соответственно в столбце условий и эффектов как минимум в одной матрице предсказания процедурного признака f_2 .

3.3.3. Определение компонент знака

При образовании нового знака s до того, как формируемая тройка компонент, называемая протознаком, получит имя, будем считать, что будущему знаку s соответствует некоторый признак $f \in \mathcal{F}$, обладающий перцептом, функциональным значением и биологическим смыслом, которые после завершения процесса формирования знака становятся, соответственно, образом, значением и личностным смыслом.

Определение 9. Если f_1 — признак, соответствующий знаку s_1 , то подмножество $\tilde{p}(f_1) \subseteq \mathcal{F}$ таких признаков, что $\forall f_i \in \tilde{p}(f_1) f_i \sqsubset f_1$, будем называть перцептом признака f_1 (образом знака s_1).

На множестве всех перцептов \tilde{P} введём величину $\rho_p(\tilde{p}(f_1), \tilde{p}(f_2))$, вычисляемую по следующему правилу:

- если f_1 и f_2 распознаются разными распознающими автоматами, т. е. $f_1 \dashv R_1^j, f_2 \dashv R_2^i$, то $\rho_p(\tilde{p}(f_1), \tilde{p}(f_2)) = \infty$,
- если f_1 и f_2 распознаются одним и тем же распознающим автоматами R_1^j со множеством входных признаков F_1^j мощности q и характерным временем h , то

$$\rho_p(\tilde{p}(f_1), \tilde{p}(f_2)) = \min_{\substack{Z_r^1 \in Z_1 \\ Z_s^2 \in Z_2}} \frac{1}{q \cdot h} \sum_{u=1}^h \|\tilde{z}_u^r - \tilde{z}_u^s\|. \quad (3.15)$$

Утверждение 9. *Величина ρ_p является метрикой на множестве перцептов \tilde{P} .*

Доказательство. Свойства тождества и симметрии очевидны вследствие свойств введённой нормы. Проверим неравенство треугольника. В том случае, когда признаки, распознаются разными автоматами — неравенство следует из свойств бесконечности. Во втором случае, в следствие того, что q и h являются константами, то неравенство следует из неравенства треугольника для введённой нормы. ■

Определение 10. *Если f_1 — признак, соответствующий знаку s_1 , f_2 — процедурный признак, $f_1 \sqsubset^c f_2$, то будем называть f_2 элементом функционального значения признака f_1 (элементом значения знака s_1). Множество всех элементов функционального значения признака f_1 будем обозначать $\tilde{m}(f_1)$.*

На множестве всех функциональных значений \tilde{M} введём величину $\rho_m(\tilde{m}(f_1), \tilde{m}(f_2))$, вычисляемую по следующему правилу:

$$\rho_m(\tilde{m}_1(f_1), \tilde{m}_2(f_2)) = \min_{\substack{f_i \in \tilde{m}(f_1) \\ f_j \in \tilde{m}(f_2)}} \rho_p(\tilde{p}(f_i), \tilde{p}(f_j)). \quad (3.16)$$

Утверждение 10. *Величина ρ_m является метрикой на множестве функциональных значений \tilde{M} .*

Доказательство. Очевидно вследствие того, что функция ρ_r является метрикой, а функция минимума не меняет свойств метрики. ■

3.3.4. Семантический уровень обобщения

На основе описанной модели компонент знака становится возможным описать процедуры обобщения (см. первую часть работы) на модельном, семантическом уровне. Для этого будем считать, что матрицы предсказания распознающих автоматов были сформированы в процессе обучения (например, с использованием алгоритма НТМ [35] или THSOM [78]). При рассмотрении множества матриц предсказания \mathcal{Z} некоторого распознающего автомата возникают следующие три основных случая:

- *Внутреннее обобщение.* Будем называть схожими, такие матрицы из подмножества $Z'_k = \{Z_1^k, Z_2^k, \dots, Z_m^k\}$ множества матриц предсказания Z_k некоторого признака f_k , для которых при $\forall i, j, l$ таких, что $Z_i, Z_j \in Z'_k, l \in \{0, \dots, h\}$ выполняется $\text{card}(z_l^i \wedge z_l^j) < c_3$, где c_3 — некоторая константа. Обобщение в этом случае заключается в замене подмножества схожих матриц Z'_k одной обобщённой $Z^* = (\bigwedge_{Z_q \in Z'_k} \bar{z}_1^q, \bigwedge_{Z_q \in Z'_k} \bar{z}_2^q, \dots, \bigwedge_{Z_q \in Z'_k} \bar{z}_h^q)$. Таким образом, осуществляется кластеризация множества матриц предсказания признака f_k , контролируемая одним параметром близости c_3 .
- *Конкретизация.* В тех случаях, когда получаемые с использованием описанной выше меры близости кластеры матриц предсказания признака f_k расходятся достаточно сильно, образуются новые конкретизированные признаки для каждого кластера и соответственно расширяется множество выходных признаков F^* распознающего автомата.
- *Внешнее обобщение.* В том случае когда во всех матрицах предсказания R -автоматов, являющихся родительскими по отношению к распознающему автомату R , i -ые и j -ые компоненты всех столбцов матриц принимают

одинаковые значения, выходные признаки $f_i, f_j \in F^*$, соответствующие этим компонентам, обобщаются в один признак с объединённым множеством матриц предсказания. При этом возможно и дальнейшее внутреннее обобщение.

Отдельно необходимо рассмотреть случай *абстрагирования*, когда несколько выходных признаков одного или нескольких распознающих автоматов в результате работы процедуры обобщения на синтаксическом уровне (см. первую часть работы) формируют новый признак f^* в некотором R -автомате R^* , лежащем на следующем уровне иерархии. В этом случае матрица предсказания будет состоять из единственного столбца с ненулевыми элементами, которые соответствуют признакам, составляющим данную категорию.

И, наконец, ещё один случай обобщения на семантическом уровне заключается в образовании ролевой структуры процедурных признаков. Рассмотрим случай, когда столбцы условий или эффектов некоторых матриц предсказания процедурного признака f_p различаются только в двух компонентах, т. е. i -ая компонента в некоторых столбцах равна 1, а в других — 0, а j -ая компонента наоборот — в первых равна 0, а во вторых — 1. Если соответствующие этим компонентам признаки в результате абстрагирования попали в некоторую общую категорию f_{cat} , то к множеству матриц предсказания признака f_p добавляется матрица с новой компонентой, соответствующей признаку f_{cat} и обнулёнными компонентами i и j . Данная процедура легко распространяется на случай, когда количество элементов категории f_{cat} в матрицах предсказания признака f_p больше двух. Таким образом, для процедурного признака f_p появляется обобщённая, ролевая матрица предсказания.

3.3.5. Свойства на множестве признаков

В целях дальнейшего изложения рассмотрим подробнее строение матрицы предсказания процедурного признака. Матрицу предсказания Z_r^p процедурного

признака f_p всегда можно представить в следующем виде:

$$Z_r^p = (\bar{z}_1^{r,c}, \dots, \bar{z}_{j_1}^{r,c}, \bar{z}_{j_1+1}^{r,e}, \dots, \bar{z}_{i_1}^{r,e}, \dots, \dots, \bar{z}_{i_{k-1}+1}^{r,c}, \dots, \bar{z}_{j_k}^{r,c}, \bar{z}_{j_k+1}^{r,e}, \dots, \bar{z}_{i_k}^{r,e}), \quad (3.17)$$

где $\bar{z}_j^{r,c}$ — столбцы причин, $\bar{z}_i^{r,e}$ — столбцы следствий.

Величину k будем называть *сложностью* процедурного признака. В дальнейшем будем рассматривать простые матрицы предсказаний k -сложного процедурного признака:

$$Z_r^p = (\bar{z}_1^{r,c}, \bar{z}_2^{r,e}, \dots, \dots, \bar{z}_{2 \cdot k - 1}^{r,c}, \bar{z}_{2 \cdot k}^{r,e}). \quad (3.18)$$

Краткая форма k -сложного процедурного признака f_p имеет матрицу предсказания, в которой оставлены только первый столбец условий и последний столбец эффектов.

