

*Посвящается моей семье – Дорис, Эдгару и Диане –  
за их безграничную любовь и поддержку*

# Оглавление

Предисловие от издательства .....	11
Вступительное слово .....	12
Предисловие .....	14
Благодарности .....	18
Список сокращений, принятых в книге .....	20
Условные математические обозначения, используемые в книге .....	23
<b>Часть I. Теоретические основы .....</b>	<b>25</b>
<b>Глава 1. Введение.....</b>	<b>26</b>
1.1 Неопределенность.....	26
1.1.1 Воздействие неопределенности .....	26
1.2 Краткая история .....	27
1.3 Основные вероятностные модели .....	28
1.3.1 Пример .....	31
1.4 Вероятностные графовые модели .....	33
1.5 Представление, логический вывод и обучение .....	35
1.6 Приложения .....	37
1.7 Обзор содержимого книги .....	38
1.8 Материалы для дополнительного чтения .....	39
Ссылки на источники .....	39
<b>Глава 2. Теория вероятностей .....</b>	<b>41</b>
2.1 Введение .....	41
2.2 Основные правила .....	43
2.3 Случайные переменные .....	45
2.3.1 Двумерные случайные переменные .....	49
2.4 Теория информации .....	50
2.5 Материалы для дополнительного чтения .....	53
2.6 Задания и упражнения .....	53
Ссылки на источники .....	54
<b>Глава 3. Теория графов.....</b>	<b>56</b>
3.1 Определения.....	56
3.2 Типы графов .....	57
3.3 Пути и циклы .....	58
3.4 Изоморфизм графов .....	60
3.5 Деревья.....	60
3.6 Клики .....	63
3.7 Полное упорядочивание.....	64
3.8 Алгоритмы упорядочивания и триангуляции .....	66
3.8.1 Поиск паросочетания максимальной мощности.....	66
3.8.2 Дополнение графа .....	66

3.9	Материалы для дополнительного чтения.....	67
3.10	Задания и упражнения.....	68
	Ссылки на источники.....	69
<b>Часть II. Вероятностные модели.....</b>		<b>71</b>
<b>Глава 4. Байесовские классификаторы .....</b>		<b>72</b>
4.1	Введение .....	72
4.1.1	Оценки классификатора.....	73
4.2	Байесовский классификатор.....	74
4.2.1	Наивный байесовский классификатор.....	75
4.3	Другие модели: TAN, BAN .....	79
4.4	Частично наивные байесовские классификаторы.....	80
4.5	Многомерные байесовские классификаторы.....	84
4.5.1	Многомерные классификаторы на основе байесовских сетей.....	85
4.5.2	Байесовские классификаторы на основе цепи.....	86
4.6	Иерархическая классификация .....	88
4.6.1	Оценка цепного пути.....	89
4.7	Приложения .....	91
4.7.1	Визуальное определение кожи человека на изображениях.....	91
4.7.2	Выбор лекарственных средств для лечения вируса иммунодефицита человека.....	94
4.8	Материалы для дополнительного чтения.....	96
4.9	Задания и упражнения .....	96
	Ссылки на источники.....	97
<b>Глава 5. Скрытые марковские модели .....</b>		<b>100</b>
5.1	Введение .....	100
5.2	Марковские цепи.....	101
5.2.1	Оценка параметров.....	104
5.2.2	Сходимость.....	105
5.3	Скрытые марковские модели .....	106
5.3.1	Вычисление оценки.....	109
5.3.2	Оценка состояния.....	111
5.3.3	Обучение.....	114
5.3.4	Расширения .....	116
5.4	Приложения .....	118
5.4.1	Алгоритм PageRank.....	118
5.4.2	Распознавание жестов .....	119
5.5	Материалы для дополнительного чтения.....	122
5.6	Задания и упражнения .....	122
	Ссылки на источники.....	123
<b>Глава 6. Марковские случайные поля .....</b>		<b>125</b>
6.1	Введение .....	125
6.2	Марковские сети.....	127
6.2.1	Регулярные марковские случайные поля.....	129

