

---

# Содержание

<b>Предисловие</b>	<b>19</b>
Добро пожаловать в четвертое издание!	19
Что нового в этом издании	21
Содержание книги	22
Использование книги	24
Дополнительный материал, доступный через Internet	25
Благодарности	25
<b>Часть I. Искусственный интеллект: его истоки и проблемы</b>	<b>27</b>
Попытка дать определение искусственному интеллекту	27
<b>Глава 1. Искусственный интеллект: история развития и области приложения</b>	<b>29</b>
1.1. Отношение к интеллекту, знанию и человеческому мастерству	29
1.1.1. Историческая подоплека	30
1.1.2. Развитие логики	32
1.1.3. Тест Тьюринга	35
1.1.4. Биологические и социальные модели интеллекта: агенты	38
1.2. Обзор прикладных областей искусственного интеллекта	42
1.2.1. Ведение игр	43
1.2.2. Автоматические рассуждения и доказательство теорем	43
1.2.3. Экспертные системы	44
1.2.4. Понимание естественных языков и семантическое моделирование	46
1.2.5. Моделирование работы человеческого интеллекта	47
1.2.6. Планирование и робототехника	48
1.2.7. Языки и среды ИИ	49
1.2.8. Машинное обучение	50
1.2.9. Альтернативные представления: нейронные сети и генетические алгоритмы	51
1.2.10. Искусственный интеллект и философия	52
1.3. Искусственный интеллект — заключительные замечания	53
1.4. Резюме и дополнительная литература	54
1.5. Упражнения	55
<b>Часть II. Искусственный интеллект как представление и поиск</b>	<b>57</b>
Введение в представление знаний	58
Обработка знаний, выраженных в качественной форме	61
Логическое получение новых знаний из набора фактов и правил	62

Отображение общих принципов наряду с конкретными ситуациями	63
Передача сложных семантических значений	63
Рассуждения на метауровне	65
Решение задачи методом поиска	66
Альтернативные схемы представления	70
<b>Глава 2. Исчисление предикатов</b>	<b>73</b>
2.0. Введение	73
2.1. Исчисление высказываний	73
2.1.1. Символы и предложения	73
2.1.2. Семантика исчисления высказываний	75
2.2. Основы исчисления предикатов	77
2.2.1. Синтаксис предикатов и предложений	78
2.2.2. Семантика исчисления предикатов	83
2.2.3. Значение семантики на примере “мира блоков”	87
2.3. Правила вывода в исчислении предикатов	89
2.3.1. Правила вывода	89
2.3.2. Унификация	92
2.3.3. Пример унификации	96
2.4. Приложение: финансовый советник на основе логики	100
2.5. Резюме и дополнительная литература	103
2.6. Упражнения	104
<b>Глава 3. Структуры и стратегии поиска в пространстве состояний</b>	<b>107</b>
3.0. Введение	107
3.1. Теория графов	110
3.1.1. Структуры данных для поиска в пространстве состояний	110
3.1.2. Представление задачи в пространстве состояний	112
3.2. Стратегии поиска в пространстве состояний	118
3.2.1. Поиск на основе данных и от цели	118
3.2.2. Реализация поиска на графах	121
3.2.3. Поиск в глубину и в ширину	124
3.2.4. Поиск в глубину с итерационным заглублением	131
3.3. Представление рассуждений в пространстве состояний на основе исчисления предикатов	132
3.3.1. Описание пространства состояний логической системы	132
3.3.2. Графы И/ИЛИ	133
3.3.3. Примеры и приложения	135
3.4. Резюме и дополнительная литература	145
3.5. Упражнения	146
<b>Глава 4. Эвристический поиск</b>	<b>149</b>
4.0. Введение	149
4.1. Алгоритм эвристического поиска	153
4.1.1. “Жадный” алгоритм поиска	153
4.1.2. Функции эвристической оценки состояний	156
4.1.3. Эвристический поиск и экспертные системы	163
4.2. Допустимость, монотонность и информированность	164

