

Л. А. Станкевич

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

*Рекомендовано Учебно–методическим отделом
высшего образования в качестве учебника и практикума
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по инженерно–техническим направлениям*

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2016

УДК 004.89(075.8)
ББК 32.81я73
С76

Автор:

Станкевич Лев Александрович — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и управления Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Рецензенты:

Дорогов А. Ю. — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова, главный научный сотрудник ПАО «Информационные и телекоммуникационные технологии»;

Шкодырев В. П. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Станкевич, Л. А.

С76 Интеллектуальные системы и технологии : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / Л. А. Станкевич. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 397 с. — Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-7575-8

В учебнике рассмотрены понятия искусственного интеллекта и методы представления, использования и приобретения знаний, а также принципы построения и функционирования логических, объектных, ассоциативных, обучаемых и когнитивных интеллектуальных систем. Описаны интеллектуальные технологии, позволяющие практически создавать экспертные системы на правилах, системы на нечеткой логике и искусственных нейронных сетях, гибридные системы, основанные на объединении разных моделей знаний, распределенные системы на взаимодействующих интеллектуальных агентах. Рассмотрены основные задачи и примеры их решения в интеллектуальных системах. Среди множества интеллектуальных задач выделены такие задачи, как общение с системой на естественном языке, восприятие информации, формирование и исполнение поведений, обработка данных и поиск информации, а также некоторые когнитивные и креативные задачи. Приведен практикум, включающий лабораторные работы, направленные на закрепление навыков, а также методические указания по курсовой работе и пример ее выполнения.

Также к учебнику прилагаются файлы для выполнения лабораторных работ — они размещены в ЭБС «Юрайт» (biblio-online.ru).

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Системный анализ и управление» и «Мехатроника и робототехника», а также специальностям «Информационные системы и технологии», «Роботы и робототехнические системы».

УДК 004.89(075.8)
ББК 32.81я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-9916-7575-8

© Станкевич Л. А., 2016
© ООО «Издательство Юрайт», 2016

Оглавление

Предисловие	7
Принятые сокращения	14

Раздел I

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Глава 1. Искусственный интеллект	17
1.1. Развитие искусственного интеллекта.....	17
1.2. Символизм	21
1.3. Коннективизм	24
Глава 2. Представление знаний.....	28
2.1. Понятийная область знаний	28
2.2. Модели и формы знаний.....	30
2.3. Формализмы для представления знаний.....	34
Глава 3. Использование знаний	46
3.1. Функциональное и логическое программирование	46
3.2. Объектно-ориентированное программирование.....	51
3.3. Агентно-ориентированное программирование	52
Глава 4. Приобретение знаний.....	55
4.1. Подходы и методы приобретения знаний.....	55
4.2. Формирование знаний путем обучения	56
4.3. Обучение с подкреплением.....	61
Вопросы для самоконтроля.....	67
Список литературы.....	68

Раздел II

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Глава 5. Понятия и классификация	73
5.1. Интеллектуальные системы и их развитие	73
5.2. Классификация интеллектуальных систем.....	79
5.3. Архитектура интеллектуальных систем	81
Глава 6. Логические интеллектуальные системы	86
6.1. Системы на предикатах	86
6.2. Системы на продукциях.....	89
6.3. Системы с планированием	95

Глава 7. Интеллектуальные системы с неопределенностями	101
7.1. Нечеткие продукционные системы	101
7.2. Вероятностные продукционные системы	105
7.3. Системы с коэффициентами уверенности.....	110
Глава 8. Объектные интеллектуальные системы.....	115
8.1. Системы на семантических сетях.....	115
8.2. Системы на сетях фреймов.....	118
8.3. Онтологические системы.....	121
Глава 9. Обучаемые интеллектуальные системы	130
9.1. Логические обучаемые системы.....	130
9.2. Системы на прямонаправленных нейронных сетях.....	132
9.3. Системы на нейронных сетях с обратными связями	144
Глава 10. Когнитивные системы.....	149
10.1. Логические когнитивные системы.....	149
10.2. Нейросетевые когнитивные системы.....	152
10.3. Нейрологические когнитивные системы.....	153
Глава 11. Распределенные интеллектуальные системы	163
11.1. Интеллектуальные агенты	163
11.2. Когнитивные агенты.....	167
11.3. Взаимодействие агентов в системе.....	172
Вопросы для самоконтроля.....	180
Список литературы.....	181

Раздел III ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Глава 12. Интеллектуальные технологии и их применение	185
12.1. Развитие интеллектуальных технологий	185
12.2. Разработка интеллектуальных систем.....	188
Глава 13. Технология экспертных систем	193
13.1. Статические и динамические экспертные системы	193
13.2. Среда разработки экспертных систем CLIPS.....	196
13.3. Диагностическая экспертная система на CLIPS.....	215
Глава 14. Технология нечетко-логических систем	229
14.1. Средства программирования нечетко-логических систем	229
14.2. Пакет fuzzyTECH	230
14.3. Нечетко-логическая система управления дорожным трафиком.....	236
14.4. Адаптивные нечеткие системы	242
Глава 15. Технология нейросетевых систем	246
15.1. Средства разработки нейросетевых систем	246
15.2. Пакет JavaNNS.....	247
15.3. Нейросетевая система для распознавания образов.....	253
Глава 16. Технология многоагентных систем	259
16.1. Средства разработки многоагентных систем.....	259
16.2. Платформа JADE.....	261

16.3. Многоагентная система управления транспортными потоками	263
Вопросы для самоконтроля.....	270
Список литературы.....	271

Раздел IV

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Глава 17. Общение с интеллектуальными системами	275
17.1. Организация диалогового общения.....	275
17.2. Распознавание речи	277
17.3. Интерпретация и понимание речевых сообщений	281
Глава 18. Восприятие информации	288
18.1. Процесс обработки информации в интеллектуальных системах.....	288
18.2. Слияние информации и распознавание образов.....	290
Глава 19. Распознавание визуальных образов	292
19.1. Распознавание лиц.....	300
19.2. Распознавание трехмерных объектов.....	302
Глава 20. Формирование и исполнение поведений	307
20.1. Типы поведений.....	307
20.2. Поведенческие сети	308
20.3. Исполнение поведений.....	312
Глава 21. Обработка данных и поиск информации	318
21.1. Интеллектуальный анализ данных	318
21.2. Категоризация и классификация документов	326
21.3. Поиск информации.....	331
Глава 22. Распределенная обработка информации	335
22.1. Распределенный поиск информации	335
22.2. Распределенное управление	338
22.3. Управление командной работой	345
Глава 23. Когнитивные и креативные задачи.....	348
23.1. Когнитивное управление.....	348
23.2. Построение гипотез и самообучение принятию решений	351
23.3. Автоматическое построение моделей.....	353
Вопросы для самоконтроля.....	359
Список литературы.....	361
Заключение	363