6.3	Случайные поля Гиббса .....	130
6.4	Логический вывод .....	131
6.5	Оценка параметров .....	133
6.5.1	Оценка параметров с помощью данных с метками .....	134
6.6	Условные случайные поля.....	135
6.7	Приложения .....	137
6.7.1	Сглаживание изображений.....	137
6.7.2	Расширенная аннотация изображений .....	139
6.8	Материалы для дополнительного чтения .....	142
6.9	Задания и упражнения .....	143
	Ссылки на источники.....	144
<b>Глава 7. Байесовские сети: представление и логический вывод .....</b>		<b>146</b>
7.1	Введение.....	146
7.2	Представление .....	147
7.2.1	Структура .....	148
7.2.2	Параметры.....	152
7.3	Логический вывод.....	158
7.3.1	Односвязные сети: алгоритм распространения доверия.....	160
7.3.2	Многосвязные сети .....	165
7.3.3	Приближенный логический вывод.....	174
7.3.4	Наиболее вероятное объяснение .....	177
7.3.5	Непрерывные переменные .....	178
7.4	Приложения.....	180
7.4.1	Валидация информации .....	180
7.4.2	Анализ надежности.....	185
7.5	Материалы для дополнительного чтения .....	187
7.6	Задания и упражнения.....	188
	Ссылки на источники.....	189
<b>Глава 8. Байесовские сети: обучение.....</b>		<b>191</b>
8.1	Введение .....	191
8.2	Обучение параметров .....	191
8.2.1	Сглаживание.....	192
8.2.2	Неопределенность параметров.....	192
8.2.3	Недостаточный объем данных.....	194
8.2.4	Дискретизация.....	198
8.3	Обучение структуры .....	200
8.3.1	Обучение дерева.....	200
8.3.2	Обучение полидерева.....	203
8.3.3	Методики поиска с оценкой.....	204
8.3.4	Методики проверки независимости .....	211
8.4	Объединение экспертных знаний и имеющихся данных .....	212
8.5	Приложения .....	213
8.5.1	Модель загрязнения воздуха в Мехико-сити .....	214
8.6	Материалы для дополнительного чтения .....	217

8.7 Задания и упражнения .....	217
Ссылки на источники .....	219
<b>Глава 9. Динамические и временные байесовские сети.....</b>	<b>221</b>
9.1 Введение .....	221
9.2 Динамические байесовские сети .....	222
9.2.1 Логический вывод.....	223
9.2.2 Обучение.....	224
9.3 Временные сети событий .....	226
9.3.1 Байесовские сети с временными узлами.....	226
9.4 Приложения .....	233
9.4.1 Динамические байесовские сети: распознавание жестов .....	233
9.4.2 Байесовская сеть с временными узлами: прогнозирование вариантов мутаций ВИЧ .....	238
9.5 Материалы для дополнительного чтения.....	242
9.6 Задания и упражнения.....	242
Ссылки на источники .....	243
<b>Часть III. Модели принятия решений.....</b>	<b>245</b>
<b>Глава 10. Графы принятия решений .....</b>	<b>246</b>
10.1 Введение.....	246
10.2 Теория принятия решений.....	247
10.2.1 Основы теории принятия решений.....	247
10.3 Деревья решений.....	251
10.4 Диаграммы влияния.....	254
10.4.1 Моделирование.....	254
10.4.2 Оценка.....	256
10.4.3 Расширения.....	261
10.5 Приложения.....	262
10.5.1 Медработник, принимающий теоретические решения .....	262
10.6 Материалы для дополнительного чтения .....	266
10.7 Задания и упражнения.....	266
Ссылки на источники .....	268
<b>Глава 11. Марковские процессы принятия решений.....</b>	<b>269</b>
11.1 Введение.....	269
11.2 Моделирование .....	270
11.3 Вычисление оценки .....	273
11.3.1 Итерация значения .....	273
11.3.2 Итерация стратегии .....	274
11.4 Факторизованные марковские процессы принятия решений.....	275
11.4.1 Абстракция.....	277
11.4.2 Декомпозиция.....	278
11.5 Частично наблюдаемые марковские процессы принятия решений .....	279
11.6 Приложения.....	280
11.6.1 Управление электростанцией.....	280