Любой односложный, или элементарный, процедурный признак f_p , распознаваемый автоматом R_i^j , можно представить в виде правила $r_p = (F_C(f_p), F_A(f_p), F_D(f_p))$, в котором:

- $F_C(f_p) \subseteq F_i^j$ — множество признаков — условий правила: $\forall f \in F_C(f_p) f \sqsubset^c f_p$;
- $F_A(f_p) \subseteq F_i^j$ — множество добавляемых правилом признаков: $\forall f \in F_A(f_p) f \sqsubset^e f_p, f \not\sqsubset^c f_p$;
- $F_D(f_p) \subseteq F_i^j$ — множество удаляемых правилом признаков: $\forall f \in F_D(f_p) f \not\sqsubset^e f_p, f \sqsubset^c f_p$.

Очевидно, выполняются следующие соотношения: $F_A(f_p) \cap F_D(f_p) = \emptyset, F_A(f_p) \cap F_C(f_p) = \emptyset, F_D(f_p) \subseteq F_C(f_p)$.

Определение 11. Процедурный признак $f_p^1 \dashv R_i^j$ с матрицей предсказания $Z = (\bar{z}_1^c, \bar{z}_2^e)$ выполняется на векторе \bar{z} длины q , где q — длина входного вектора R -автомата R_i^j , если $\bar{z} \cdot \bar{z}_1^c = \bar{z}_1^c$.

Здесь под операцией « \cdot » подразумевается покомпонентное умножение битовых векторов. Если в качестве вектора \bar{z} в определении (11) взять столбец условий некоторого признака f_p^2 , то будем говорить, что процедурный признак f_p^1 выполним в условиях процедурного признака f_p^2 , если

- оба признака распознаются одним и тем же распознающим автоматом R_i^j и признак f_p^1 выполняется на столбце условий матрицы предсказания признака f_p^2 ,
- $f_p^1 \dashv R_i^{j_1}, f_p^2 \dashv R_k^{j_2}, i \neq k, F_C(f_p^1) \subseteq F_C(f_p^2)$ и признак f_p^1 выполняется на столбце условий матрицы предсказания признака f_p^2 .

Определение 12. Будем говорить, что два процедурных признака f_p^1 и f_p^2 конфликтуют, если выполнено как минимум одно из следующих условий:

- $F_D(f_p^1) \cap F_A(f_p^2) \neq \emptyset$,
- $F_D(f_p^2) \cap F_A(f_p^1) \neq \emptyset$,
- $F_D(f_p^1) \cap F_C(f_p^2) \neq \emptyset$,
- $F_D(f_p^2) \cap F_C(f_p^1) \neq \emptyset$.

Определение 13. Результатом операции приведения вектор—столбца \bar{z} матрицы распознавания R -автомата $R_{i_1}^{j_1}$ к R -автомату $R_{i_2}^{j_2}$ будем называть такой вектор \bar{z}' длины $q_{i_2}^{j_2}$, k -ый элемент которого $z'_k = 1$, если признак $f \in F_{i_1}^{j_1}$ с индексом k равен признаку $f' \in F_{i_2}^{j_2}$ с тем же индексом и $z_k = 1$, иначе $z'_k = 0$, и обозначать его $(\bar{z} \rightarrow R_{i_2}^{j_2}) = \bar{z}'$.

Определение 14. Результатом операции приведения вектор—столбца \bar{z} матрицы распознавания R -автомата $R_{i_1}^{j_1}$ к R -автомату $R_{i_2}^{j_2}$ по столбцу \bar{z}' матрицы распознавания из множества $\mathcal{Z}_{i_2}^{j_2}$ будем называть такой вектор \bar{z}'' длины $q_{i_2}^{j_2}$, элемент которого $z''_k = 1$, если признак $f \in F_{i_1}^{j_1}$ с индексом k равен признаку $f' \in F_{i_2}^{j_2}$ с тем же индексом, $z'_k = 1$ и $z_k = 1$, иначе $z''_k = 0$, и обозначать $(\bar{z} \xrightarrow{\bar{z}'} R_{i_2}^{j_2}) = \bar{z}''$.

3.3.6. Опыт наблюдения и алгоритм \mathfrak{A}_{pt}

Будем считать, что у субъекта имеется опыт наблюдения, который выражается в виде отношения $\Psi_p^m : \Psi_p^m(\tilde{p}) = \tilde{m}$, в том случае, если $\tilde{p} \in \tilde{P}$ является перцептом некоторого признака f , а $\tilde{m} \in \tilde{M}$ — функциональным значением того же признака f .

На странице 89 и 90 представлен алгоритм доопределения функции Ψ_p^m , который и представляет собой суть итерационного процесса во время образования знака согласно алгоритму на странице 79. Доопределение проводится на новую пару (\tilde{p}, \tilde{m}) , где функциональное значение \tilde{m} строится в сравнении с эталоном \tilde{m}^0 , а перцепт \tilde{p} формируется на основе множества признаков, входящих в область текущую определения $\hat{F} = \text{dom } \Psi_p^m$. Доопределение функции Ψ_p^m означает формирование нового признака f^* , т. е. его первой матрицы предсказания Z^* в рамках распознающего автомата R^* .

Для обоснования данного алгоритма необходимо доказать сходимость функциональных значений, которые строятся в процессе его выполнения, к эталонному значению \tilde{m}^0 .

3.3.7. Корректность алгоритма \mathfrak{A}_{pt}

Теорема 5 (о корректности алгоритма \mathfrak{A}_{pt}). *Алгоритм \mathfrak{A}_{pt} корректен, т. е. элементы последовательности функциональных значений $\langle \tilde{m}^{(0)}, \tilde{m}^{(1)}, \dots, \tilde{m}^{(t)} \rangle$, которая строится с помощью алгоритма \mathfrak{A}_{pt} для функционального значения \tilde{m}^0 , приближаются к \tilde{m}^0 в смысле метрики (3.16).*

Доказательство. Рассмотрим два элемента последовательности $\tilde{m}^{(t)} = \{f_p^{(t)}\}$ и $\tilde{m}^{(t+1)} = \{f_p^{(t+1)}\}$. Соответствующие матрицы предсказания будут иметь следующий вид:

$$Z_p^{(t)} = \{\bar{z}_1^{c(t)}, \bar{z}_2^{e(t)}\}, \quad Z_p^{(t+1)} = \{\bar{z}_1^{c(t+1)}, \bar{z}_2^{e(t+1)}\}. \quad (3.19)$$

Если на шаге 9 алгоритма \mathfrak{A}_{pt} на $(t+1)$ -й итерации не был найден подходящий признак, то матрицы $Z_p^{(t)}$ и $Z_p^{(t+1)}$ равны. Рассмотрим случай, когда был найден

Алгоритм 3 Алгоритм \mathfrak{A}_{pm} (часть I)

Вход: $\tilde{m}^0 = \{f_p^0\}$, Ψ_p^m , $\hat{F} = \text{dom } \Psi_p^m \subseteq \mathcal{F}$;

1: $Z_p^0 := \{\bar{z}_1^{c0}, \bar{z}_2^{e0}\}$ — матрица предсказания признака f_p^0 ;

2: $\tilde{p}^{(0)} := \emptyset$, $\tilde{m}^{(0)} := \emptyset$;

3: $R_0 \notin \mathcal{R}$ — фиктивный распознающий блок, для которого $F_0^* = \{f_p^0\}$;

4: $Z^{(0)} := \emptyset$, $Z_p^{(0)} := \{\bar{0}, \bar{0}\}$;

5: $q^{(0)} := 0$, $t := 0$;

6: **пока** $Z_p^{(t)} \neq Z_p$ или $t < |\hat{F}|$

7: $f \in \hat{F}$ — первый не рассмотренный ранее признак;

8: $Z = \{\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_q\}$ — его матрица предсказания;