ПРАКТИКУМ

Лабораторные работы.....	367
1. Экспертные системы.....	367
2. Нечеткие системы.....	369
3. Нейросетевые системы.....	374
Курсовые работы: темы, методические указания, пример выполнения	380
<i>Список использованной литературы</i>	<i>392</i>

Приложение..... 393
Список литературы..... 396
**Новые издания по дисциплине «Интеллектуальные системы
и технологии» и смежным дисциплинам..... 397**

Предисловие

Тематика этого учебника — интеллектуальные системы — имеет корни в искусственном интеллекте. Именно искусственный интеллект, возникший в 1950-х гг. как научное направление, связанное с разработкой методов решения сложных задач на основе моделирования психической деятельности человека, решающего подобные задачи, дал возможность создавать интеллектуальные системы, основанные на знаниях. В учебнике систематически рассматриваются методы искусственного интеллекта, построения интеллектуальных систем на их основе и реализации систем с использованием интеллектуальных технологий. Рассмотрены также типовые задачи обработки информации и управления разнообразными объектами и процессами, для решения которых предназначены интеллектуальные системы.

Актуальность тематики. Интеллектуальные системы способны решать задачи, которые можно называть интеллектуальными, поскольку их трудно формализовать или невозможно решать традиционными методами. Множество интеллектуальных задач возникает при обработке информации и управлении, а также при проектировании сложных комплексов, при моделировании физических и биологических систем.

Интеллектуализация систем обработки информации и управления напрямую связана с эволюцией человечества. Эволюция идет по пути разгрузки человека от необходимости лично добывать энергию и пищу. На этом пути человечество накопило огромный культурный интеллектуальный и технический капитал. Именно поэтому изменился стиль жизни человека — он стал меньше работать физически и уклоняться от неинтересных мыслительных работ, поскольку для этого можно использовать многочисленные машины и компьютеры. Такой путь эволюции неизбежно приводит к необходимости создания и массового использования интеллектуальных систем и машин, полностью заменяющих человека при выполнении неинтересных или физически трудных работ.

Так, в области обработки информации развиваются интеллектуальные информационные системы, использование которых в масштабе отдельных личностей, коллективов предприятий, сообществ глобальных сетей характерно для настоящего времени и будущего. Такие системы автоматизируют обработку информации в виде данных (текстовых, графических, фото-, видео-), а также знаний (вербальных, математических, алгоритмических) и крайне необходимы в нашей повседневной деятельности дома, на работе, в учебе и офисе.

С другой стороны, имеет место развитие сложных технических установок, таких как станки с программным управлением, роботы и автоматизированные комплексы, построенные на базе разнообразных мехатронных

устройств. В этих установках повсеместно используются управляющие компьютерные системы. Прослеживается тенденция развития: современные управляющие системы все чаще строятся как интеллектуальные. Это значит, что их функционирование все больше обеспечивается за счет применения методов искусственного интеллекта, основанных прежде всего на использовании знаний. Особенно это касается интеллектуальных роботов, массовое использование которых, по-видимому, является главным вызовом начинающегося XXI столетия.

В настоящее время интеллектуальные системы бурно развиваются и повсеместно занимают место традиционных систем обработки информации и управления. Наиболее значительные успехи достигнуты в развитии экспертных систем, интеллектуальных систем диагностики, прогнозирования, планирования, управления, поддержки принятия решений, проектирования, информационного поиска, обработки естественно-языковой информации. Такие системы создаются с помощью интеллектуальных технологий, включающих программные и аппаратные средства реализации интеллектуальных методов и алгоритмов.

Особое место отводится развитию обучаемых интеллектуальных систем на логике и нейронных сетях, а также когнитивных систем, использующих принципы организации структуры, функций и поведения, присущие нервной системе человека, и обладающих способностью, в частности, накапливать знания в процессе функционирования и даже решать некоторые творческие задачи. На этом пути интеллектуальные технологии становятся биологичными, что может существенно ускорить процесс в развитии интеллектуальных систем.

Грамотный подход к разработке интеллектуальных систем и их реализации с использованием интеллектуальных технологий требует знания методов искусственного интеллекта, их развития и представления тех задач, которые могут быть эффективно решены путем применения таких методов. Интеллектуальные системы разрабатываются с использованием разнообразных методов представления, приобретения и использования знаний. Модели и формы представления знаний, а также методы использования этих знаний при решении задач разнообразны. Умение получать знания, представленные в разных моделях и формах, и использовать их при решении интеллектуальных задач может дать возможность ускорить получение результатов, а в некоторых случаях помогает решать не решаемые традиционными методами задачи.

Подход, основанный на интеграции и биоподобии. В процессе эволюции произошла естественная интеграция интеллектуальных информационных и управляющих систем с мехатронными устройствами. Наблюдается также стремление развивать биоподобные системы и устройства. Это особенно заметно в области создания современных интеллектуальных роботов, которые морфологически и функционально становятся близки к человеку. В плане обработки информации и управления такой робот можно рассматривать как интеллектуальную информационно-управляющую систему, имеющую интерфейс для прямых связей с оператором или дру-

гими роботами и оснащенную мехатронными сенсорами, манипуляторами и органами перемещения.

Как искусственная сущность, робот существенно отличается от человека в реализации манипуляций и перемещений. Самые современные роботы пока не достигли человеческой гибкости, реактивности движений и интеллектуальности поведения. У человека 90% мозга и нервной системы отвечает за рефлекторные подсознательные движения, артикуляции и образное мышление и только 10% — за сознательное поведение и вербальное логическое мышление. Заметим, что рефлексия (подсознание) является продуктом долгой эволюции человека как представителя животного мира, а психика (сознание) является продуктом эволюции, развитым на относительно недолгом переходе к человеку разумному. В отличие от человека компьютерные мощности интеллектуального робота на 70–80% используются для восприятия сенсорной информации и формирования поведения, и только 20–30% — на управление телом робота при манипуляциях и перемещениях. Однако с развитием конструкции роботов, их сенсоров и приводов, а также средств управления поведением это соотношение должно измениться в сторону увеличения компьютерных средств управления телом робота с целью повышения гибкости и реактивности движений.