11.6.2	Согласование задач робота.....	283
11.7	Материалы для дополнительного чтения.....	289
11.8	Задания и упражнения.....	289
	Ссылки на источники.....	291
<b>Часть IV. Реляционные и причинно-следственные модели.....</b>		<b>293</b>
<b>Глава 12. Реляционные вероятностные графовые модели.....</b>		<b>294</b>
12.1	Введение.....	294
12.2	Логика.....	296
12.2.1	Логика высказываний.....	296
12.2.2	Логика предикатов первого порядка.....	297
12.3	Вероятностные реляционные модели.....	300
12.3.1	Логический вывод.....	302
12.3.2	Обучение.....	302
12.4	Марковские логические сети.....	302
12.4.1	Логический вывод.....	305
12.4.2	Обучение.....	305
12.5	Приложения.....	306
12.5.1	Моделирование студента.....	306
12.6	Вероятностная реляционная модель студента.....	307
12.6.1	Визуальные грамматики.....	310
12.7	Материалы для дополнительного чтения.....	312
12.8	Задания и упражнения.....	313
	Ссылки на источники.....	314
<b>Глава 13. Графовые причинно-следственные модели.....</b>		<b>316</b>
13.1	Введение.....	316
13.2	Причинно-следственные байесовские сети.....	318
13.3	Обоснование причин.....	320
13.3.1	Прогноз.....	320
13.3.2	Контрфактуальный анализ.....	322
13.4	Обучение причинно-следственных моделей.....	323
13.5	Приложения.....	325
13.5.1	Обучение причинно-следственной модели для синдрома дефицита внимания и гиперактивности.....	325
13.6	Материалы для дополнительного чтения.....	327
13.7	Задания и упражнения.....	327
	Ссылки на источники.....	328
<b>Словарь терминов.....</b>		<b>329</b>
<b>Предметный указатель.....</b>		<b>333</b>

# Предисловие от издательства

## Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com), зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com); при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу [http://dmkpress.com/authors/publish\\_book/](http://dmkpress.com/authors/publish_book/) или напишите в издательство по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

## Скачивание исходного кода примеров

Скачать файлы с дополнительной информацией для книг издательства «ДМК Пресс» можно на сайте [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com) на странице с описанием соответствующей книги.

## Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com), и мы исправим это в следующих тиражах.

## Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательства «ДМК Пресс» и Springer очень серьезно относятся к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

# Вступительное слово

Вероятностные графовые модели и методы их использования для разумных рассуждений и выводов в условиях неопределенности появились в 1980-х гг. в сообществах, занимающихся проблемами статистических выводов и искусственного интеллекта. Конференция по неопределенности в области искусственного интеллекта (UAI – Uncertainty in Artificial Intelligence) стала самым первым форумом, посвященным этой быстро развивающейся области исследований. На этой конференции UAI в 1992 году в Сан Хосе (San Jose) я впервые встретила Энрике Сукара (Enrique Sucar) – тогда мы оба были аспирантами, – он представлял свою работу по реляционным и временным (темпоральным) моделям для систем высокоуровневой обработки компьютерного зрения. За прошедшие с тех пор 25 лет Энрике внес впечатляющий вклад в эту область исследований: от фундаментальной работы по объективной вероятности до разработки усовершенствованных форм вероятностных графовых моделей, таких как временные байесовские сети и байесовские сети для вычисления вероятности событий, а также методики обучения вероятностных графовых моделей, например самая последняя работа Энрике по классификаторам типа байесовская цепь для многомерной классификации.

В настоящее время вероятностные графовые модели широко распространены как мощная и вполне сформировавшаяся методика для выполнения умозаключений и выводов в условиях неопределенности. В отличие от некоторых узкоспециализированных методик, применявшихся в ранних экспертных системах, вероятностные графовые модели основаны на строгих математических принципах теории графов и теории вероятностей. Их можно использовать для широкого диапазона задач, связанных с выводом и обоснованием результатов, в том числе задач прогнозирования, мониторинга, диагностики, оценки рисков и принятия решений. Существует множество эффективных алгоритмов как для логического вывода, так и для обучения, доступных в виде программного обеспечения с открытым исходным кодом и коммерческих программных продуктов. Более того, мощь и эффективность этих алгоритмов уже подтверждена их успешным практическим применением в огромном диапазоне областей задач реального окружающего нас мира. Энрике Сукар стал главным специалистом по практическому внедрению и утверждению вероятностных графовых моделей как эффективной и полезной технологии с учетом его работы в широком диапазоне прикладных областей. Это медицина, реабилитация и здравоохранение в целом, робототехника и машинное зрение, образование, анализ надежности и разнообразные промышленные приложения – от нефтедобычи до энергетики.