9: **если** $\exists \tilde{m} = \{f_p\} \in \tilde{M}$ такое, что $(\tilde{p}(f), \tilde{m}) \in \Psi_p^m$, f_p выполним в условиях признака f_p^0 и $\nexists f'$ такого, что $f' \in \tilde{p}^{(t)}$, $\tilde{m}' = \{f'_p\} \in \tilde{M}$, $(\tilde{p}(f'), \tilde{m}') \in \Psi_p^m$, f'_p конфликтует с f_p **то**

10: $\tilde{p}^{(t+1)} = \tilde{p}^{(t)} \cup \{f\}$;

11: $Z_p = \{\bar{z}_1^c, \bar{z}_2^e\}$ — матрица предсказания признака f_p ;

12: **если** $\exists R_i^j$ такой, что $\tilde{p}^{(t+1)} \subseteq F_i^j$ **то**

13: $R_i^{j(t+1)} := R_i^j$;

14: **иначе**

15: $R_i^{j(t+1)} := \arg \max_{\mathcal{R}} (F_i^j \cap \tilde{p}^{(t+1)})$;

16: $F_i^{j(t+1)} := F_i^{j(t)} \cup \tilde{p}^{(t+1)}$;

подходящий признак f' с функциональным значением $\tilde{m}' = \{f'_p\}$ с соответствующей матрицей предсказания $Z' = (\bar{z}_1^{c'}, \bar{z}_2^{e'})$.

В том случае, если на шаге 9 был найден признак f'_p то матрицы $Z_p^{(t)}$ и $Z_p^{(t+1)}$ будут отличаться в своих двух столбцах:

$$\bar{z}_1^{c(t+1)} = \bar{z}_1^{c(t)} \vee (\bar{z}_1^{c'} \rightarrow R_0), \quad \bar{z}_2^{e(t+1)} = \bar{z}_2^{e(t)} \vee (\bar{z}_2^{e'} \xrightarrow{\bar{z}_2^{e0}} R_0). \quad (3.20)$$

По определению расстояние между функциональными значениями $\tilde{m}^{(t)}$ и \tilde{m}^0

Алгоритм 4 Алгоритм \mathfrak{A}_{pm} (часть II)

- 17: $q^{(t+1)} = \max\{q^{(t)}, q\};$
- 18: $Z^{(t+1)} := \{\bar{z}_1^{(t+1)}, \bar{z}_2^{(t+1)}, \dots, \bar{z}_{q^{(t+1)}}^{(t+1)}\}$, где $\bar{z}_i^{(t+1)} = \bar{z}_i^{(t)} \vee \bar{z}_i$, если $i \leq q$ и $i \leq q^{(t)}$, $\bar{z}_i^{(t+1)} = \bar{z}_i^{(t)}$, если $i > q$ и $\bar{z}_i^{(t+1)} = \bar{z}_i$, если $i > q^{(t)}$;
- 19: $Z_p^{(t+1)} := \{\bar{z}_1^{c(t+1)}, \bar{z}_2^{e(t+1)}\}$, где $\bar{z}_1^{c(t+1)} = \bar{z}_1^{c(t)} \vee (\bar{z}_1^c \rightarrow R_0)$, $\bar{z}_2^{e(t+1)} = \bar{z}_2^{e(t)} \vee (\bar{z}_2^e \xrightarrow{\bar{z}_2^{e0}} R_0)$;
- 20: $f_p^{(t+1)}$ — признак с матрицей предсказания $Z_p^{(t+1)}$;
- 21: $\tilde{m}^{(t+1)} = \{f_p^{(t+1)}\};$
- 22: $t = t + 1;$
- 23: $R^* = R_i^{j(t)};$
- 24: $Z^* = Z^{(t)};$
- 25: $\mathcal{Z}^* = \mathcal{Z}_i^{j(t)} \cup \{Z^*\};$

вернуть Ψ_p^m , доопределённую на паре (\tilde{p}, \tilde{m}) , где $\tilde{p} = \tilde{p}^{(t)}$, $\tilde{m} = \tilde{m}^{(t)}$.

примет следующее значение:

$$\begin{aligned} \rho_m(\tilde{m}^{(t)}, \tilde{m}^0) &= \min_{\substack{f_i \in \tilde{m}^{(t)} \\ f_j \in \tilde{m}^0}} \rho_p(\tilde{p}(f_i), \tilde{p}(f_j)) = \rho_p(\tilde{p}(f'_p), \tilde{p}(f_p)) = \\ &= \frac{1}{q \cdot h} \sum_{\substack{\bar{z}_u^{1(t)} \in Z_p^{(t)} \\ \bar{z}_u^2 \in Z_p^0}} \|\bar{z}_u^{1(t)} - \bar{z}_u^2\|. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Аналогично для $\tilde{m}^{(t+1)}$:

$$\rho_m(\tilde{m}^{(t+1)}, \tilde{m}^0) = \frac{1}{q \cdot h} \sum_{\substack{\bar{z}_u^{1(t+1)} \in Z_p^{(t+1)} \\ \bar{z}_u^2 \in Z_p^0}} \|\bar{z}_u^{1(t+1)} - \bar{z}_u^2\|. \quad (3.22)$$

Рассмотрим разность

$$\begin{aligned} \rho_m(\tilde{m}^{(t)}, \tilde{m}^0) - \rho_m(\tilde{m}^{(t+1)}, \tilde{m}^0) &= \frac{1}{q \cdot h} (\|\bar{z}_1^{c(t)} - \bar{z}_1^{c0}\| + \|\bar{z}_2^{e(t)} - \bar{z}_2^{e0}\| - \\ &- \|\bar{z}_1^{c(t+1)} - \bar{z}_1^{c0}\| - \|\bar{z}_2^{e(t+1)} - \bar{z}_2^{e0}\|) = \frac{1}{q \cdot h} (\|\bar{z}_1^{c(t)} - \bar{z}_1^{c0}\| + \\ &+ \|\bar{z}_2^{e(t)} - \bar{z}_2^{e0}\| - \|\bar{z}_1^{c(t)} \vee (\bar{z}_1^{c'} \rightarrow R_0) - \bar{z}_1^{c0}\| - \\ &- \|\bar{z}_2^{e(t)} \vee (\bar{z}_2^{e'} \xrightarrow{\bar{z}_2^{e0}} R_0) - \bar{z}_2^{e0}\|), \end{aligned} \quad (3.23)$$

где $\bar{z}_1^{c0}, \bar{z}_2^{e0}$ — столбцы матрицы предсказания процедурного признака f_p^0 , соответствующего функциональному значению \tilde{m}^0 .

Так как f'_p выполним на первом столбце матрицы предсказания признака f_p^0 , то после применении операции приведения $\bar{z}_1^{lc} \rightarrow R_0$ в результирующем векторе единицы появляются только на тех же местах что и в векторе \bar{z}_1^{c0} . Это означает, что в векторе $\bar{z}_1^{c(t)} \vee (\bar{z}_1^{lc} \rightarrow R_0) - \bar{z}_1^{c0}$ по сравнению с вектором $\bar{z}_1^{c(t)}$ единицы находятся только в тех же местах, что и в векторе \bar{z}_1^{c0} , а новых нулей не появляется. В следствие чего разность $\|\bar{z}_1^{c(t)} - \bar{z}_1^{c0}\| - \|\bar{z}_1^{c(t)} \vee (\bar{z}_1^{lc} \rightarrow R_0) - \bar{z}_1^{c0}\|$ всегда больше либо равна нулю.

Так как для столбцов эффектов применяется операция приведения по столбцу, то единицы в результирующем векторе остаются только на тех местах, на которых одновременно находятся единицы в приводимом векторе и векторе, по которому осуществляется приведение. В связи с этим разность $\|\bar{z}_2^{e(t)} - \bar{z}_2^{e0}\| - \|\bar{z}_2^{e(t)} \vee (\bar{z}_2^{lc} \xrightarrow{\bar{z}_2^{e0}} R_0) - \bar{z}_2^{e0}\|$ также больше либо равна нулю.