Системы обработки информации и управления поведением современных интеллектуальных роботов функционально становятся все более подобными нервной системе человека. Основа нервной системы — мозг человека — является самой мощной биологической интеллектуальной и управляющей системой, а тело человека — самой универсальной биологической машиной. При создании «искусственного мозга», например для робота, можно пробовать воспроизводить до мельчайших подробностей мозг человека на компьютерах программно, но даже на современном уровне развития вычислительной техники это будет сверхбольшой суперкомпьютер, занимающий целое здание. Вероятно, такое направление развития «искусственного мозга» не имеет смысла. Другой путь — развитие нейроморфных средств, построенных аппаратно на базе моделей мозговых структур (коры мозга, мозжечка, гиппокампа и пр.). На этом пути можно ожидать существенного скачка в развитии искусственного интеллекта и робототехники. Здесь «искусственный мозг» уже не компьютер, а нейроморфная среда, которая может обеспечить максимальную человекоподобность обработки информации и формирования поведения. Именно такая тенденция может привести к созданию «искусственного разума».

Предназначение учебника и общие компетенции. Учебник соответствует уровню «Бакалавр и магистр. Академический курс» и предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Системный анализ и управление». Он соответствует программе курса «Интеллектуальные системы и технологии», в рамках которой изучаются методы искусственного интеллекта, построенные на их основе интеллектуальные системы и технологии обработки информации и управления.

В соответствии с указанным предназначением основная *цель* данного учебника — способствовать формированию специалистов, знающих методы искусственного интеллекта и интеллектуальные технологии и уме-

ющих применять их при разработке интеллектуальных информационных и управляющих систем, а также умеющих математически грамотно пояснить существо используемых методов и моделей, обосновать необходимость их применения и доказать их результативность.

В результате изучения курса студент должен:

знать

- предмет, цели и задачи курса «Интеллектуальные системы и технологии»;
- теоретические основы искусственного интеллекта;
- особенности и отличительные признаки интеллектуальных систем;
- понятийный и категориальный аппарат методов искусственного интеллекта, интеллектуальных систем и технологий;
- методологические принципы применения интеллектуальных методов для построения интеллектуальных систем;
- современные представления о методах искусственного интеллекта, архитектурах интеллектуальных систем, технологиях построения экспертных систем с различными видами неопределенностей;
- историю и тенденции развития искусственного интеллекта, интеллектуальных систем и технологий;

уметь

- обобщать и систематизировать полученные результаты применения интеллектуальных методов для решения различных задач;
- работать с традиционными носителями информации, а также с локальными и распределенными базами данных и знаний;
- применять методы математической логики и статистики для решения интеллектуальных задач обработки информации и управления;
- разрабатывать прикладные интеллектуальные системы, используя современные интеллектуальные технологии;
- решать типовые интеллектуальные задачи обработки информации и управления, используя соответствующее программное обеспечение, с доведением решения до практически приемлемого результата;
- применять аналитические, вычислительные и системно-аналитические методы для решения прикладных задач в области управления объектами техники, технологии, организационными системами;
- использовать полученные знания при освоении новой техники, новых методов и технологий;
- создавать программные комплексы для системного анализа и синтеза сложных интеллектуальных систем;
- выбирать необходимые интеллектуальные методы для реализации задач обработки информации и управления;
- давать самостоятельную оценку эффективности применяемых интеллектуальных методов и технологий;

владеть

- методами представления знаний и их использования для создания баз знаний в различных проблемных областях;
- современными технологиями экспертных систем, а также нечетко-логических и нейросетевых систем прогнозирования и управления;

- навыками системного анализа в области интеллектуальной обработки информации и управления.

Учебник также может использоваться при изучении дисциплин профессионального цикла (корпоративные системы, управление предприятием и др.) и при подготовке выпускной квалификационной работы. Кроме того, возможно его использование для обучения студентов вузов в рамках специальностей «Информационные системы и технологии», «Мехатроника и робототехника».

Структура учебника. Структура учебника отражает прежде всего уровни развития методов искусственного интеллекта и интеллектуальных систем в плане увеличения степени их интеллектуализации — от систем со знаниями в логической, нечетко-логической и нейросетевой формах к когнитивным системам с автоматическим накоплением знаний и системам, обладающим креативными способностями. Наряду с этим, рассмотрены основные интеллектуальные технологии, применяемые для практической реализации интеллектуальных систем, с учетом степени усложнения программных средств их разработки — от реализации на основе модульной и объектной технологии к реализации на основе технологии многоагентных систем.

Учебник включает предисловие, основной материал, заключение и список литературы. Основной материал учебника разделен на четыре раздела, которые включают 23 главы.

Раздел I посвящен методам искусственного интеллекта и включает первые четыре главы, в которых в историческом ракурсе описывается понятийная область искусственного интеллекта, методически излагаются вопросы представления, использования и приобретения знаний.

В разделе II с главами 5—11 рассмотрены интеллектуальные системы. В этих главах описываются базовые понятия и дается классификация систем, рассматриваются принципы построения и функционирования логических, объектных, ассоциативных, обучаемых и когнитивных систем.

Раздел III с главами 12—16 посвящен интеллектуальным технологиям, позволяющим практически создавать экспертные системы на правилах, системы на нечеткой логике и искусственных нейронных сетях, гибридные системы, основанные на объединении разных моделей знаний, распределенные системы на взаимодействующих интеллектуальных агентах.

В разделе IV, включающем главы 17—23, рассмотрены основные задачи и примеры их решения в интеллектуальных системах. Среди множества интеллектуальных задач выделены такие задачи, как общение с системой на естественном языке, восприятие информации, формирование и исполнение поведений, обработка данных и поиск информации, а также некоторые когнитивные и креативные задачи. Глава 23 освещает новый подход к разработке интеллектуальных систем, обладающих некоторыми когнитивными и креативными способностями. Такие способности должны иметь будущие интеллектуальные системы, которые можно назвать системами искусственного разума.

Практикум посвящен практическим работам, позволяющим закрепить основные главы учебника. В нем описаны три группы лабораторных работ,

направленных на закрепление навыков разработки экспертных систем, а также нечетко-логических и нейросетевых систем, приведены методические указания по курсовым работам и рассмотрен пример курсовой работы по тематике управления.

Файлы, необходимые для выполнения лабораторных работ, размещены в ЭБС «Юрайт» на странице данного учебника.

Рекомендации по изучению и преподаванию. При изучении материалов учебника необходимо восстановить соответствующие знания в области математики (логику, функциональный анализ и теорию вероятностей), а также в области информационных технологий (общий уровень владения компьютером, технология программирования).

Учебник соблюдает традиционные образовательные технологии преподавания дисциплины «Интеллектуальные системы и технологии»: лекции, лабораторные и практические занятия, курсовое проектирование. В рамках программы дисциплины, рассчитанной на два семестра, достаточным является изучение разделов I и II на предыдущем семестре и разделов III и IV — на последующем. Рекомендуется изучение соответствующих глав учебника перед прослушиванием лекций по их тематике. Практикум дополняет основной курс и может быть использован студентами при выполнении лабораторных работ и самостоятельной курсовой работы. Приведенные в конце разделов вопросы для самопроверки позволяют самостоятельно контролировать степень понимания материалов учебника.