Первыми авторами, которые начали исследования байесовских сетей и с большим мастерством убедительно описали их в книгах, стали Джуда Перл (Judea Pearl) с книгой «Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems» и Рич Неаполитан (Rich Neapolitan) с книгой «Probabilistic Reasoning in Expert Systems». Предлагаемая читателям монография Энрике Сукара представляет собой своевременное дополнение к комплекту литературы, изданной после книг Перла и Неаполитана. Эта книга на современном уровне охватывает более широкий диапазон вероятностных графовых моделей, чем другие недавно опубликованные материалы в этой области: разнообразные классификаторы, скрытые марковские модели, марковские случайные поля, байесовские сети и их динамические, временные и причинно-следственные варианты, реляционные вероятностные графовые модели, графы решений и марковский процесс принятия решений. В книге представлены эти вероятностные графовые модели и соответствующие методы логического вывода и обучения в ясном и доступном стиле. Поэтому издание подходит для студентов старших курсов и аспирантов, а также для ученых-исследователей и инженеров-практиков, работающих в других отраслях и интересующихся применением вероятностных моделей. В этой книге Энрике делится своим богатым опытом, накопленным в процессе активной практической работы в области использования вероятностных графовых моделей, и демонстрирует примеры их применения в разнообразных областях реальной деятельности: от биоинформатики до задач наблюдения за загрязнением воздуха и распознавания объектов. Я искренне поздравляю Энрике с выходом этой книги и настоятельно рекомендую ее будущим читателям.

Энн Е. Николсон,  
Мельбурн, Австралия,  
май 2015 года

# Предисловие

## О чем эта книга

Вероятностные графовые модели уже превратились в мощный набор методик, используемых в нескольких предметных областях. В этой книге представлен общий вводный курс по вероятностным графовым моделям (probabilistic graphical models – PGM) с учетом их применения в инженерных дисциплинах. Здесь подробно рассматриваются главные принципы основных классов вероятностных графовых моделей: байесовские классификаторы, скрытые марковские модели, байесовские сети, динамические и временные байесовские сети, марковские случайные поля, диаграммы влияния и марковские процессы принятия решений. Кроме того, описано представление, процесс логического вывода и принципы обучения для всех этих методик. В книге также рассматриваются реальные приложения для каждого типа модели.

Некоторые характерные особенности этой книги:

- основные классы вероятностных графовых моделей представлены в одной монографии в единой универсальной рабочей среде;
- книга охватывает основополагающие принципы: представление, процесс логического вывода и процесс обучения для всех методов;
- демонстрируются практические приложения различных методик для решения реальных задач, что весьма важно для студентов, аспирантов и инженеров-практиков;
- в книгу включены некоторые самые последние разработки в этой области, такие как многомерные байесовские классификаторы, реляционные графовые модели и причинно-следственные модели;
- к каждой главе прилагается ряд упражнений и заданий, которые могут послужить отправным пунктом для исследовательских и программных проектов.

Одна из целей этой книги – стимулирование практического приложения вероятностных графовых моделей к реальным задачам. Такой подход требует не только теоретических знаний о различных моделях и методиках, но также некоторого практического опыта и знания предметной области. Чтобы помочь профессионалам в различных областях получить некоторое углубленное представление об использовании вероятностных графовых моделей для решения практических задач, в книгу включено множество примеров применения разнообразных типов моделей для широкого диапазона предметных областей, в том числе:

- компьютерное зрение;
- биомедицинские приложения;
- промышленные приложения;
- извлечение информации;
- интеллектуальные обучающие системы;
- биоинформатика;
- приложения в области охраны окружающей среды;
- робототехника;
- взаимодействие человек–компьютер;
- проверка достоверности информации;
- уход за пациентами (медицина).