4.2.1. Мера допустимости	165
4.2.2. Монотонность	166
4.2.3. Информированные эвристики	167
4.3. Использование эвристик в играх	169
4.3.1. Процедура минимакса на графах, допускающих полный перебор	169
4.3.2. Минимакс при фиксированной глубине поиска	171
4.3.3. Процедура альфа-бета-усечения	175
4.4. Проблемы сложности	178
4.5. Резюме и дополнительная литература	181
4.6. Упражнения	181
<b>Глава 5. Управление поиском и его реализация в пространстве состояний</b>	<b>185</b>
5.0. Введение	185
5.1. Рекурсивный поиск	186
5.1.1. Рекурсия	186
5.1.2. Рекурсивный поиск	187
5.2. Поиск по образцу	190
5.2.1. Пример рекурсивного поиска: вариант задачи хода конем	191
5.2.2. Усовершенствование алгоритма поиска по образцу	194
5.3. Продукционные системы	196
5.3.1. Определение и история развития	196
5.3.2. Примеры продукционных систем	200
5.3.3. Управление поиском в продукционных системах	205
5.3.4. Преимущества продукционных систем для ИИ	211
5.4. Архитектура “классной доски”	212
5.5. Резюме и дополнительная литература	215
5.6. Упражнения	216
<b>Часть III. Представление и разум в ракурсе искусственного интеллекта</b>	<b>219</b>
Представление и интеллект	219
<b>Глава 6. Представление знаний</b>	<b>225</b>
6.0. Вопросы представления знаний	225
6.1. Краткая история схем представления ИИ	226
6.1.1. Ассоционистские теории смысла	226
6.1.2. Ранние работы в области семантических сетей	230
6.1.3. Стандартизация сетевых отношений	232
6.1.4. Сценарии	237
6.1.5. Фреймы	241
6.2. Концептуальные графы: сетевой язык	245
6.2.1. Введение в теорию концептуальных графов	245
6.2.2. Типы, экземпляры и имена	246
6.2.3. Иерархия типов	249
6.2.4. Обобщение и специализация	250
6.2.5. Пропозициональные узлы	253
6.2.6. Концептуальные графы и логика	253
6.3. Альтернативы явному представлению	255

6.3.1. Гипотезы Брукса и категориальная архитектура	256
6.3.2. Архитектура Sorusat	259
6.4. Агентно-ориентированное и распределенное решение проблем	261
6.4.1. Агентно-ориентированное решение задач: определение	262
6.4.2. Примеры и проблемы агентно-ориентированной парадигмы	264
6.5. Резюме и дополнительная литература	266
6.6. Упражнения	269
<b>Глава 7. Сильные методы решения задач</b>	<b>273</b>
7.0. Введение	273
7.1. Обзор технологии экспертных систем	275
7.1.1. Разработка экспертных систем, основанных на правилах	275
7.1.2. Выбор задачи и процесс инженерии знаний	276
7.1.3. Концептуальные модели и их роль в приобретении знаний	279
7.2. Экспертные системы, основанные на правилах	282
7.2.1. Продукционная система и решение задач на основе цели	282
7.2.2. Объяснения и прозрачность при рассуждениях на основе цели	286
7.2.3. Использование продукционной системы для рассуждений на основе данных	287
7.2.4. Эвристики и управление в экспертных системах	290
7.3. Рассуждения на основе моделей, на базе опыта и гибридные системы	292
7.3.1. Введение в рассуждения на основе модели	292
7.3.2. Рассуждения на основе моделей: пример NASA	296
7.3.3. Введение в рассуждения на основе опыта	299
7.3.4. Гибридные системы: достоинства и недостатки систем с сильными методами	303
7.4. Планирование	307
7.4.1. Введение	307
7.4.2. Использование макросов планирования: STRIPS	311
7.4.3. Адаптивное планирование	316
7.4.4. Планирование: пример NASA	318
7.5. Резюме и дополнительная литература	321
7.6. Упражнения	322
<b>Глава 8. Рассуждения в условиях неопределенности</b>	<b>325</b>
8.0. Введение	325
8.1. Абдуктивный вывод, основанный на логике	327
8.1.1. Логика немонотонных рассуждений	327
8.1.2. Системы поддержки истинности	331
8.1.3. Логики, основанные на минимальных моделях	336
8.1.4. Множественное покрытие и логическая абдукция	338
8.2. Абдукция: альтернативы логическому подходу	341
8.2.1. Неточный вывод на основе фактора уверенности	342
8.2.2. Рассуждения с нечеткими множествами	344
8.2.3. Теория доказательства Демпстера–Шафера	350
8.3. Стохастический подход к описанию неопределенности	354
8.3.1. Байесовские рассуждения	355
8.3.2. Байесовские сети доверия	359