Для практического изучения материалов издания рекомендуется проведение лабораторных и практических занятий по следующим темам.

1. Изучение методики разработки баз для знаний интеллектуальных систем.

2. Изучение методики и пакета проектирования экспертных систем на правилах (по выбору преподавателя).

3. Изучение методики и пакетов моделирования нечетких и нейросетевых систем в среде Matlab.

4. Изучение пакетов обработки сигналов и методов обработки речи и изображений соответствующими средствами в среде Matlab.

5. Изучение методики и пакета проектирования и моделирования многоагентных систем (по выбору преподавателя) и технологии многоагентных систем.

6. Изучение пакета для решения задач компьютерного зрения Open Computer Vision и методики создания на его основе программ обработки и распознавания визуальных образов.

7. Интеллектуальное распознавание речи и визуальных образов.

8. Интеллектуальное управление (логическое, нейросетевое, нечетко-логическое).

9. Нейросетевые и нейрологические средства обработки информации и управления.

10. Когнитивные системы и системы с элементами креативности.

Темы 1—5 направлены на овладение средствами практического проектирования интеллектуальных систем, которые могут быть использованы

при выполнении лабораторных и курсовых работ. Темы 6—10 изучаются в рамках самостоятельной работы студентов под руководством преподавателя. В рамках этих тем целесообразно формировать индивидуальные задания на выполнение самостоятельных курсовых работ.

Основными формами контроля при преподавании указанной дисциплины являются: зачет по практическим работам, дифференцированный зачет по курсовой работе и экзамен.

Дополнительный материал по тематике учебника можно найти в ряде ранее опубликованных учебников и учебных пособий, например [15, 19, 20].

Принятые сокращения

- АГК** — анализ главных компонент
АНК — анализ независимых компонент
АОД — аналитическая обработка данных
АР — антропоморфный робот
БД — база данных
БЗ — база знаний
ГА — генетический алгоритм
ГР — гуманоидный робот
ИИ — искусственный интеллект
ИНС — искусственная нервная система
ИС — интеллектуальная система
КЗГ — контекстно-зависимые грамматики
КС — когнитивная структура
КСГ — контекстно-свободные грамматики
МАС — многоагентная система
МВ — машина вывода
МНР — марковский процесс решения
НС — нейронная сеть
ППИМ — преобразование к признакам, инвариантным к масштабу
РД — раскопка данных
РЗД — раскрытие знаний из данных
РСН — расширенные сети переходов
СБИС — сверхбольшие интегральные схемы
СММ — скрытая марковская модель
СУБД — система управления базой данных
СУБЗ — система управления базой знаний
ХД — хранилище данных
Lisp — язык функционального программирования
Prolog — язык логического программирования

Раздел I

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В результате изучения данного раздела студент должен:

знать

- основные понятия в области искусственного интеллекта и этапы его развития в рамках символизма и коннективизма;
- методы представления знаний с использованием логической, объектной и ассоциативной моделей, а также соответствующие им методы вывода;
- методы работы со знаниями с использованием функционального и логического программирования, а также объектно- и агентно-ориентированного программирования;
- методы приобретения знаний путем их извлечения с помощью экспертов, получения знаний самими экспертами, использующими автоматизированные рабочие места, формирования знаний путем обучения;

уметь

- ориентироваться в математическом аппарате в области искусственного интеллекта;
- подбирать, интерпретировать и оценивать необходимую для решения типовых интеллектуальных задач информацию;
- выбирать необходимые модели и формы представления знаний для реализации типовых интеллектуальных задач;

владеть

- навыками использования изученных методов представления знаний для создания баз знаний в логических, объектных и ассоциативных формах;
 - навыками построения машин вывода, соответствующих используемым моделям и формам знаний.
-

Глава 1

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

1.1. Развитие искусственного интеллекта

История появления и развития искусственного интеллекта берет свое начало от древней философии. Именно в ней нашли развитие логика и биология, давшие начало становлению и развитию искусственного интеллекта. Схема, представленная на рис. 1.1, отражает следующие основные этапы этих процессов [16].

Раннее развитие. До начала XX в. параллельное развитие логики и биологии привело к накоплению знаний о процессах мышления, макро- и микроструктуре нервной системы, развитию и утверждению логической и нейронной доктрин, различия в которых принципиальны.

Первые шаги. До 1940-х гг. осуществился переход к использованию теоретических моделей рассуждений, основанных на машинах А. Тьюринга и Э. Поста с одной стороны и формальных моделей нейронных сетей — с другой.

Закладка фундамента. В 1950-е гг. развивались идеи функционального и логического программирования, происходило утверждение самого понятия «искусственный интеллект», а позднее — символизма как первоначального направления его развития. С другой стороны, формировалась нейродинамика, давшая теоретические основы искусственных нейросетей, и создавались более сложные модели механизмов мозга (модели условных рефлексов, иерархические модели мозга и др.), что дало толчок к развитию нового направления в искусственном интеллекте, названного позднее коннективизмом. Ключевые моменты этого этапа связаны с казавшимися неограниченными возможностями искусственного интеллекта и возможностями искусственных нейросетей, построенных по типу перцептрона Ф. Розенблатта.

Развитие и осмысление. В 1960-е гг. создаются и применяются на практике первые программные средства интеллектуальных систем, такие как язык Lisp (ЛИСП), разрабатываются эвристические методы и универсальные системы решения задач типа GPS на логике предикатов, а также развиваются новые подходы к разработке искусственных нейросетей на импульсных моделях нейронов и различных вариантах перцептронов. Вместе с тем намечается скептицизм по отношению к практической полезности методов, основанных на логике предикатов, для решения задач большой размерности в условиях неопределенностей, а также отмечается спад активности в развитии нейросетевого направления вследствие опроверже-

ния гипотезы универсальности перцептронов Ф. Розенблатта и ограниченности практических результатов применения нейронных сетей этого типа.