## Для кого предназначена эта книга

Эта книга может использоваться как учебное пособие для студентов последнего года обучения и аспирантов по курсу вероятностных графовых моделей для изучающих информатику, инженерное дело, физику и т. д. Книга также может служить справочником для профессионалов, которым необходимо применять вероятностные графовые модели в различных областях, и для всех, кто хочет овладеть основами применения этих методик.

Для чтения данной книги не требуется какой-либо особенной предварительной подготовки, тем не менее желательно знание основ теории вероятностей и статистики. Предполагается, что читатель обладает базовыми знаниями математики на уровне средней школы, а также имеет определенный уровень подготовки в области информатики и программирования. Упражнения и задания по программированию требуют некоторых знаний и практического опыта использования какого-либо языка программирования, например C, C++, Java, MATLAB и т. д.

## Упражнения и задания

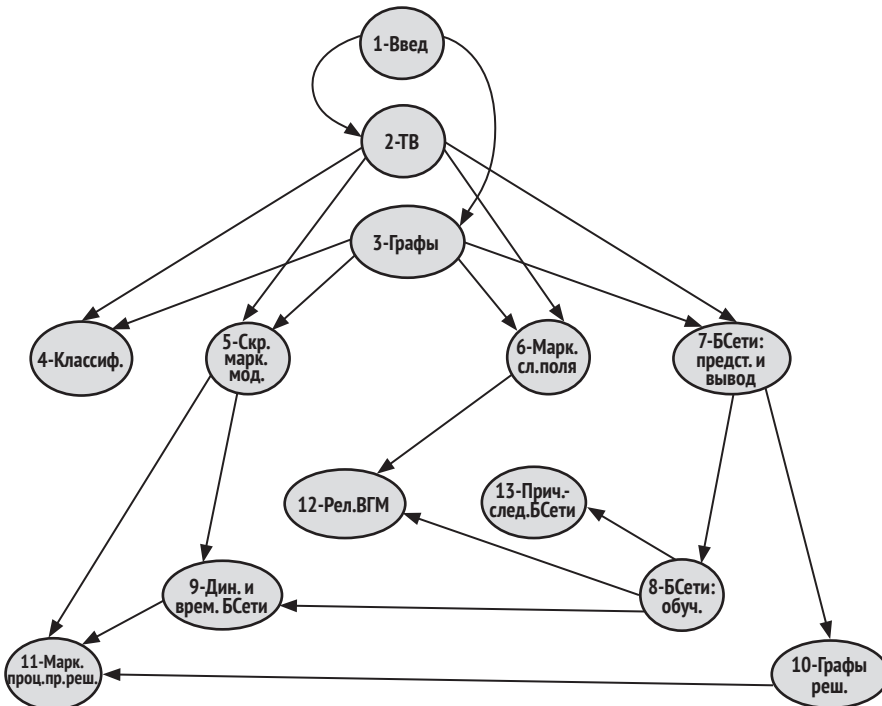
К каждой главе (за исключением введения) прилагается ряд упражнений и заданий. Некоторые из них являются вопросами и задачами, способствующими более глубокому пониманию концепций и методик, изложенных в соответствующей главе. Кроме того, в каждой главе предлагается несколько заданий, представляющих собой отправные пункты для исследовательских и программных проектов (такие задания отмечены тремя звездочками «\*\*\*»), которые могут использоваться как учебные курсовые проекты.

## Обзор содержимого книги

Книга разделена на четыре части. В первой части представлено общее введение и обоснование использования вероятностных графовых мо-

делей, приведены необходимые для чтения основы теории вероятностей и теории графов. Во второй части описываются модели, которые не считаются решениями или утилитами: байесовские классификаторы, скрытые марковские модели, марковские случайные поля, байесовские сети, динамические и временные байесовские сети. Третья часть начинается с краткого введения в теорию решений, затем рассматриваются модели с поддержкой принятия решений, включая деревья решений, диаграммы влияния и марковские процессы принятия решений. В четвертой части представлены два расширения стандартных вероятностных графовых моделей: реляционные вероятностные графовые модели и причинно-следственные вероятностные графовые модели.

