

УДК 004.89(075.8)

ББК 32.813я73

Б79

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Данчул А.Н.,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Информационные технологии в управлении»  
Российской Академии Государственной службы  
при Президенте РФ;

**Комаров М.А.,**

доктор технических наук, доктор экономических наук,  
профессор кафедры «Экономика и информационные системы»  
Московского государственного университета  
приборостроения и информатики

**Болотова Л.С.**

Б79 Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник. — М.: Финансы и статистика, 2023. — 664 с.: ил.

ISBN 978-5-00184-097-8

В учебнике представлено систематизированное изложение основ теории представления знаний в системах искусственного интеллекта (СИИ). Дается описание наиболее значимых в настоящее время моделей и технологических аспектов проектирования систем, основанных на знаниях (СОЗ). Особое внимание уделено проблемам инженерии знаний в СОЗ, а в качестве основного подхода к их решению рассматривается авторский метод ситуационного анализа и проектирования модели предметной области (БАЗЫ ЗНАНИЙ).

Для студентов и аспирантов специальностей, связанных с изучением СИИ, интеллектуальных информационных систем, научных работников, а также для всех интересующихся вопросами построения и применения СИИ.

УДК 004.89(075.8)

ББК 32.813я73

© Болотова Л.С., 2012, 2023

© ООО «Издательство «Финансы и статистика», 2023

ISBN 978-5-00184-097-8

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Предисловие</b> .....	13
<b>Список принятых сокращений</b> .....	20
<b>Введение</b> .....	22
Глава 1	
<b>Основные понятия ИИ</b> .....	35
1.1. Классификация задач, решаемых человеком .....	35
1.2. Основные понятия и определения .....	37
1.3. Знание как система .....	39
1.4. Свойства знаний .....	41
1.5. Знание как знаковая система .....	43
1.5.1. Естественный язык как средство описания знаний ....	43
1.5.2. Знак и его свойства .....	43
1.5.3. Знаковые ситуации .....	45
1.5.4. Знаковые системы .....	47
1.5.5. Виды знаков .....	48
1.6. Модель предметной области как знаковая система .....	50
1.7. Процедура решения задачи .....	53
1.8. Примеры решения задач .....	54
Пример 1. Об обезьяне и бананах .....	54
Пример 2. О наполнении ведра водой .....	57
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	59
Глава 2	
<b>Методы поиска решений в пространстве состояний</b> .....	60
2.1. Пространство состояний .....	60
2.2. Метод полного перебора в ширину .....	62
2.3. Метод полного перебора в глубину .....	64
2.4. Эвристические методы поиска в пространстве состояний ....	65
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	68

## Глава 3

<b>Решение задач методом разбиения на подзадачи</b> .....	69
3.1. Представление задачи в виде И/ИЛИ графа .....	70
3.2. Механизм сведения задачи к подзадачам .....	71
3.3. Пример решения задачи .....	74
3.4. Достоинства и недостатки методов поиска в пространстве состояний .....	76
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	79

## Глава 4

<b>Модели представления знаний</b> .....	82
4.1. Классификация моделей представления знаний .....	83
4.2. Формальные модели представления знаний .....	83
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	85

## Глава 5

<b>Модель представления знаний в исчислении высказываний</b> . . .	86
5.1. Понятие «высказывание» .....	86
5.2. Алфавит ИВ .....	87
5.3. Синтаксис ИВ .....	89
5.4. Аксиомы ИВ .....	90
5.4.1. Семантика ИВ .....	90
5.4.2. Законы преобразования формул ИВ .....	91
5.4.3. Базовые аксиомы ИВ .....	92
5.5. Правила вывода .....	93
5.6. Логический вывод в ИВ .....	95
5.6.1. Нормальные формы .....	95
5.6.2. Логический вывод в ИВ .....	98
5.7. Свойства ИВ как аксиоматической системы .....	100
5.8. Алгоритмическая проблема разрешения в ИВ .....	102
5.9. Теорема дедукции .....	103
5.10. Принцип дедукции .....	105
5.11. Принцип резолюций .....	107
5.12. Свойства метода резолюций .....	109
5.13. Пример построения модели предметной области в ИВ .....	112
<i>Упражнения</i> .....	115