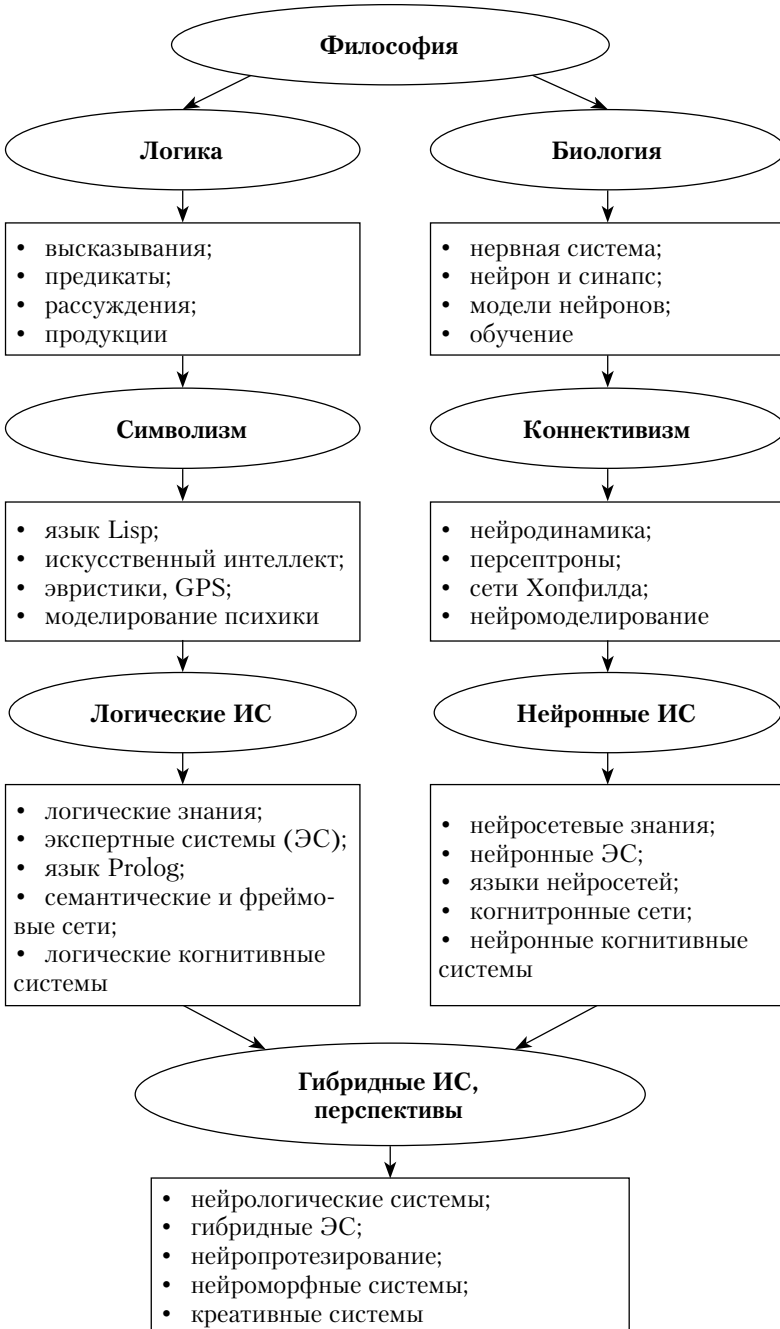


Рис. 1.1. Развитие искусственного интеллекта

Концепция знаний. В 1970-е гг. осуществляется переход к концепции знаний, в соответствии с которой знания в интеллектуальных программах

(например, в виде набора фактов и правил) отделяются от средств вывода (интерпретатора, использующего эти знания для решения задачи). Эта концепция позволила создавать базы знаний для различных проблемных областей и включать их отдельным изменяемым модулем в интеллектуальную программу. На базе такой концепции создаются первые практически полезные логические экспертные системы (ЭС) и разрабатываются программные инструментальные средства логического программирования, такие как язык Prolog (ПРОЛОГ). Наряду с этим получает развитие объектная модель знаний, где знания представляются в форме семантических и фреймовых сетей. В это же время разрабатывается универсальная теория искусственных нейросетей, основанная на системах нейро- и мнemoуравнений, и теория параллельной распределенной обработки информации. Эти теории легли в основу **коннективизма** как направления в искусственном интеллекте, в котором знания представляются ассоциативно в сетевой форме и формируются в системе путем обучения.

Активная разработка. В 1980-х гг. совершенствуется объектный и концептуальный подход к программированию при создании интеллектуальных систем (ИС), проектируются ЭВМ 5-го поколения (логические машины), создаются первые самообучающиеся логические системы на знаниях и разрабатываются первые массивно-сетевые ЭВМ. И в то же время осуществляется переход к аналоговым моделям нейросетей с полной коммутацией (**сети Хопфилда**), разрабатываются первые нейросетевые системы с ассоциативными моделями знаний (когнитрон, неокогнитрон, АРТ-3), развивается технология производства нейро-СБИС (сверхбольшие интегральные схемы) и нейроинформатика, создаются первые нейрокомпьютерные платы, начинают реализовываться программы создания ЭВМ 6-го поколения (нейрокомпьютеры).

Искусственные когнитивные системы. В начале 2000-х гг. формируется новое направление в искусственном интеллекте, связанное с созданием так называемых искусственных когнитивных систем, т.е. ИС, обладающих когнитивными способностями, например способностями накапливать знания в процессе функционирования и использовать их для принятия сложных решений путем ментального вывода. Заметим, что начиная с 1990-х гг. и до настоящего времени происходит усиленное развитие и использование для решения задач искусственного интеллекта многопроцессорных сетевых ЭВМ и нейрокомпьютеров. Такие мощные средства позволили практически реализовать первые прототипы логических когнитивных систем на основе семантических, продукционных и фреймовых сетей с автоматическим накоплением и использованием знаний в логической и объектной формах, а также нейронных когнитивных систем, способных автоматически формировать и использовать знания в ассоциативной форме.

Создание современных логических и нейронных когнитивных систем базируется на развитии методов обучения, используемых для извлечения знаний в разных предметных областях, обучаемых нечетких и вероятностных систем, ассоциативных логических систем, нейронных систем с самоорганизацией и ассоциативной памятью и др. Наиболее бурно в настоящее время развиваются когнитивные нейронные системы.

Гибридные системы. Фактически еще в 1990-е гг. начинается слияние двух направлений в искусственном интеллекте, приведшее к созданию различных гибридных вариантов ИС на основе объединения логической и нейронной парадигм. В начале 2000-х гг. гибридные ИС заняли ведущие позиции в сфере управления различными объектами бытовой, транспортной, промышленной, военной и космической техники. Например, широкое распространение получили программно-аппаратные нейробиологические средства, построенные на основе нейронных сетей и нечеткой логики. Встроенные программно-аппаратные реализации таких средств показали высокую эффективность при управлении бытовыми приборами (пылесосами, стиральными машинами, кухонными комбайнами), а также двигателями и тормозными системами автомобилей. Развитие ЭС тоже пошло по пути гибридизации. При построении современных ЭС, применяемых для диагностики, проектирования, поиска информации и управления, комплексно используются практически все интеллектуальные средства, логические, объектные и нейросетевые. Кроме того, фактически обозначился переход от чисто программной к программно-аппаратной реализации ИС на базе многопроцессорных компьютеров и даже массивно-параллельных вычислительных средств.