Так как обе разности в скобках выражения для $\rho_m(\tilde{m}^{(t)}, \tilde{m}^0) - \rho_m(\tilde{m}^{(t+1)}, \tilde{m}^0)$ больше либо равны нулю, то отсюда следует, что функциональное значение $\tilde{m}^{(t+1)}$ ближе или по крайней мере находится на том расстоянии от \tilde{m}^0 , чем к \tilde{m}^t . В виду произвольности выбора итерации t , это приводит к тому, что элементы всей последовательности $\langle \tilde{m}^{(0)}, \tilde{m}^{(1)}, \dots \rangle$ приближаются к \tilde{m}^0 в смысле использованной метрики (3.16). ■

Заключение

В работе были получены следующие основные результаты.

1. Построена модель компонент знака — элемента картины мира субъекта деятельности в рамках сегодняшних представлений о функционировании мозга и психики человека.
2. Построены четыре типа операторов распознавания (два статических оператора, динамический и иерархический операторы) в терминах алгебраической теории для образной компоненты знака.
3. Доказаны теоремы корректности линейных замыканий множеств построенных в работе операторов распознавания (статических, динамического и иерархического).
4. Построен алгоритм формирования и связывания двух компонент знака: образа и значения.
5. Исследована сходимость итерационного алгоритма формирования и связывания двух компонент знака.

Список литературы

1. BICA Society. BICA 2014. — 2014. — URL: <http://bicasociety.org/meetings/2014/> (дата обращения: 01.02.2015).
2. Elsevier. Biologically Inspired Cognitive Architectures - Journal. — 2015. — URL: <http://www.journals.elsevier.com/biologically-inspired-cognitive-architectures/> (дата обращения: 01.02.2015).
3. Моделирование поведения, управляемого сознанием / Ю. М. Кузнецова, Г. С. Осипов, А.И. Панов и др. // Системный анализ и информационные технологии: тр. Четвертой Междунар. конф. (Абзаково, Россия, 17–23 авг. 2011 г.): в 2т. — Т. 1. — Челябинск : Изд-во Челяб. Гос. ун-та, 2011. — С. 6–13.
4. Панов А. И. Моделирование процесса принятия решения агентом со знаковой картиной мира // Теория и практика системного анализа: Труды II Всероссийской научной конференции молодых учёных с международным участием. — Т. 1. — Рыбинск : РГАТУ имени П.А. Соловьёва, 2012. — С. 126–137.
5. Панов А. И. Семейства отношений в знаковой картине мира // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ–2012 (16–20 октября 2012г., г. Белгород, Россия): Труды конференции. — Белгород : Издательство БГТУ, 2012. — С. 301–309.
6. Петров А. В., Панов А. И. Моделирование поведения автономного мобильного робота // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. — 2012. — № 2. — С. 179–185.
7. Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами / Д. В. Зубарев, Д. А. Макаров, А. И. Панов, К. С. Яковлев // Авиакосмическое приборостроение. — 2013. — № 4. — С. 10–28.
8. Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В. Управление поведением как функ-

- ция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2014. — № 4. — С. 83–96.
9. Панов А. И., Чудова Н. В. Моделирование процесса образования естественных понятий методами искусственного интеллекта // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: В 2 т. Томск, 22-26 июня 2010 г. — Т. 2. — Томск : Томский государственный университет, 2010. — С. 455.
 10. Элементы знакового опосредования в интеллектуальном агенте / Ю. М. Кузнецова, А.И. Панов, А. В. Петров, Н. В. Чудова // V съезд Общероссийской общественной организации «Российское психологическое общество». Материалы участников съезда. — Т. 1. — М. : Российское психологическое общество, 2012. — С. 490–491.
 11. Панов А. И., Петров А. В. Моделирование потребностей и мотивов интеллектуального агента со знаковой картиной мира // Пятая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: Калининград, 18-24 июня 2012 г. — Калининград : Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований (МАКИ), 2012. — С. 813–815.
 12. Петров А. В., Панов А. И., Березовский Р. Г. Когнитивные архитектуры и проекты систем управления автономных мобильных роботов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. — 2013. — № 1. — С. 111–113.
 13. Панов А. И., Петров А. В. Аналитическое и целостное представление образов интеллектуальным агентом со знаковой картиной мира // Шестая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: Калининград, 23-27 июня 2014 г. — Калининград : Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований (МАКИ), 2014. — С. 466–468.
 14. Osipov G., Panov A., Chudova N. Semiotic foundations of consciousness functions // Book of Abstracts. The First Conference of the International Association for Cognitive Semiotics (IACS-2014). September 25-27, 2014. — Lund :

- Lund University, 2014. — P. 211.
15. Панов А. И. Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. — 2014. — № 7. — С. 863–874.
 16. Панов А. И. Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия динамических сцен // Интеллектуализация обработки информации: 10-я международная конференция. Греция, о. Крит, 4–11 октября 2014 г.: Тезисы докладов. — М. : Торус Пресс, 2014. — С. 132–133.
 17. Выготский Л. С. Психология развития человека. — М. : Издательство Смысл, 2005. — С. 1136.
 18. Зинченко П. И. Вопросы психологии памяти // Психологическая наука в СССР в 2-х тт. Т. 1. — М. : Изд-во АПН РСФСР, 1959.
 19. Лурия А. Р. Мозг и психические процессы. Т. 1. — М. : Педагогика, 1963.
 20. Лурия А. Р. Мозг и психические процессы. Т. 2. — М. : Педагогика, 1970.
 21. Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность. — М. : Политиздат, 1975.
 22. Артемьева Е. Ю. Психология субъективной семантики. — М. : Издательство МГУ, 1980.
 23. World Views: From fragmentation to integration / D. Aerts, S. Hellemans, L. Apostel et al. — Brussels : VUB Brussels University Press, 1994.
 24. Vidal C. Metaphilosophical Criteria for Worldview Comparison // Metaphilosophy. — 2012. — Vol. 43, no. 3. — P. 306–347.
 25. Koltko-Rivera M. E. The Psychology of Worldviews // Review of General Psychology. — 2004. — Vol. 8, no. 1. — P. 3–58.
 26. National Institutes of Health. Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN). — 2014. — URL: <http://www.nih.gov/science/brain> (дата обращения: 15.09.2014).
 27. European Commission. Human Brain Project. — 2014. — URL: <https://www.humanbrainproject.eu> (дата обращения: 15.09.2014).

28. Borji A., Itti L. State-of-the-Art in Visual Attention Modeling // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2013. — Vol. 35, no. 1. — P. 185–207.
29. Иваницкий А. М. Мозговая основа субъективных переживаний: гипотеза информационного синтеза // Журнал высшей нервной деятельности. — 1996. — Т. 46, № 2. — С. 241–282.
30. Ivanitsky A. M. Brain basis of subjective experience: information synthesis hypothesis // Neuroscience and Behavioral Physiology. — 1996. — Vol. 46, no. 2. — P. 251–252.
31. Эделмен Дж., Маунткасл В. Разумный мозг. — М. : Мир, 1981.
32. Baars B. J. Global workspace theory of consciousness: toward a cognitive neuroscience of human experience // Progress in Brain Research. — 2005. — Vol. 150. — P. 45–53.
33. Dehaene S., Sergent C., Changeux J. P. A neuronal network model linking subjective reports and objective physiological data during conscious perception // Proceedings of National Academy of Sciences USA. — 2003. — Vol. 100, no. 14. — P. 8520–8525.
34. Соколов Е. Н. Нейроны сознания // Психология. Журнал Высшей школы экономики. — 2004. — Т. 1, № 2. — С. 3–15.
35. George D., Hawkins J. Towards a Mathematical Theory of Cortical Microcircuits // PLoS Computational Biology. — 2009. — Vol. 5, no. 10. — P. 1–26.
36. Болотова Ю. А., Спицын В. Г., Фомин А. Э. Применение иерархической временной памяти в распознавании изображений // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Т. 318, № 5. — С. 60–63.
37. Numenta. Applications. — 2014. — URL: <https://www.numenta.com/> (дата обращения: 15.09.2014).
38. Sergin A. V., Sergin V. Ya. Model of perception: The hierarchy of inclusive sensory characteristics and top-down cascade transfer of excitation // Neural Network World. — 2008. — Vol. 18, no. 3. — P. 227–244.