8.4. Резюме и дополнительная литература	365
8.5. Упражнения	367
<b>Часть IV. Машинное обучение</b>	<b>369</b>
Символьное, нейросетевое и эмерджентное обучение	369
<b>Глава 9. Машинное обучение, основанное на символьном представлении информации</b>	<b>371</b>
9.0. Введение	371
9.1. Символьное обучение	374
9.2. Поиск в пространстве версий	380
9.2.1. Операция обобщения и пространство понятий	380
9.2.2. Алгоритм исключения кандидата	381
9.2.3. Программа LEX: индуктивное изучение эвристик поиска	388
9.2.4. Обсуждение алгоритма исключения кандидата	391
9.3. Индуктивный алгоритм построения дерева решений ID3	392
9.3.1. Построение дерева решений сверху вниз	394
9.3.2. Выбор свойств на основе теории информации	396
9.3.3. Анализ алгоритма ID3	398
9.3.4. Вопросы обработки данных для построения дерева решений	399
9.4. Индуктивный порог и возможности обучения	400
9.4.1. Индуктивный порог	400
9.4.2. Теория изучаемости	403
9.5. Знания и обучение	405
9.5.1. Алгоритм Meta-DENDRAL	406
9.5.2. Обучение на основе объяснения	407
9.5.3. Алгоритм EBL и обучение на уровне знаний	411
9.5.4. Обоснование по аналогии	412
9.6. Обучение без учителя	415
9.6.1. Научная деятельность и обучение без учителя	415
9.6.2. Концептуальная кластеризация	417
9.6.3. Программа COB-WEB и структурные таксономические знания	419
9.7. Обучение с подкреплением	424
9.7.1. Компоненты обучения с подкреплением	425
9.7.2. Пример: снова “крестики-нолики”	427
9.7.3. Алгоритмы вывода и их применение к обучению с подкреплением	429
9.8. Резюме и ссылки	431
9.9. Упражнения	432
<b>Глава 10. Машинное обучение на основе связей</b>	<b>435</b>
10.0. Введение	435
10.1. Основы теории сетей связей	437
10.1.1. Ранняя история	437
10.2. Обучение перцептрона	439
10.2.1. Алгоритм обучения перцептрона	439
10.2.2. Пример: использование перцептронной сети для классификации образов	442
10.2.3. Обобщенное дельта-правило	445
10.3. Обучение по методу обратного распространения	448

10.3.1. Вывод алгоритма обратного распространения	448
10.3.2. Пример применения метода обратного распространения ошибки: система NETtalk	452
10.3.3. Применение метода обратного распространения для решения задачи “исключающего ИЛИ”	454
10.4. Конкурентное обучение	455
10.4.1. Алгоритм обучения “победитель забирает все” для задачи классификации	455
10.4.2. Сеть Кохонена для изучения прототипов	457
10.4.3. Нейроны Гроссберга и сети встречного распространения	459
10.5. Синхронное обучение Хебба	462
10.5.1. Введение	462
10.5.2. Пример алгоритма обучения Хебба без учителя	463
10.5.3. Обучение Хебба с учителем	466
10.5.4. Ассоциативная память и линейный ассоциатор	467
10.6. Аттракторные сети (сети “ассоциативной памяти”)	471
10.6.1. Введение	471
10.6.2. Двухнаправленная ассоциативная память	472
10.6.3. Примеры обработки данных в сети ДАП	475
10.6.4. Автоассоциативная память и сети Хопфилда	477
10.7. Резюме и дополнительная литература	481
10.8. Упражнения	482
<b>Глава 11. Машинное обучение на основе социальных и эмерджентных принципов</b>	<b>483</b>
11.0. Социальные и эмерджентные модели обучения	483
11.1. Генетические алгоритмы	485
11.1.3. Два примера: описание задачи в конъюнктивной нормальной форме и задача коммивояжера	488
11.1.4. Обсуждение генетического алгоритма	491
11.2. Системы классификации и генетическое программирование	495
11.2.1. Системы классификации	495
11.2.2. Программирование с использованием генетических операторов	500
11.3. Искусственная жизнь и эмерджентное обучение	505
11.3.1. Игра “Жизнь”	506
11.3.2. Эволюционное программирование	509
11.3.3. Пример эмерджентности	511
11.4. Резюме и дополнительная литература	515
11.5. Упражнения	516
<b>Часть V. Дополнительные вопросы решения задач искусственного интеллекта</b>	<b>519</b>
Автоматические рассуждения и естественный язык	519
<b>Глава 12. Автоматические рассуждения</b>	<b>521</b>
12.0. Введение в слабые методы доказательства теорем	521
12.1. Система решения общих задач и таблицы отличий	522
12.2. Доказательство теорем методом резолюции	528
12.2.1. Введение	528