Перспективы. Можно предположить, что дальнейшее развитие искусственного интеллекта будет происходить в рамках совершенствования логических, нейросетевых и гибридных систем в плане обеспечения возможности решения задач без программирования за счет способности к обучению по примерам и самообучению по определенным критериям. Здесь на первый план может выйти распределенная архитектура ИС, предполагающая декомпозицию задач системы и их реализацию в объектном виде на связанных в сети вычислителях. Такая объектно-сетевая реализация ИС допускает самоорганизацию и возможность моделирования механизмов мозга на макро- и микроуровнях. Вероятно, превалирующим для моделирования **локальных процессов мозга** (восприятие сенсорной информации разных модальностей, формирование поведений разных уровней и их координированное исполнение различными эффекторами) окажется нейросетевой подход, с помощью которого проще решаются задачи обучения, самообучения и самоорганизации таких процессов. Моделирование **высших когнитивных процессов** (рассуждения, интуиции, эмоции и т.д.) может оказаться более доступным с использованием универсального объектно- сетевого подхода с применением обучаемых семантических и фреймовых сетевых моделей знаний. Однако и в этом случае принятие решений может быть организовано на нейромодулях с ассоциативным выводом, что может разрешить трудности, связанные со сложностью программирования при моделировании высших уровней мышления.

Несколько обособленными направлениями развития и практического применения интеллектуальных средств являются нейропротезирование, нейроморфные системы и системы с креативными компонентами. Нейропротезирование предполагает замену поврежденных участков нервной системы (например, оборванных нервов конечностей или участков спинного мозга) на искусственные нейросетевые модули, а также частичное

восстановление органов слуха или зрения с помощью встроенных модулей восприятия речи или видеоинформации. Нейроморфные системы начали развиваться в первой декаде 2000-х гг. как средство исследования глубоких процессов в нейронных структурах мозга путем их компьютерного моделирования. Исследование направлено на выявление возможностей создания новых типов нейроморфных вычислителей и систем с самообучением и самоорганизацией. **Креативность**, т.е. творческая направленность мышления, является важной способностью, которой пока не обладают искусственные когнитивные системы. Однако эта способность может быть полезной, например для автономных интеллектуальных роботов, которые исследуют неизвестные пространства и процессы, происходящие в них, и должны познавать новые свойства этих пространств. В плане создания таких средств автоматического исследования в настоящее время ведется разработка систем с креативными элементами, позволяющими обрабатывать большие массивы экспериментальных данных с целью выявления заложенных в них закономерностей или построения гипотез.

Самоорганизующиеся и самообучающиеся нейроморфные системы с когнитивными и креативными способностями могут быть названы системами искусственного разума, поскольку их мыслительные возможности будут близки к таковым у человеческого разума. Однако в настоящее время ряд исследователей высказывает серьезные опасения, предполагая, что бурное развитие искусственного интеллекта в перспективе приведет к созданию искусственного разума, значительно превышающего возможности человеческого разума, и предостерегают в связи с этим конец эры *Homo sapiens* [1]. Конечно, прогресс в этой области остановить невозможно, но чтобы исключить такой негативный для человечества вариант развития, потребуется ввести жесткий контроль, не допускающий использование систем искусственного разума против человеческого сообщества, и разработать соответствующие средства защиты. Это потребует глубокого понимания опасностей перспективных разработок в этой области и создания интеллектуальных средств прогнозирования и ликвидации возможных негативных последствий применений систем искусственного разума.

Далее рассмотрим процессы развития двух направлений искусственного интеллекта — символизма и коннективизма, и выделим основные результаты, достигнутые в этих направлениях.

1.2. Символизм

Развитие символистского направления берет свое начало в *логике*. Еще в 700-х гг. до н.э. древние ученые разработали сложную совокупность правил вида «если — то» для описания взаимосвязей явлений. Более 2000 лет назад великий Аристотель начал развивать традиционную логику. Много позднее, в 1640-х гг., Р. Декарт сделал первую попытку формализации знаний. Он доказывал, что эмпирическое знание может быть построено так же, как и математические теоремы, и разработал метод отбрасывания гипотез посредством последовательной проверки. Нужно отметить, что ранние логики рассматривали свою науку как конкретный вид исследования

мировых проблем. В рамках такого подхода было введено понятие **вывода** как процесса получения представления о том, что отсутствует, на основе того, чем мы владеем. При этом предполагалось, что каждый вывод влечет за собой скачок от неизвестного к известному. Кроме того, утверждалось, что вывод должен быть обязательно проверенным, чтобы исключить его возможную ошибочность.

Логика высказываний, развитая Дж. Булем и О. де Морганом, была первой формальной логической системой со строгой аксиоматикой. Однако основой для современного логического программирования, используемой при построении и работе со знаниями, явилась разработанная Г. Фреге в 1880-х гг. логика отношений, которая позднее была названа *логикой предикатов*. Дополненная методом интерпретации для доказательства теорем, разработанным в 1930-е гг. Ж. Эрбраном, логика предикатов позднее оказалась удобной для автоматического доказательства путем логического вывода [10].

С началом эры вычислительных машин ученые стали думать о создании машин, которые могли бы соперничать с человеком по интеллекту. Так, А. Тьюринг утверждал, что думающие машины должны не просто обрабатывать числа, а моделировать процессы рассуждений. Спор ученых о том, может ли машина мыслить, начатый еще в 1940-е гг., привел к попыткам создать машины, которые способны имитировать рассуждения путем реализации системы эвристик, построенной на основании исследований процессов мышления человека. Так родилось символистское направление в искусственном интеллекте.

Термин *«искусственный интеллект»* был впервые введен в 1956 г. на конференции в Дортмунде Дж. Маккарти, ученым из Массачусетского технологического института. Так формально утвердилось новое теоретическое направление в науке, позволившее в дальнейшем создавать думающие машины. Основаниями искусственного интеллекта были уже сформированные в это время логика предикатов и логическое программирование, алгоритмические модели рассуждений А. Тьюринга, логика продукций Э. Поста, функциональное программирование на основе λ -исчисления А. Чёрча.

Первые практические шаги по созданию *интеллектуальных систем* были сделаны американскими учеными. В 1962 г. Дж. Маккарти создал *язык функционального программирования Lisp*, удобный для решения многих сложных задач [23]. В 1965 г. группой ученых университета Карнеги-Меллон была разработана первая интеллектуальная система типа GPS (General Problem Solver) на эвристических правилах, использующая принципы логического вывода. Эта система была использована для решения многих задач по доказательству теорем и в модернизированном виде — для планирования при манипуляции и навигации интегральных роботов.