## Глава 6

<b>Исчисление предикатов как метод представления знаний</b> . . . .	117
6.1. Понятие предиката . . . . .	117
6.2. Алфавит ИП . . . . .	119
6.3. Синтаксис ИП . . . . .	120
6.4. Базовые аксиомы ИП . . . . .	121
6.5. Правила вывода в ИП . . . . .	122
6.6. Примеры предикатов . . . . .	122
6.7. Преобразование формул в ИП . . . . .	124
6.8. Стандартизация переменных . . . . .	126
6.9. Исклечение квантора существования . . . . .	127
6.10. Предваренная форма . . . . .	128
6.11. Исклечение кванторов общности . . . . .	129
6.12. Приведение матрицы к КНФ . . . . .	129
6.13. Подстановки и унификация . . . . .	131
6.14. Логический вывод в ИП . . . . .	133
6.15. Примеры применения метода резолюций в ИП . . . . .	135
6.16. Стратегии резолюции . . . . .	138
6.17. Дерево опровержения . . . . .	140
6.18. Пример построения модели предметной области в ИП . . . . .	143
<i>Упражнения</i> . . . . .	146

## Глава 7

<b>Продукционная модель представления знаний</b> . . . . .	147
7.1. Форма представления знаний . . . . .	147
7.2. Продукционная модель знаний . . . . .	148
7.3. Механизм вывода в продукционной системе знаний . . . . .	151
7.4. Стратегии управления выводом решения . . . . .	152
7.5. Взаимодействие правил в процессе рассуждений . . . . .	156
7.6. Эвристические принципы управления правилами . . . . .	162
7.7. Достоинства и недостатки продукционной модели . . . . .	163
7.8. Пример работы механизма продукционной модели . . . . .	165
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> . . . . .	171

## Глава 8

<b>Представление знаний в виде семантической сети</b> . . . . .	174
8.1. Общие понятия и определения . . . . .	174

8.2. Роль отношений в СС .....	177
8.3. Свойства отношений .....	179
8.4. Предикатные семантические сети .....	181
8.5. Атрибутивные семантические сети .....	185
8.6. Вывод на семантических сетях .....	187
8.7. Исторические примеры СС .....	191
8.8. Методика построения предикатной СС .....	198
8.9. Достоинства и недостатки семантических сетей .....	200
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	201

## Глава 9

<b>Представление знаний в виде фреймов</b> .....	202
9.1. Фрейм, его структура и свойства .....	203
9.2. Вывод на фреймах .....	206
9.3. Методика построения модели предметной области в виде сети фреймов .....	209
9.4. Достоинства и недостатки фреймового представления .....	211
9.5. Гибридные модели представления знаний .....	211
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	213

## Глава 10

<b>Представление нечетких знаний</b> .....	214
10.1. Общие понятия .....	214
10.2. Нечеткие множества .....	215
10.3. Операции над нечеткими множествами .....	220
10.4. Отношения и операции над ними .....	226
10.5. Нечеткие отношения .....	229
10.6. Лингвистическая переменная .....	233
10.7. Нечеткий вывод .....	235
10.8. Нечеткая импликация .....	237
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	238

## Глава 11

<b>Псевдофизическая логика времени</b> .....	240
11.1. Свойства времени .....	240
11.2. Модель времени .....	243
11.2.1. Точечные события .....	243
11.2.2. Интервальные события .....	244
11.2.3. Логика вывода .....	246

11.3. Пример реализации ПЛВ .....	250
11.3.1. Модель временных отношений .....	251
11.3.2. Архитектура системы .....	251
11.3.3. Структура нечеткой нейронной сети .....	251
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	254
Глава 12	
<b>Неточные рассуждения на основе фактора уверенности</b> .....	255
12.1. Стэндфордская модель фактора уверенности .....	255
12.2. Байесовская модель субъективной вероятности .....	259
12.3. Байесовская сеть представления и вывода вероятностных знаний .....	261
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	265
Глава 13	
<b>Экспертные системы</b> .....	267
13.1. Архитектура .....	267
13.2. Эволюция ЭС .....	269
13.3. Стадии разработки ЭС .....	272
13.4. Фазы разработки ЭС .....	273
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	276
Глава 14	
<b>Нечёткие экспертные системы</b> .....	278
14.1. Архитектура нечетких систем .....	278
14.2. Пример работы нечеткой ЭС .....	288
14.3. Пакеты нечеткой логики .....	294
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	302
Глава 15	
<b>Инженерия знаний в интеллектуальных системах</b> .....	304
15.1. Методы инженерии знаний .....	304
15.1.1. Теоретические аспекты получения знаний .....	305
15.1.2. Методы извлечения явных знаний .....	307
15.1.3. Методы выявления скрытых знаний .....	313
15.2. Проблемы структурирования знаний .....	315
15.3. Проблема сборки знаний в единую модель предметной области .....	317
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	318