12.2.2. Построение дизъюнктивной формы для опровержения разрешения	530
12.2.3. Процедура доказательства на основе бинарной резолюции	533
12.2.4. Стратегии и методы упрощения резолюции	538
12.2.5. Извлечение ответов в процессе опровержения	543
12.3. Язык PROLOG и автоматические рассуждения	546
12.3.1. Введение	546
12.3.2. Логическое программирование и язык PROLOG	547
12.4. Дополнительные вопросы автоматических рассуждений	552
12.4.1. Единое представление для реализации слабых методов решения	552
12.4.2. Альтернативные правила вывода	555
12.4.3. Стратегии поиска и их использование	557
12.5. Резюме и дополнительная литература	558
12.6. Упражнения	559
<b>Глава 13. Понимание естественного языка</b>	<b>561</b>
13.0. Проблема понимания естественного языка	561
13.1. Разбор языка: символичный анализ	564
13.1.1. Введение	564
13.1.2. Стадии анализа языка	565
13.2. Синтаксический анализ	567
13.2.1. Спецификация и синтаксический анализ с использованием контекстно-свободных грамматик	567
13.2.2. Анализаторы на основе сети переходов	569
13.2.3. Иерархия Хомского и контекстно-зависимые грамматики	573
13.3. Синтаксис и знания в ATN-анализаторах	576
13.3.1. Анализаторы на основе расширенных сетей переходов	576
13.3.2. Объединение знаний о синтаксисе и семантике	580
13.4. Стохастический подход к анализу языка	585
13.4.1. Введение	585
13.4.2. Подход на основе марковских моделей	586
13.4.3. Подход на основе дерева решений	588
13.4.4. Грамматический анализ и другие приложения стохастического подхода	590
13.5. Приложения задачи анализа естественного языка	592
13.5.1. Обучение и ответы на вопросы	592
13.5.2. Интерфейс для базы данных	592
13.5.3. Извлечение информации и системы автоматического резюмирования для Web	596
13.5.4. Использование алгоритмов обучения для обобщения извлеченной информации	598
13.6. Резюме и дополнительная литература	598
13.7. Упражнения	600
<b>Часть VI. Языки и технологии программирования для искусственного интеллекта</b>	<b>603</b>
Обзор языков PROLOG и LISP	606
PROLOG	606
LISP	607
Выбор языка реализации	608

<b>Глава 14. Введение в PROLOG</b>	<b>609</b>
14.0. Введение	609
14.1. Синтаксис для программирования логики предикатов	610
14.1.1. Представление фактов и правил	610
14.1.2. Создание, изменение и мониторинг среды PROLOG	614
14.1.3. Списки и рекурсия в языке PROLOG	615
14.1.4. Рекурсивный поиск в языке PROLOG	618
14.1.5. Использование оператора отсечения для управления поиском в языке PROLOG	620
14.2. Абстрактные типы данных в PROLOG	622
14.2.1. Стек	622
14.2.2. Очередь	624
14.2.3. Приоритетная очередь	624
14.2.4. Множество	625
14.3. Пример продукционной системы на языке PROLOG	626
14.4. Разработка альтернативных стратегий поиска	631
14.4.1. Поиск в глубину с использованием списка <code>closed</code>	631
14.4.2. Поиск в ширину в языке PROLOG	633
14.4.3. Реализация “жадного” алгоритма поиска на языке PROLOG	634
14.5. Реализация планировщика на языке PROLOG	636
14.6. Метаяпредикаты, типы и подстановки унификации в языке PROLOG	639
14.6.1. Металогические предикаты	639
14.6.2. Типы данных в языке PROLOG	640
14.6.3. Унификация, механизм проверки соответствия предикатов и оценка	643
14.7. Метаинтерпретаторы в языке PROLOG	646
14.7.1. Введение в метаинтерпретаторы: PROLOG в языке PROLOG	646
14.7.2. Оболочка для экспертной системы на основе правил	649
14.7.3. Семантические сети в языке PROLOG	657
14.7.4. Фреймы и схемы в языке PROLOG	659
14.8. Алгоритмы обучения в PROLOG	661
14.8.1. Поиск в пространстве версий языка PROLOG	661
14.8.2. Алгоритм исключения кандидата	666
14.8.3. Реализация обучения на основе пояснения на языке PROLOG	668
14.9. Обработка естественного языка на PROLOG	671
14.9.1. Семантические представления для обработки естественного языка	671
14.9.2. Рекурсивный анализатор на языке PROLOG	672
14.9.3. Рекурсивный анализатор на основе семантических сетей	675
14.10. Резюме и дополнительная литература	678
14.11. Упражнения	680
<b>Глава 15. Введение в LISP</b>	<b>685</b>
15.0. Введение	685
15.1. LISP: краткий обзор	686
15.1.1. Символьные выражения как синтаксическая основа LISP	686
15.1.2. Управление оцениванием в LISP: функции <code>quote</code> и <code>eval</code>	689
15.1.3. Программирование на LISP: создание новых функций	690
15.1.4. Управление программой в LISP: условия и предикаты	692