39. Сергин В. Я. Психофизиологические механизмы восприятия: концепция объемлющих сенсорных характеристик // Успехи физиологических наук. — 2009. — Т. 40, № 4. — С. 42–63.
40. Сергин В. Я. Сознание и мышление: нейробиологические механизмы // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». — 2011. — № 2. — С. 7–34.
41. Вартанов А. В. Механизмы семантики: человек — нейрон — модель // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2011. — № 12. — С. 54–64.
42. Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Часть II: понятие «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга / О. Д. Чернавская, Д. С. Чернавский, В. П. Карп и др. // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2012. — № 2. — С. 46–65.
43. Baars B. J. A cognitive theory of consciousness. — New York : Cambridge University Press., 1988.
44. Franklin S., Graesser A. A software agent model of consciousness // Conscious Cognition. — 1999. — no. 8. — P. 285–301.
45. Chun M. M., Potter M. C. A two-stage model for multiple target detection in rapid serial visual presentation // Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. — 1995. — no. 21. — P. 109–127.
46. Lamme V. A., Roelfsema P. R. The distinct modes of vision offered by feed-forward and recurrent processing // Trends Neuroscience. — 2000. — Vol. 11, no. 23. — P. 571–579.
47. Felleman D. J., van Essen D. C. Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex // Cerebral Cortex. — 1991. — Vol. 1, no. 1. — P. 1–47.
48. The neuronal basis for consciousness / R. Llinas, U. Ribary, D. Contreras, C. Pedroarena // Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological sciences. — 1998. — no. 353. — P. 1841–1849.

49. Raymond J. E., Shapiro K. L. Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: an attentional blink? // Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. — 1992. — no. 18. — P. 849–860.
50. George D., Hawkins J. A hierarchical Bayesian model of invariant pattern recognition in the visual cortex // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. — Vol. 3. — 2005. — P. 1812–1817.
51. Osipov G. S. Semiotic Modeling: An Overview // Proceedings of Workshop on Russian Situation Control and Cybernetic/Semiotic Modeling. — Columbus, USA : Battelle, 1995. — P. 51–72.
52. Поспелов Д. А. Прикладная семиотика и искусственный интеллект // Программные продукты и системы. — 1996. — № 3. — С. 10–13.
53. Эрлих А. И. Прикладная семиотика и управление сложными объектами // Программные продукты и системы. — 1997. — № 3.
54. Осипов Г. С., Поспелов Д. А. Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. — 1999. — № 1. — С. 9–35.
55. Osipov G. S. Origines of Applied Semiotics // Proceedings of the Workshop “Applied Semiotics: Control Problems (ASC 2000)”. 14th European Conference of Artificial Intelligence (ECAI2000). — Berlin : IOS Press, 2000. — P. 1–4.
56. Осипов Г. С. От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта. — 2002. — № 6. — С. 3–7.
57. Поспелов Д. А., Осипов Г. С. Введение в прикладную семиотику. Глава 5. Операции в семиотических базах знаний // Новости искусственного интеллекта. — 2002. — № 6. — С. 28–35.
58. Поспелов Д. А. Семиотические модели: успехи и перспективы // Кибернетика. — 1976. — № 6. — С. 114–123.
59. Фреге Г. Логика и логическая семантика. — М. : Аспект Пресс, 2000.
60. Пирс Ч. С. Начала прагматизма. Т. 2. Логические основания теории знаков. — СПб. : Алетейя, 2000.

61. Дулин С. К. Введение в теорию структурной согласованности. — М. : Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2005. — С. 136.
62. Чудова Н. В. Концептуальное описание картины мира для задачи моделирования поведения, основанного на сознании // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 2. — С. 51–62.
63. Чудова Н. В. Переработка опыта как функция образа мира // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2014. — № 3. — С. 40–45.
64. Леонтьев А. Н. Избранные психологические произведения. Том II. — М. : Педагогика, 1983. — С. 251–261.
65. Фестинег Л. Теория когнитивного диссонанса. — СПб. : Ювента, 1999.
66. Осипов Г. С. Построение моделей предметных областей. Ч. I. Неоднородные семантические сети // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1990. — № 5. — С. 32–45.
67. Осипов Г. С., Лебедева Т. Г. Архитектура и управляемость дискретных динамических систем, основанных на знаниях // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2000. — № 5. — С. 703–709.
68. Kelly G. A. The psychology of personal constructs. V. I. A theory of personality. — London : Routledge, 1991.
69. Schank R. C. Conceptual dependency: A theory of natural language understanding // Cognitive Psychology. — 1972. — Vol. 3, no. 4. — P. 552–631.
70. Triesman A. M., Gelade G. A Feature Integration Theory of Attention // Cognitive Psychology. — 1980. — Vol. 12. — P. 97–136.
71. Rensink R. The dynamic representation of scenes // Visual Cognition. — 2000. — no. 7. — P. 17–42.
72. Величковский Б. М. Когнитивная наука: основы психологии познания. Т. 1. — М. : Смысл, 2006.
73. Кудрявцев В. Б., Алешин С. В., Подколзин А. С. Введение в теорию автоматов. — М. : Наука, 1985. — С. 320.
74. Вапник В. Н., Червоненкис А. Я. Теория распознавания образов. — М. :

- Наука, 1974.
75. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. — М. : Мир, 1971.
 76. Журавлев Ю. И. Корректные алгебры над множеством некорректных (эвристических) алгоритмов. Часть I // Кибернетика. — 1977. — № 4. — С. 5–17.
 77. Norris Eugene M. Maximal Rectangular Relations // Fundamentals of Computation Theory / Ed. by Marek Karpinski. — Berlin : Springer, 1977. — P. 476–481.
 78. Koutnik J., Snorek M. Temporal Hebbian Self-Organizing Map for Sequences // Artificial Neural Networks - ICANN 2008. — Berlin : Springer, 2008. — P. 632–641.
 79. Осипов Г. С., Виноградов А. Н., Жилякова Л. Ю. Динамические интеллектуальные системы. Ч. I. Представление знаний и основные алгоритмы // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2002. — № 6. — С. 119–127.
 80. Осипов Г. С., Виноградов А. Н., Жилякова Л. Ю. Динамические интеллектуальные системы. Ч. II. Моделирование целенаправленного поведения // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2003. — № 1. — С. 87–94.
 81. Осипов Г. С. Динамические интеллектуальные системы // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2008. — № 1. — С. 47–54.

Список иллюстративного материала

1.1	Структура деятельности по Леонтьеву.	12
1.2	Круг ощущений по А. М. Иваницкому (источник [29]).	17
1.3	Реализация теорий глобального рабочего пространства в работе Дехане ([33]).	20
1.4	Порождающая модель ИВП. Приведена простая двухуровневая порождающая модель ИВП, состоящая из трёх узлов ([35]). . . .	24
1.5	Структура узла ИВП, входные и выходные данные узла ([35]). . .	26
1.6	Треугольник Фреге.	30
1.7	Квадрат Пospelова.	32
2.1	Знак и его структура.	39
2.2	Процедуры связывания компонент знака и функция именования.	43
2.3	Пример обобщения по признакам. В результате работы операции обобщения Θ пары знаков s_1 и s_2 , принадлежащих отношению сходства R_3 , формируется образ p_3 нового знака s_3 так, что пары (p_3, p_1) и (p_3, p_2) пополняют отношение включения R_2	48
2.4	Пример структуры значения m знака s , которое включает в себя два экземпляра $\mu_1(I_1, i_3)$ и $\mu_2(I_2, j_2)$, где $I_1 = \{i_1, i_2, i_3\}$ и $I_2 = \{j_1, j_2, j_3, j_4\}$ — наборы семантических валентностей.	50
2.5	Пример элементарного сценария $M_{est}(s_1) = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\}$, порождённого значениями знака s_1 . Так как в приведённом примере пары экземпляров значений (μ_1, μ_2) и (μ_3, μ_4) принадлежат отношению R_6 , а пара (μ_1, μ_3) — отношению R_7 , то по определению эти экземпляры принадлежат элементарному сценарию $M_{est}(s_1)$	52
3.1	Знак и его компоненты.	56