Концепция знаний получила официальное развитие в 1970-е гг., что привело к созданию *первой экспертной системы DENDRAL* (Стэнфордский университет, 1971 г.). В ней использовались знания в форме продукций, а программирование велось на Lisp. Далее последовали разработки ряда коммерческих экспертных систем: AMLInter (первая медицин-

ская система), MYCIN (медицинская система на неточных знаниях), PROSPECTOR (географическая система на неточных знаниях) и т.д.

В 1972 г. А. Кальмероер и Ф. Руссель, основываясь на работах Д. Робинсона, Л. Ковальски и др., разработали *язык логического программирования* Prolog, который в разных модификациях широко используется и сейчас для написания интеллектуальных программ [10]. Его успех и эффективное применение для разработок интеллектуальных систем были обусловлены применением мощного интерпретатора логических программ, основанного на методе резолюции Робинсона, простотой программирования и возможностью быстро создавать действующие прототипы интеллектуальных систем.

Представление знаний в виде *семантических сетей и фреймов*, которое начало успешно использоваться также в 1970-х гг., явилось основой для разработки интеллектуальных систем, работающих с естественными языками, понятиями и смысловой информацией, сложными сценами, структурированными знаниями. Особое значение в дальнейшем приобрело представление знаний в виде фреймов, предложенных М. Минским в 1975 г., поскольку это была уже объектно-сетевая форма знаний [11].

Развитие в 1980-е гг. *объектно-ориентированного программирования* позволило создавать интеллектуальные системы со сложными базами знаний, имеющими сетевую структуру, в которой носителем и интерпретатором знаний был объект, объединяющий данные, правила их связывания и процедуры их обработки. Такой подход является принципиально универсальным и позволяет преодолеть ограниченные возможности фреймовых систем.

Создание таких *объектно-ориентированных языков*, как CLOS (Common Lisp Object Sistem), LOOPS (Lisp Oriented Object Programming Sistem) и др., специально ориентированных на работу со знаниями, позволяет разрабатывать в настоящее время объектные ИС с очень сложной структурой знаний, адекватно отображающей реальные миры, в которых должны функционировать системы. Еще большее обобщение при работе со знаниями, вероятно, может дать *концептуальное программирование*, основы которого также заложены в 1980-е гг.

Значительный толчок в разработке логических интеллектуальных систем дала японская программа ICOT, направленная на создание *ЭВМ 5-го поколения*. Начиная с 1981 г. японские ученые в рамках указанной программы начали разработку усовершенствованных версий Prolog и спец-процессоров для работы с ними. Несмотря на то, что конечные цели создания ЭВМ на принципах искусственного интеллекта не были достигнуты, работы в рамках данной программы привели к разработке и внедрению чрезвычайно мощных аппаратно-программных средств логического программирования.

Следует отметить пионерскую разработку обучающейся интеллектуальной системы EURISCO (1985) на метазнаниях, позволяющих в процессе работы формировать новые знания в определенной предметной области. Эта работа относится к проблеме обучения машин, которая является ключевой при создании *когнитивных логических систем*, т.е. логических

интеллектуальных систем с самообучением. Однако до сих пор разработчики таких систем в рамках символистского направления наталкиваются на серьезные трудности и не вышли в своей работе за пределы эксперимента.

Как показывают многолетние исследования, практически необходимые интеллектуальные системы символистского плана могут быть реализованы только на суперкомпьютерах или специализированных компьютерах, включающих Prolog- или Lisp-машины. В настоящее время для реализации объектного подхода в искусственном интеллекте разрабатываются специальные объектные ЭВМ с огромным числом процессоров и сетевой организацией. Один из таких компьютеров, относящихся к машинам с массивно-параллельной архитектурой, был разработан в 1987 г. Дж. Хиллисом и назван *connection machine* (машиной связности). Он позволял аппаратно реализовать объектные интеллектуальные системы на семантических сетях. Предполагалось, что такой подход сможет дать новый толчок развитию интеллектуальных систем.

Развитие символистского направления в искусственном интеллекте связано с упомянутыми в этом параграфе исследователями, описание вкладов которых в эту область науки можно найти в литературе [4].

1.3. Коннективизм

В рамках древней философии наряду с логикой начала развиваться и *биология* как наука, изучающая устройство живых организмов. Второе направление — *коннективистское* — начало развиваться благодаря успешному познанию биологами некоторых механизмов работы нервных систем животных и человека. Так, в 1836 г. биолог Я. Пуркинье открыл в мозжечке особые клетки (клетки Пуркинье) — первые разновидности нервных клеток, о которых узнали ученые. В 1873 г. К. Гольджи получил Нобелевскую премию за свой метод окрашивания нервных клеток и открытие аппарата Гольджи у нервных скоплений. Далее С. Рамон-и-Кахаль усовершенствовал метод Гольджи и провел исследование нервной системы, которое ообразил в труде «Гистология нервной системы человека и позвоночных». Наконец, в 1905 г. В. Вольдмеер ввел термин «нейрон» и обобщил нейрофизиологию клеток. В 1906 г. К. Гольджи и С. Рамон-и-Кахаль получили Нобелевскую премию по физиологии нервных ансамблей. Так в биологических науках утвердилась *нейронная доктрина*.

Первую работу по *нейрокибернетике*, т.е. моделированию *нейронных сетей* в технических системах, опубликовали в 1943 г. У. Маккаллок и У. Питтс статью «Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности», в которой представили модель сети из формальных нейронов, давшую начало массе исследований в этом направлении. Так, в 1949 г. была предложена модель Хебба, раскрывающая процесс обучения нейросетей, а в 1945 г. — модель Ферли — Кларка, дающая формальную картину процесса условно-рефлекторной деятельности.

В 1956 г. Ф. Розенблатт в основополагающем труде «Принципы нейродинамики» описал разработанный им перцептрон и дал его теоретическое

обоснование [14]. Это была первая слоистая модель нейронной сети, которая могла решать задачу распознавания образов. Бурное изучение персептрона происходило в 1960—1970-е гг., но это не дало хороших практических результатов, поскольку еще недостаточно были изучены механизмы работы мозга и не были развиты соответствующие технологии производства элементной базы для моделирования нейросетей.

Импульсные модели нейронов и сетей, описанные С. Дейчем в 1970 г., хотя и были более близки к биологическим прототипам, чем модели формальных нейронов, также не дали ожидаемых от них результатов.