15.1.5. Функции, списки и символьные вычисления	694
15.1.6. Списки как рекурсивные структуры	696
15.1.7. Вложенные списки, структуры и рекурсия <code>car-cdr</code>	698
15.1.8. Связывание переменных с помощью функции <code>set</code>	701
15.1.9. Определение локальных переменных с помощью функции <code>let</code>	703
15.1.10. Типы данных в Common LISP	705
15.2. Поиск в LISP: функциональный подход к решению задачи переправы человека, волка, козы и капусты	706
15.3. Функции и абстракции высшего порядка	711
15.3.1. Отображения и фильтры	711
15.3.2. Функциональные аргументы и лямбда-выражения	713
15.4. Стратегии поиска в LISP	714
15.4.1. Поиск в ширину и в глубину	714
15.4.2. “Жадный” алгоритм поиска	717
15.5. Проверка соответствия шаблонам LISP	718
15.6. Рекурсивная функция унификации	720
15.7. Интерпретаторы и внедренные языки	724
15.8. Логическое программирование на языке LISP	727
15.8.1. Простой язык логического программирования	727
15.8.2. Потoki и их обработка	729
15.8.3. Интерпретатор для задач логического программирования на основе потоков	731
15.9. Потoki и оценивание с задержкой	736
15.10. Оболочка экспертной системы на LISP	739
15.10.1. Реализация факторов достоверности	740
15.10.2. Архитектура оболочки <code>lisp-shell</code>	741
15.10.3. Классификация с использованием оболочки <code>lisp-shell</code>	744
15.11. Семантические сети и наследование в LISP	746
15.12. Объектно-ориентированное программирование с использованием CLOS	749
15.12.1. Определение классов и экземпляров в CLOS	751
15.12.2. Определение родовых функций и методов	753
15.12.3. Наследование в CLOS	755
15.12.4. Пример: моделирование термостата	756
15.13. Обучение в LISP: алгоритм ID3	761
15.13.1. Определение структур с помощью функции <code>defstruct</code>	761
15.13.2. Алгоритм ID3	767
15.14. Резюме и дополнительная литература	772
15.15. Упражнения	773
<b>Часть VII. Эпилог</b>	<b>777</b>
Рассуждения о природе интеллекта	777
<b>Глава 16. Искусственный интеллект как эмпирическая проблема</b>	<b>779</b>
16.0. Введение	779
16.1. Искусственный интеллект: пересмотренное определение	781
16.1.1. Интеллект и гипотеза о физической символьной системе	781
16.1.2. Коннекционистские, или нейросетевые, вычислительные системы	786

16.1.3. Агенты, интеллект и эволюция	789
16.2. Теория интеллектуальных систем	792
16.2.1. Ограничения психологии	793
16.2.2. Вопросы эпистемологии	795
16.2.3. Внедренный исполнитель и экзистенциальный разум	801
16.3. Искусственный интеллект: текущие задачи и будущие направления	803
16.4. Резюме и дополнительная литература	807
<b>Библиография</b>	<b>809</b>
<b>Алфавитный указатель авторов</b>	<b>841</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>848</b>