## Глава 16

<b>Методологические и теоретические основы ситуационного анализа и проектирования модели предметной области</b> .....	319
16.1. Базовые идеи .....	319
16.2. Ситуационная абстракция и ее свойства .....	319
16.3. Семиотический подход к описанию объектов управления и моделирования .....	321
16.4. Метод ситуационного управления .....	323
16.5. Методология концептуального анализа и проектирования .....	324
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	327

## Глава 17

<b>Метод ситуационного анализа и проектирования модели предметной области</b> .....	328
17.1. Концептуальная структура единичного решения .....	329
17.2. Концептуальная модель предметной области .....	334
17.2.1. Операции над КСЕР .....	335
17.2.2. Взаимодействие концептуальных структур единичных решений .....	345
17.3. Концептуальная модель предметной области .....	348
17.4. Особенности элементов знания КМПРО .....	352
17.5. Схема технологии проектирования КМПРО .....	354
17.6. Система приобретения знаний «Помощник Эксперта» ....	356
17.7. Инструментальная система «Малый Решатель Проблем» .....	364
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	366

## Глава 18

<b>Онтологии и онтологические системы</b> .....	368
18.1. Понятие онтологии .....	368
18.2. Формальная модель онтологии .....	371
18.3. Формальная модель онтологической системы .....	373
18.4. Технология проектирования онтологий .....	375
18.5. Виды онтологий .....	376
18.6. Операции над онтологиями .....	378
18.6.1. Операции по редактированию .....	379
18.6.2. Алгебра онтологий .....	380

18.6.3. Операции по интеграции онтологий .....	381
18.6.4. Операции декомпозиции и агрегирования .....	383
18.6.5. Операции по преобразованию .....	383
18.6.6. Операции по сравнению, проверке и оценке .....	384
18.7. Основные задачи, решаемые с помощью онтологии .....	385
18.8. Инструменты инженерии онтологий .....	390
18.9. Методология инженерии знаний в онтологических системах .....	393
18.9.1. Требования к онтологиям .....	393
18.9.2. Методологии организации знаний в онтологиях ....	398
18.10. Проектирование онтологий в среде Protégé .....	401
18.10.1. Описание среды Protégé .....	401
18.10.2. Реализация онтологии для системы управления инцидентами .....	404
<i>Вопросы для самопроверки и упражнения</i> .....	418
Глава 19	
<b>Введение в многоагентные системы</b> .....	420
19.1. Понятие агента .....	422
19.2. Окружение агентов .....	425
19.3. Архитектуры агентов .....	426
19.3.1. Общая классификация архитектур .....	426
19.3.2. Архитектуры, основанные на знаниях .....	426
19.3.3. Архитектуры на основе планирования .....	428
19.4. Языки программирования агентов .....	432
19.4.1. Требования к языкам программирования агентов ...	432
19.4.2. Классификация языков программирования агентов .....	434
19.5. Многоагентные системы .....	436
19.6. Коммуникации между агентами .....	437
19.7. Архитектура многоагентных систем .....	440
19.7.1. Архитектура взаимодействия системы агентов ....	440
19.7.1.1. Одноуровневая архитектура взаимодействия агентов .....	441
19.7.1.2. Иерархическая архитектура взаимодействия агентов .....	442
19.7.2. Протоколы и языки координации .....	443
19.8. Проблемы построения многоагентных систем .....	444