Зависимости между содержанием глав показаны на рис. 1. Дуга от главы  $X$  к главе  $Y$ , т. е.  $X \rightarrow Y$ , означает, что изучение содержания главы  $X$  требуется (или, по меньшей мере, рекомендуется) для понимания главы  $Y$ . Такое графическое представление структуры книги дает немалый объем информации в аналоговом представлении о графовых моделях, которые будут рассматриваться в этой книге.



**Рис. 1.** Структура книги в виде направленного ациклического графа, показывающего, какие главы требуется изучить для перехода к следующим главам

По рис. 1 можно определить несколько различных способов чтения данной книги. В первую очередь рекомендуется прочитать введение и главы о математических основах 2 и 3. Затем более или менее незави-

симо друг от друга можно изучать различные модели в части II: классификацию (глава 4), скрытые марковские модели (глава 5), марковские случайные поля (глава 6) и байесовские сети (главы 7–9). Перед чтением главы об обучении байесовских сетей (глава 8) необходимо прочитать главу 7 – представление и логический вывод, кроме того, изучение обеих этих глав требуется перед переходом к динамическим и временным байесовским сетям.

Темы в частях III и IV требуют изучения некоторых глав из части II. Для чтения главы 10, в которой рассматриваются деревья решений и диаграммы влияния, вы должны как минимум прочитать первую главу по байесовским сетям. Перед чтением главы 11 о последовательном принятии решений рекомендуется изучить скрытые марковские модели, а также динамические и временные байесовские сети. Реляционные вероятностные графовые модели (глава 12) основаны на марковских случайных полях и байесовских сетях, поэтому требуется предварительное изучение глав 6 и 8. Наконец, причинно-следственные модели в главе 13 также основаны на байесовских сетях, включая методики их обучения.

Если в учебном курсе недостаточно времени для полного охвата материала всей книги, то можно предложить несколько альтернативных вариантов. Например, сосредоточиться на вероятностных моделях без рассмотрения теории принятия решений или более продвинутых расширений, т. е. изучать части I и II. Другой вариант – все внимание уделить моделям принятия решений, включая часть I, необходимые подготовительные главы из части II и часть III. Кроме того, вы можете запланировать курс по своему усмотрению, но непременно с учетом зависимостей, показанных на графе на рис. 1. Однако если вы располагаете достаточным временем и имеете серьезные намерения, то я предлагаю прочесть всю книгу в порядке глав. Желаю успеха.

*Луис Энрике Сукар (Luis Enrique Suca),*  
Пуэбла, Мексика,  
февраль 2015 г.

# Благодарности

Эта книга появилась на основе курса, который я читал в течение нескольких лет аспирантам. Сначала это был курс «Заключения и выводы в условиях неопределенности» (Uncertain Reasoning) в Монтеррейском технологическом институте (Tec de Monterrey) в г. Куэрनावака (Cuernavaca), затем он превратился в курс по вероятностным графовым моделям, когда я перешел в Национальный институт астрофизики, оптики и электроники (INAOE) в г. Пуэбла (Puebla) в 2006 году. В течение всех этих лет мои студенты являлись главным стимулом и источником вдохновения для написания этой книги. Я хочу поблагодарить всех своих студентов за их заинтересованность, за их вопросы и многочисленные поправки к моим заметкам. Книга посвящается всем моим студентам – прошлым, настоящим и будущим.