3.2	Пример иерархии распознающих автоматов. Так, узел $R_{i_2}^{j_2}$ является родительским распознающим автоматом, а узел $R_{i_1}^{j_1}$ — дочерним автоматом.	57
3.3	Вычислительные циклы распознающего автомата. В моменты времени $0, h_i^j, 2h_i^j, \dots$ происходит определение нового начального состояния.	59
3.4	Схема входных и выходных отображений распознающего автомата.	60
3.5	Статическая схема корректности для момента времени τ_s	63
3.6	Статическая схема корректности для момента времени $\tau_s < t \leq \tau_s + h_i^j$	68
3.7	Динамическая схема корректности для одиночного распознающего автомата.	71
3.8	Динамическая схема корректности для случая двухуровневой иерархии.	74
3.9	Определение отношения поглощения на множестве признаков. . .	81

Приложение А

Типы картин мира

В соответствие с предыдущим параграфом в результате работы механизмов самоорганизации на множестве знаков формируются три основных типа структур. Каждую из них в соответствии с [66] будем называть неоднородной семантической сетью или, поскольку это не приводит к недоразумениям, семантической сетью. Рассмотрим три таких сети.

1. Семантическую сеть $H_P = \langle 2^P, \mathfrak{R}_P \rangle$ на множестве образов, где $\mathfrak{R}_P = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ — семейство отношений на образах.
2. Семантическую сеть $H_A = \langle 2^A, \mathfrak{R}_A \rangle$ на множестве личностных смыслов, где $\mathfrak{A} = \{R_5\}$ — семейство отношений на личностных смыслах.
3. Семантическую сеть $H_M = \langle 2^M, \mathfrak{R}_M \rangle$ на множестве значений знаков, где $\mathfrak{R}_M = \{R'_1, R'_3, R_6, R_7\}$ — семейство отношений на значениях.

Тройку объектов $H = \langle H_P, H_A, H_M \rangle$ будем называть семиотической сетью. Переходы между сетями H_P, H_A, H_M реализуются, как следует из предыдущего, посредством процедур Ψ_m^a , Ψ_a^p и Ψ_p^m .

Уровень имён знаков может наследовать каждую из описанных выше семантических сетей. Благодаря такому наследованию можно говорить о формировании той или иной семантической сети на уровне знаков (не только на уровне их компонент).

Предлагается выделять три типа картины мира: рациональную, житейскую и мифологическую [62]. Мы видели, что на сети H_P можно определить операции обобщения (и классификации) по признакам (раздел 2.3.1). Именно эти операции характерны для рациональной картины мира. На основании этих соображений и ряда психологических экспериментов (описание которых остаётся за пределами настоящего доклада) можно полагать, что именно сеть на мно-

жестве образов (и ее наследование на уровень имён знаков) лежит в основе рациональной картины мира. Здесь надо подчеркнуть важность слов «в основе». Все типы картин мира используют сети на образах, на смыслах и сценариях, но есть некоторая «управляющая» сеть, которая служит для формулирования цели, поиска подходящих действий, вызова сценариев и изменения личностных смыслов. Например, в рациональной картине мира в сети на образах выполняется выработка цели, затем в сети на значениях находятся подходящие роли в сценарии как условия выполнения действий для достижения цели, далее учитываются смыслы объектов, которые могут быть мотивами или препятствиями, или средствами для достижения цели [63]. Отметим, что могут быть описаны и вырожденные картины мира, в которых используются не три, а только две сети (например, только H_A и H_M для нигилистической картины мира [62]).

Житейская картина мира характеризуется следованием некоторым стереотипам или сценариям поведения. Таким образом, наследование на уровень имён знаков сети на значениях приводит к формированию житейской картины мира. Здесь также следует отметить, что сеть на значениях является лишь ведущей: моделирование, например, картины мира чиновников реализуется на двух сетях — сценариев и личностных смыслов. Поэтому при возникновении нового предмета потребности (например, выделение бюджета на науку и культуру) находится сценарий, в котором смысл цели из амбивалентного превращается в смысл препятствия. Поскольку в этом процессе не присутствуют образы, то речь идёт о вырожденной картине мира. В общем случае в житейской картине мира выбранный сценарий (на сети значений) пополняется образами тех объектов (в том числе партнёров), которые наилучшим образом (в соответствии с оценкой на сети смыслов) могут исполнять записанные в сценарии роли (например, начальник подбирает исполнителей в новую группу для «хорошего» выполнения нового вида работ или жених и невеста составляют список гостей на свадьбу в соответствии со своими представлениями о том, как должна выглядеть «хорошая» свадьба).

В мифологической картине мира каждая роль имеет неизменный смысл и заданный образ, т.е. ведущей в этом случае является сеть на смыслах. Иначе говоря, наследование сети H_A на уровень имён знаков приводит к формированию мифологической картины мира.

Приложение Б

Модель функции целеполагания на синтаксическом уровне

Задача управления поведением субъекта деятельности включает в себя фазы планирования и исполнения плана [79–81]. Первая задача планирования заключается в выдвижении цели — целеполагании. Применим развитый выше аппарат к решению этой задачи. Синтез плана и его исполнение будут рассмотрены во второй части статьи. Целеполагание — сложный процесс, который включает в себя не только выдвижение цели, но и определение условий и конкретного способа ее достижения. Как уже было сказано, характер процесса целеполагания определяется типом картины мира (КМ) субъекта. В случае житейской КМ ведущим компонентом является значение, т.е. субъект отталкивается от сюжетно—ролевой структуры и использует уже существующие знаки, чтобы выбрать подходящую ситуацию, которая и будет целевой. Для обозначения операции переходов на сети значений, образов и личностных смыслов введём недетерминированный оператор переходов Tr , действующий на булеанах 2^P , 2^A и 2^M : $Tr(x) = x'$, где $x, x' \in 2^A$ или $x, x' \in 2^P$, или $x, x' \in 2^M$. Левая композиция оператора Ψ_x^y , где $x \in \{m, a, p\}$, $y \in \{m, a, p\}$ (т.е. любого из операторов Ψ_p^m , Ψ_m^a или Ψ_a^p), с оператором переходов по сети y обозначим как $\underline{\Psi}_x^y : \underline{\Psi}_x^y = \Psi_x^y \circ Tr(x)$, где $Tr(x) = x'$, $x \in 2^A$ или $x \in 2^P$, или $x \in 2^M$ и $x' \in 2^A$, или $x' \in 2^P$, или $x' \in 2^M$. Под композицией операторов будем понимать применение левого оператора к результату применения правого оператора. Правая композиция оператора Ψ_x^y , где $x \in \{m, a, p\}$, $y \in \{m, a, p\}$, с оператором переходов по сети y обозначим как $\overline{\Psi}_x^y : \overline{\Psi}_x^y = Tr(y) \circ \Psi_x^y$, где $Tr(y) = y'$, $y \in 2^A$ или $y \in 2^P$, или $y \in 2^M$ и $y' \in 2^A$, или $y' \in 2^P$, или $y' \in 2^M$. Например, левая композиция оператора с оператором перехода по сети образов запишется как $\underline{\Psi}_p^m = \Psi_p^m \circ Tr(y)$.