19.9. Пример разработки МАС .....	445
19.9.1. Постановка задачи .....	445
19.9.2. Концептуальный анализ поведения агентов .....	445
19.9.3. Концептуальная модель задачи «Фастфуд» .....	448
19.9.4. Вспомогательные агенты .....	449
19.9.5. Программная реализация в среде Jason .....	450
19.9.5.1. Убеждения .....	452
19.9.5.2. Цели .....	452
19.9.5.3. Планы .....	453
19.9.6. Исследование работоспособности МАС .....	454
19.10. Советы .....	460
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	461
Глава 20	
<b>Системы когнитивного моделирования</b> .....	464
20.1. Сущность когнитивного моделирования .....	464
20.2. Когнитивная модель: определение и структура .....	466
20.2.1. Когнитивная карта ситуации .....	466
20.2.2. Моделирование и сценарии функционирования когнитивной модели .....	468
20.2.3. Методика когнитивного анализа проблемных ситуаций .....	470
20.3. Пример системы когнитивного моделирования .....	476
20.3.1. Методика работы с экспертами .....	478
20.3.2. Разработка сценариев .....	486
20.4. Программная реализация когнитивной модели .....	490
20.4.1. Общие сведения о программном комплексе «Канва» .....	490
20.4.2. Исследование сценариев .....	492
20.5. Применение когнитивных технологий .....	505
Глава 21	
<b>Машинное обучение и интеллектуальный анализ данных</b> .....	507
21.1. Проблемы обучения КС .....	507
21.2. Обучение с учителем и без учителя .....	508
21.3. Типы закономерностей .....	510
21.4. Типы моделей обучения .....	512
21.5. Методы извлечения знаний из данных .....	513
21.6. Интеллектуальный анализ данных – Data Mining .....	515

21.6.1. Кластеризация .....	516
21.6.2. Классификация .....	525
21.6.3. Ассоциация .....	528
21.6.4. Аналитическая платформа Deductor .....	531
21.6.5. Интеллектуальный анализ данных в системе поддержки принятия решений для противодействия распространению эпидемий .....	539
21.6.5.1. Проблема противодействия распространению эпидемий .....	539
21.6.5.2. Структура системы противодействия эпидемиям гриппа .....	541
21.6.5.3. Подготовка исходных данных .....	543
21.6.5.4. Интеллектуальный анализ данных .....	550
21.6.5.5. Моделирование развития эпидемии гриппа ..	557
21.7. Правдоподобные рассуждения .....	569
21.7.1. Эмпирические данные, модели, зависимости и гипотезы .....	569
21.7.2. Индукция .....	570
21.7.3. Роль дедукции .....	572
21.7.4. Фальсифицируемость .....	577
21.7.5. Повторяемость и абдукция .....	578
21.7.6. Формализация ППВ .....	580
21.7.6.1. Формализация дедуктивного рассуждения ..	581
21.7.6.2. Формализация индуктивного рассуждения ..	582
21.7.6.3. Формализация абдуктивного рассуждения ..	585
21.7.6.4. Формализация рассуждения по аналогии ..	587
21.8. Метод ДСМ .....	590
Вопросы для самопроверки и упражнения .....	600
<b>Литература .....</b>	<b>605</b>
<b>Приложение А .....</b>	<b>616</b>
А.1. Фрагмент множества КСЕР системы администрирования Интернет-кафе .....	616
А.2. Фрагмент множества КСЕР системы управления интеллектуальным домом .....	619
А.3. Фрагмент множества КСЕР системы управления муниципальным образованием .....	621

<b>Приложение В</b> .....	624
В.1. Фрагмент понятийно-объектной модели системы управления интеллектуальным домом .....	624
В.2. Фрагмент понятийно-объектной модели системы управления муниципальным образованием .....	629
<b>Приложение С</b> .....	633
С.1. Фрагмент БАЗЫ ЗНАНИЙ системы администрирования Интернет-кафе .....	633
С.2. Фрагмент БАЗЫ ЗНАНИЙ системы управления интеллектуальным домом .....	635
С.3. Фрагмент БАЗЫ ЗНАНИЙ системы управления муниципальным образованием .....	636
<b>Приложение D</b> .....	640
D.1. Описание системы управления инцидентами .....	640
D.2. Механизм управления инцидентами .....	640
D.3. Концептуальная модель подсистемы «Почта» ИТИ КСУ .....	644
D.4. Методика построения событийных моделей инцидентов .....	645
D.5. Фрагмент концептуальных моделей почтовых инцидентов .....	647
<b>Приложение E</b> .....	654
E.1. Концептуальные структуры единичных решений для МАС «ФАСТФУД» .....	654