Я благодарен тем студентам, с которыми сотрудничал особенно тесно, обычно в течение небольшого интервала времени, при подготовке диссертаций для получения степени бакалавра, магистра или доктора. Некоторые из новейших аспектов этой книги и большинство примеров практических приложений взяты из их работ. Я благодарю всех этих студентов и ниже назову лишь тех, чьи работы оказали наибольшее влияние при создании рукописи данной книги: Густаво Арройо (Gustavo Arroyo), Эктор Уго Авилес (Héctor Hugo Avilés), Леонардо Чанг (Leonardo Chang), Рикардо Омар Чавес (Ricardo Omar Chávez), Франсиско Элисалде (Francisco Elizalde), Уго Хаир Эскаланте (Hugo Jair Escalante), Линдси Фидлер (Lindsey Fiedler), Джовани Гомес (Giovani Gómez), Карлос Эрнандес (Carlos Hernández), Пабло Эрнандес (Pablo Hernández), Ясмин Эрнандес (Yasmín Hernández), Пабло Ибаргюэнгойтия (Pablo Ibargüengoytia), Рохер Луис-Веласкес (Roger Luis-Velásquez), Мириам Мартинес (Miriam Martínez), Хосе Антонио Монтеро (José Antonio Montero), Хулиета Ногес (Julieta Noguez), Аннетте Моралес (Annette Morales), Хоакин Перес-Брито (Joaquín Pérez-Brito), Мигель Паласиос (Miguel Palacios), Мальинали Рамирес (Mallinali Ramírez), Альберто Рейес (Alberto Reyes), Андрес Родригес (Andrés Rodríguez), Элиас Руис (Elías Ruiz), Херардо Торрес-Толедано (Gerardo Torres-Toledano), и Хулио Сарагоца (Julio Zaragoza). Особая благодарность Линдси Фидлер (Lindsey Fiedler), которая помогла мне создать все иллюстрации к этой книге и проверила мой английский.

Я также благодарен моим сотрудникам, совместная исследовательская работа и технические дискуссии с которыми обогатили мои знания по многим темам и помогли написать эту книгу. Хотелось бы особенно отметить следующих коллег и друзей: Хуан Мануэль Ауацин (Juan Manuel Ahuactzin), Оливер Айкард (Olivier Aycard), Конча Биелса

(Concha Bielza), Роберто Лей Боррас (Roberto Ley Borrás), Кристина Кона-ти (Cristina Conati), Хавьер Диэс (Javier Díez), Уго Хаир Эскаланте (Hugo Jair Escalante), Данкан Жилль (Duncan Gillies), Хесус Гонсалес (Jesús González), Эдель Гарсиа (Edel García), Хессе Оэ (Jesse Hoey), Пабло Ибаргуэнгойтия (Pablo Ibarguengoytia), Педро Ларраньяга (Pedro Larrañaga), Рон Ледер (Ron Leder), Джим Литтл (Jim Little), Хосе Луис Маррокин (José Luis Marroquín), Оскар Майора (Oscar Mayora), Мануэль Монте (Manuel Montes), Эдуардо Моралес (Eduardo Morales), Энрике Муньос де Коте (Enrique Muñoz de Cote), Хулиета Ногэс (Julieta Noguez), Фелипе Ориуэ-ла (Felipe Orihuela), Луис Пинеда (Luis Pineda), Дэвид Пул (David Poole), Альберто Рейес (Alberto Reyes), Карлос Руиз (Carlos Ruiz), Сунил Вадера (Sunil Vadera) и Луис Вильясеньор (Luis Villaseñor). Я благодарю Эдель, Фелипе и Пабло за комментарии к некоторым первоначальным версиям книги. Спасибо Энн Николсон (Ann Nicholson) за превосходное вступительное слово.

Я благодарю за поддержку Национальный институт астрофизики, оптики и электроники (INAOE), предоставивший мне великолепную рабочую среду для исследовательской и преподавательской работы, а также обеспечивший возможность выделить часть моего времени для написания этой книги.

В последнюю по порядку, но не по важности очередь благодарю мою семью. Мои родители Фуэд (Fuhed†) и Аида (Aida) поощряли мое желание учиться и упорно работать, поддерживали мои научные занятия. Особенно мой отец, который написал несколько замечательных книг и вдохновил на писательскую деятельность (возможно, повлияли гены). Мой брат Рикардо (Ricardo) и сестры Шафия (Shafia) и Беатрис (Beatriz) всегда поддерживали и поощряли мои стремления и мечты. Особенная благодарность моей жене Дорис (Doris) и моим детям Эдгару (Edgar) и Диане (Diana), которые скучали в течение тех долгих часов, которые я посвятил книге, а не им. Их любовь и поддержка – это то, что позволяет мне двигаться дальше.