Процесс целеполагания осуществляется в рамках какой-либо деятельности. Будем рассматривать случай, когда мотив деятельности осознан, т.е. знак предмета потребности включён в картину мира субъекта деятельности. Тогда мотивом деятельности (в житейской картине мира) является значение (m) этого знака. Мотив удовлетворяется, когда существует знак, такой, что результатом применения правой композиции оператора с оператором переходов $(Tr(p) \circ \Psi_a^p)$ к личностному смыслу этого знака является образ знака предмета потребности. (Или на семантическом уровне: существует знак, такой, что результатом некоторого действия, интерпретирующего личностный смысл этого знака, выступает образ знака предмета потребности.)

Тогда знак, результатом применения к которому правой композиции оператора Ψ_a^p с оператором переходов является образ знака предмета потребности, будем называть целевым знаком. Или на семантическом уровне: целевым будем называть такой знак, в структуре личностного смысла которого существует действие, применение которого приводит к формированию признаков образа предмета потребности (удовлетворению потребности). Процесс целеполагания, таким образом, заключается в построении такой последовательности знаков, которая заканчивается знаком, из которого достигим мотив, т.е. удовлетворяется потребность.

В соответствии с разд. 3.4 значение знака будем представлять в виде множества пар «действие — роль предмета в этом действии», образ (p) такого знака — в виде набора свойств, т. е. пар «признак — значение признака», личностный смысл (a) — в виде правила, соответствующего действию субъекта с предметом; условие и эффект действия такого правила задаются в виде множества свойств.

Далее, s^* — знак, экземпляр значения которого μ^* является мотивом деятельности. В приведённом ниже алгоритме целеполагания будем использовать как синтаксические, так и семантические соображения, особенно не подчёркивая этого обстоятельства.

Алгоритм GS.

Вход: знак предмета потребности s^* , мотив μ^* .

Шаг 1: переход $\mu^* \rightarrow a_1$ (применяется оператор $\underline{\Psi}_m^a$). На подсети значений (в сценарии с порождающим знаком s^*) применяем к μ^* оператор переходов Tr до тех пор, пока не будет получено такое значение m_1 , знак s_1 которого обладает личностным смыслом a_1 таким, что интерпретирующее его действие в множестве добавляемых признаков p_{add} содержит множество признаков p^* знака s^* : $\underline{\Psi}_m^a : \mu^* \rightarrow a_1$, где a_1 такое, что $p^* \subseteq p_{add}(a_1)$ (применение операторов $Tr(\mu^*)$ и Ψ_m^a на Рисунке Б.1). Если знак s_1 не совпадает со знаком s^* , то найденный целевой знак со своим личностным смыслом является целью и алгоритм завершает работу, иначе переходим к шагу 2.

Шаг 2: переход $a_1 \rightarrow \bar{p}_2$ (применяется оператор $\bar{\Psi}_a^p$). На подсети образов применяем оператор переходов Tr к образу, содержащему один или несколько признаков условия p_{cond} правила, интерпретирующего личностный смысл a_1 знака s_1 до тех пор, пока не будет получено максимального по мощности множества признаков p_2 знака s_2 , являющегося подмножеством p_{cond} . Объединение признаков образа p_2 знака s_2 с каким-либо признаком (одним или несколькими) из множества p_{cond}

p_2 будем называть расширенным образом \bar{p}_2 : $\bar{\Psi}_a^p : a_1 \rightarrow \bar{p}_2$, где \bar{p}_2 такое, что $p_2 \subseteq \bar{p}_2$ и $\bar{p}_2 \subseteq p_{cond}$ (применение операторов $\bar{\Psi}_a^p$ и $Tr(p_1)$ на Рисунке Б.1).

Шаг 3: переход $\bar{p}_2 \rightarrow \mu_3$ (применяется оператор $\bar{\Psi}_p^m$). На подсети значений применяем оператор Tr к какому-либо значению знака s_3 , образ которого совпадает с множеством признаков \bar{p}_2

p_2 до тех пор, пока не будет получено такого экземпляра μ_3 , что:

- порождаемый знаком s_3 (с первым по порядку \geq экземпляром значения μ_3 в M_{scen}) элементарный сценарий $M_{est}(s_3)$ совпадает с каким-либо элементарным сценарием (с первым по порядку \geq экземпляром значения μ'_2 в M_{scen}), порождаемым знаком s_2 , найденным на шаге 2 с точностью до

знаков s_2 и s_3 (т.е. без их учёта);

- соответствующий экземпляру значения μ_3 личностный смысл a_3 интерпретируется таким действием, что в множество признаков его эффекта включено множество признаков образа p_3 самого знака s_3 : $\bar{\Psi}_p^m : \bar{p}_2 \rightarrow \mu_3$, где μ_3 — первый по порядку экземпляр значения в множестве M_{scen} сценария $M_{est}(s_3)$, причём такой, что $M_{est}(s_2) = M_{est}(s_3)$ без учёта знаков s_2 и s_3 (применение операторов $Tr(p_2)$, Ψ_p^m и $Tr(\mu_3)$ на Рисунке Б.1).

Шаг 4: переход $\mu'_2 \rightarrow a_2$ (применяется оператор Ψ_m^a). Нахождение личностного смысла a_2 , соответствующего значению μ'_2 знака s_2 . Завершение работы алгоритма.

Выход: либо знак s_1 и его личностный смысл a_1 , либо знак s_2 и его личностный смысл a_2 .

В результате работы алгоритма найден знак s_2 , не совпадающий со знаком предмета потребности s^* , личностный смысл a_2 которого интерпретируется действием, приводящим к удовлетворению потребности. Целью, таким образом, становится знак s_2 с личностным смыслом a_2 (Рисунке Б.1).

Пример. Опишем в качестве простого примера процедуру целеполагания руководителя команды разработчиков программного обеспечения (Рисунке Б.2).

Руководитель команды использует в данном случае житейскую картину мира, мотивом его деятельности является значение знака «средства», один из экземпляров значения которого — «получение», обладающее семантической валентностью «объект». Иначе говоря, один из экземпляров значений знака средства есть пара («получение», «объект»). Предположим, образ этого знака содержит признаки: «высокая ценность», «востребованность рынком», «новое».

Алгоритм GS.

Вход: знак «средства» и мотив («получение», «объект»).