Классик теории формальных нейросетей Э. Каньянело в 1975 г. в своих работах построил обобщенную модель функционирования нейросетей в виде систем нейроуравнений, описывающих процесс распространения активности по сети, и мнемоуравнений, раскрывающих процесс обучения.

Новый толчок в теоретическом и практическом направлении развития нейрокибернетики дали работы Дж. Хопфилда, который в 1982 г. описал простую аналоговую модель нейросети на операционных усилителях и разработал новый подход в формализации таких моделей на основе физико-математической теории спиновых стекол [9]. Модель Хопфилда оказалась настолько привлекательной, что на ее основе стали разрабатываться сначала цифровые, а затем аналоговые СБИС, с помощью которых успешно решались многие практические задачи, трудно реализуемые на традиционных ЭВМ. В дальнейшем были разработаны стохастические варианты модели Хопфилда, среди которых можно выделить модель «машины Больцмана», которая быстрее обучалась и позволяла избежать недостатков детерминированного прототипа.

Развитие исследований клеточных процессов мозга привело в 1983 г. к разработке усовершенствованных нейробиологических моделей Палма. Эти модели позволили определить новые подходы к нейрокибернетике как кибернетическому моделированию работы мозга. В 1975 г. появилась довольно сложная нейронная модель Фукусима, которая была названа когнитроном [24]. Эта модель, имеющая много слоев и внутренние обратные связи, обеспечивала обучение без учителя и структурирование хранимой информации, что явилось первой попыткой получения, хранения и использования при решении задач знаний о строении сложных образов. В 1987 г. была опубликована коллективная работа ученых по модели параллельной распределенной обработки — PDP (Parallel Distribution Processing), обобщающая многие теоретические представления по нейросетям [9, 17].

Начало *нейромикроэлектронике* — теоретическому и практическому направлению по разработке и созданию аналоговых нейро-СБИС — было положено К. Мидом, который начиная с 1985 г. создал первые такие микросхемы: Retina Chip (БИС сетчатки) и Cochlea Chip (БИС улитки), а в 1989 г. опубликовал книгу «Аналоговые СБИС и нейронные системы», чем дал толчок ведущим фирмам по производству нейро-СБИС и успешной работе в этом направлении.

Начиная с 1988 г. появилась новая интегрированная наука — *нейроинформатика*, формирующая основы нейровычислений и обеспечивающая базу для создания *нейрокомпьютеров* — нового класса массивно-параллельных ЭВМ, способных решать задачи без программирования.

Разработка нейронных моделей для работы со структурированными знаниями, таких как неокогнитрон, а также медиаторных моделей, таких как ART-3, способных к самообучению и адаптации к среде, привели к рождению новой парадигмы искусственного интеллекта — *когнитивно-нейронной*, развивающей коннективистское направление.

Коннективистское направление в искусственном интеллекте основывается на использовании идеи связывания большого количества элементов для построения ассоциативных сетей, позволяющих эффективно накапливать и использовать знания для решения задач классификации, аппроксимации и др. В настоящее время это направление имеет мощную теоретическую базу, построенную на биологических моделях функционирования нервной системы, в частности нейронных структур мозга, теории формальных нейронов, динамических моделях нейросетей, описываемых разнообразными системами нейро- и мнемоуравнений, методах структурированного представления знаний в ассоциативных сетях с иерархической структурой, методах обучения ассоциативных сетей и др. Достижению значительных практических результатов в плане создания нейросетевых аппаратно-программных средств и решения с их помощью ряда важных задач способствовали скачкообразное развитие в последние годы технологии СБИС и успехи аналоговой нейромикрoэлектроники.

Нейросетевые аппаратно-программные средства в виде нейро-СБИС цифрового и аналогового типов, нейроплат-сопроцессоров в составе обычных компьютеров, специализированных и универсальных нейрокомпьютеров, программного обеспечения для моделирования нейросетей и операционных систем нейрокомпьютеров начали создаваться с середины 1980-х гг. Были созданы первые нейрокомпьютеры и нейроплаты к персональным компьютерам, такие как MARK-III и MARK-IV, MAN-40, PC-9801, ANZA, PD7281 и др.

Все это были первые шаги к разработке *ЭВМ 6-го поколения*, программа создания которых была объявлена в 1987 г. (BRAIN, HFSP). В 1990-е гг. нейропроцессоры и комплектные нейрокомпьютеры стали разрабатывать и продавать практически все ведущие компьютерные фирмы. Так, *IBM* выпустила в продажу цифровую СБИС ZISCO-36, на которой были разработаны несколько вариантов нейроплат, *Siemens* — нейро-СБИС MA-16, нейроплату SYNAPSEC2*PS и нейрокомпьютер Synapse-1, *HNC* — нейрокомпьютер SNAP, *INTEL* — аналоговую нейро-СБИС ETANN. Заметим, что серия уже упомянутых суперкомпьютеров *Connection machine*, выпущенная по заказу военного ведомства США в 1990-е гг., частично предназначалась для решения задач нейросетевыми методами.

Нужно отметить, что еще в 1987 г. К. Мид объявил программу «Аналоговые нейромикрo-ЭВМ», в рамках которой предполагалось создать «искусственный геном» на кремниевой вафле, емкостью 10^8 транзисторов и быстродействием 10^{13} оп/с. Далее предполагалось перейти к созданию «кремниевых нервных систем» и нейропротезированию, что свидетельствует об огромных возможностях этого подхода. Одним из вариантов аппаратной реализации нейрокомпьютеров является использование так называемых мокрых нейрочипов, в которых решающими элементами явля-

ются биологические нейросети, соединенные с электронной частью чипа. Исследования в этом направлении активно проводятся в настоящее время и имеют целью создание гибридных кибернетических систем на основе объединения биологических и электронных средств.

Новым направлением в коннективизме стало развитие *нейроморфных систем*, при разработке которых используются результаты исследования глубоких процессов в нейронных структурах мозга. Основными элементами таких систем являются неформальные нейроны, модели которых разрабатывались на основе полученных знаний о структуре и функционировании биологических нейронов. На их основе строятся модели биологических нейросетей, соответствующих разным отделам коры мозга (мозжечку, гиппокампу и пр.). Начиная с 2005 г. такие системы создаются и исследуются путем компьютерного моделирования. В настоящее время наметился переход от моделирования простых нейронных колонок, содержащих около 100 связанных в сеть нейронов, к сложным сетям, содержащим более 1 млн нейронов. Такое моделирование пока возможно только на самых мощных суперкомпьютерах и направлено на выявление возможностей таких биологических структур в плане создания новых типов нейроморфных вычислителей. Предполагается, что в дальнейшем эти вычислители могут быть реализованы аппаратно, что даст мощный толчок развитию вычислительных средств.