Шаг 1: переход значение — личностный смысл. Сценарий образуется се-

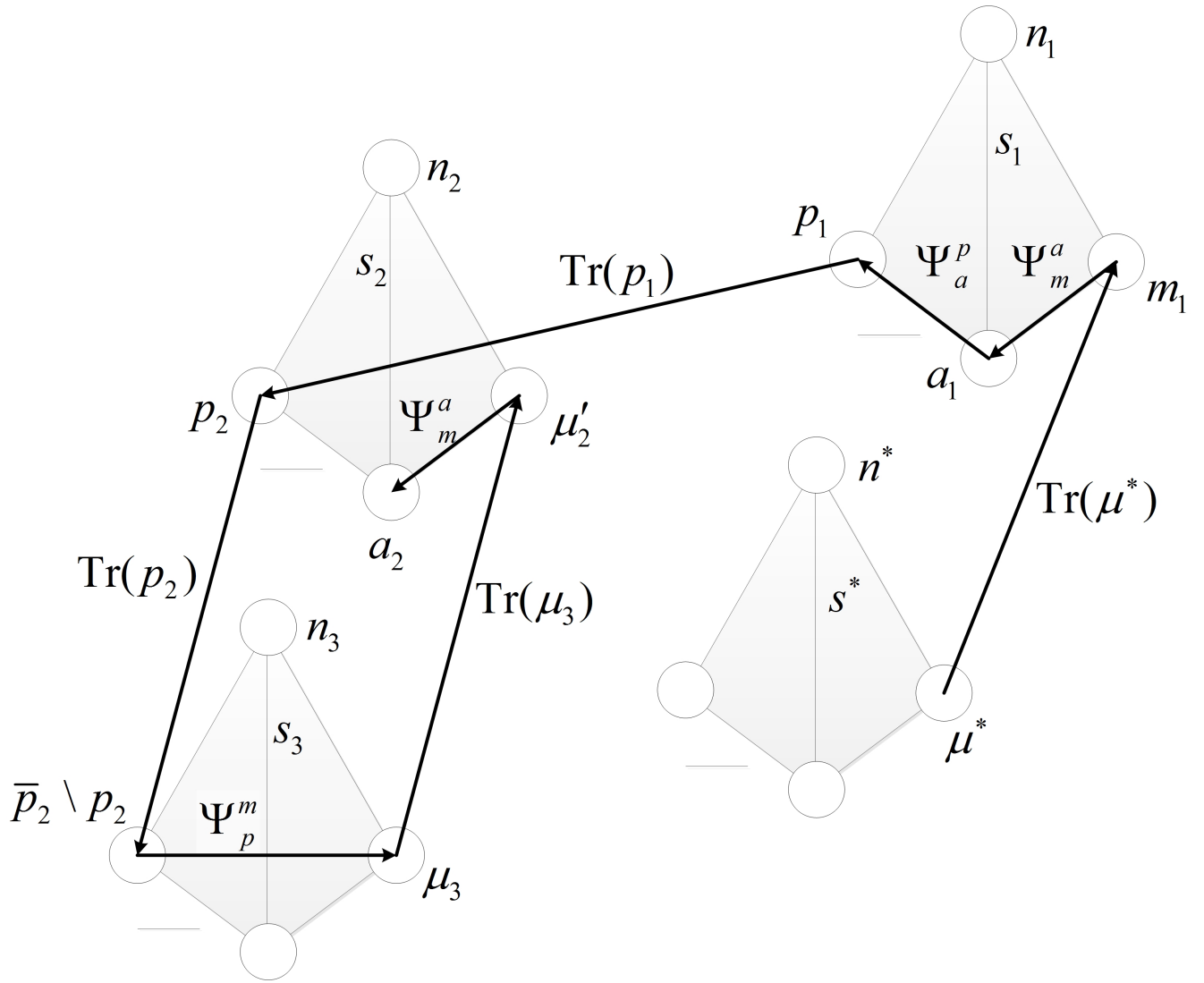


Рис. Б.1. Иллюстрация к алгоритму целеполагания: s^* — знак предмета потребности, μ^* — экземпляр его значения, иначе говоря, мотив деятельности. Стрелками обозначены операторы Ψ_p^m , Ψ_m^a , Ψ_a^p и Tr .

мантическими валентностями предикатного слова, (в данном случае — «получение»). Субъект ищет знак, при этом его личностный смысл интерпретируется действиями, которые он будет осуществлять, чтобы удовлетворить мотив. Иначе говоря, в множестве добавлений правила, интерпретирующего личностный смысл, должны содержаться необходимые признаки предмета, за который происходит получение средств, например «высокая ценность», «востребованность рынком», «новое» и т.д. Предположим, что будет найден личностный смысл «получить» знака «средства».

Шаг 2: переход личностный смысл — образ. Выполнение действия, соот-

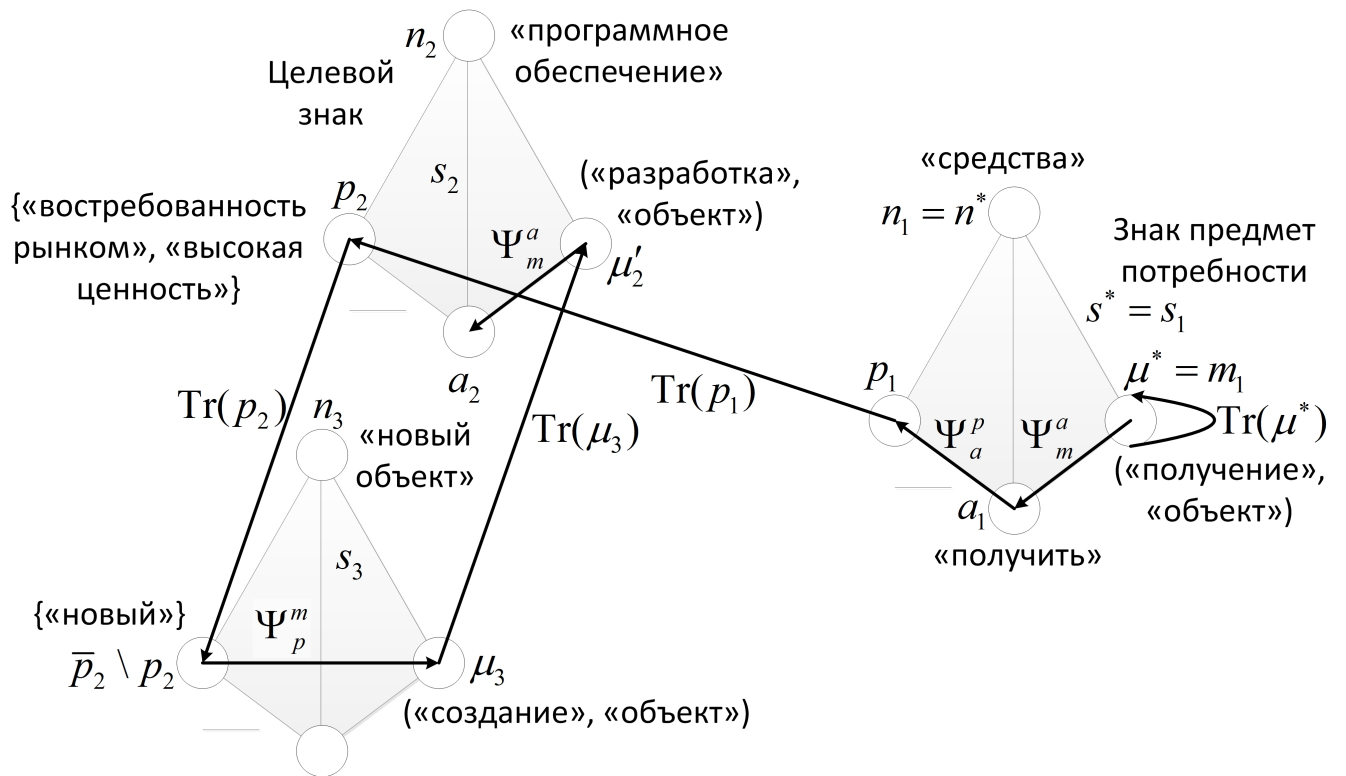


Рис. Б.2. Пример процесса целеполагания руководителя команды разработчиков с житейской картиной мира. Знаком предмета потребности руководителя является знак с именем «средства». Стрелками обозначены операторы Ψ_p^m , Ψ_m^a , Ψ_a^p и Tr .

ветствующего найденному личностному смыслу, требует удовлетворения признаков из условия действия. Происходит поиск такого знака, образ которого содержит необходимые признаки. Так как руководитель команды разработчиков имеет дело с программным обеспечением, то рано или поздно им будет найден знак «программное обеспечение», так как его образ содержит признаки «высокая ценность», «востребованность рынком». Неудовлетворённые признаки из условия правила вместе с удовлетворёнными образуют расширенный образ, например «новое программное обеспечение».

Шаг 3: переход образ — значение. Ищется знак, содержащий в образе признак «новый», например знак «новый объект». Выбираем экземпляр значения этого знака. Экземпляр значения должен быть первым в каком-либо сценарии, совпадающим с каким-либо сценарием знака «программное обеспечение». Таким экземпляром может служить «создание», так как в картине мира руководителя команды имеется необходимый сценарий. Для соответствующего сценария

рия, порождённого знаком «программное обеспечение», первым экземпляром в таком случае выступает «разработать».

Шаг 4: переход значение — личностный смысл. Выбирается личностный смысл знака «программное обеспечение», соответствующий экземпляру значения «разработать». Действие, интерпретирующее этот личностный смысл, в множестве добавляемых признаков будет включать признаки «высокая ценность», «востребованность рынком», «новое», содержащиеся в образе знака «средства» и удовлетворяющие мотив. Таким образом, текущий знак является целевым, а целью — пара «разработать» — «программное обеспечение».

Выход: знак «программное обеспечение» и его личностный смысл «разработать».