# Список сокращений, принятых в книге

ADD	Algebraic Decision Diagram	АДР	алгебраическая диаграмма решений
AI	Artificial Intelligence	ИИ	искусственный интеллект
BAN	Bayesian network Augmented Naive Bayes classifier	НБКБС	наивный байесовский классификатор, дополненный байесовской сетью
BCC	Bayesian Chain Classifier	БЦ	байесовская цепь (классификатор)
BCCD	Bayesian Constraint-based Causal Discovery	БПСА	байесовский причинно-следственный анализ с учетом ограничений
BN	Bayesian Network	БС	байесовская сеть
CBN	Causal Bayesian Network	ПСБС	причинно-следственная байесовская сеть
CMI	Conditional Mutual Information	УВИ	условная взаимная информация
CPT	Conditional Probability Table	ТУВ	таблица условных вероятностей
CRF	Conditional Random Field	УСП	условное случайное поле
DAG	Directed Acyclic Graph	НАГ	направленный ациклический граф
DBN	Dynamic Bayesian Network	ДБС	динамическая байесовская сеть
DBNC	Dynamic Bayesian Network Classifier	КДБС	классификатор на основе ДБС
DD	Decision Diagram	ДГР	диаграмма решений
DDN	Dynamic Decision Network	ДСР	динамическая сеть принятия решений
DT	Decision Tree	ДР	дерево решений
EC	Expected Cost	ОЗ	ожидаемые затраты
EM	Expectation Maximization		EM-алгоритм
FN	False Negative	ЛО	ложноотрицательный
FP	False Positive	ЛП	ложноположительный
GRM	Gibbs Random Field	СПГ	случайное поле Гиббса



HMM	Hidden Markov Model	СММ	скрытая марковская модель
ICM	Iterative Conditional Modes	ИУМ	итеративные условные методы (алгоритм)
ID	Influence Diagram	ДВ	диаграмма влияния
ILP	Inductive Logic Programming	ИЛП	индуктивное логическое программирование
KB	Knowledge Base	БЗ	база знаний
LIMID	Limited Memory Influence Diagram	ДВОП	диаграмма влияния с ограниченной памятью
MAG	Maximal Ancestral Graph	МНГ	максимальный наследственный граф
MAP	Maximum a Posteriori	ОАМ	оценка апостериорного максимума
MB	Markov Blanket	МО	марковское ограждение
MBC	Multidimensional Bayesian network Classifier	МБС	многомерная байесовская сеть (классификатор)
MC	Markov Chain	МЦ	марковская цепь
MDL	Minimum Description Length	ПМДО	принцип минимальной длины описания
MDP	Markov Decision Process	МППР	марковский процесс принятия решений
MLN	Markov Logic Network	МЛС	марковская логическая сеть
MN	Markov Network	МС	марковская сеть
MPE	Most Probable Explanation	НВО	наиболее вероятное объяснение (обоснование)
MRF	Markov Random Field	МСП	марковское случайное поле
NBC	Naïve Bayes Classifier	НБК	наивный байесовский классификатор
PAG	Parental Ancestral Graph	РНГ	родительский наследственный граф
PGM	Probabilistic Graphical Model	ВГМ	вероятностная графовая модель
PL	Pseudolikelihood	ПП	псевдоправдоподобие

POMDP	Partially Observable Markov Decision Process	ЧНМПР	частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений
PRM	Probabilistic Relational Model	ВРМ	вероятностная реляционная модель
RPGM	Relational Probabilistic Graphical Model	РВГМ	реляционная вероятностная графовая модель
SNBC	Semi-Naïve Bayesian Classifier	ЧНБК	частично наивный байесовский классификатор
TAN	Tree Augmented Naïve Bayes classifier	НБКД	наивный байесовский классификатор, дополненный деревом
TEN	Temporal Event Network	ВСС	временная сеть событий
TN	Temporal Node	ВУ	временной узел (сети)
TNBN	Temporal Nodes Bayesian Network	БСВУ	байесовская сеть с временными узлами

# Условные математические обозначения, используемые в книге

$T$	True (Истина)
$F$	False (Ложь)
$A, B, C, \dots$	Утверждения (бинарные/двоичные переменные)
$\neg A$	Не $A$ (отрицание)
$A \wedge B$	$A$ и $B$ (конъюнкция)
$A \vee B$	$A$ или $B$ (дизъюнкция)
$A \rightarrow B$	$B$ если $A$ (импликация)
$A \leftrightarrow B$	$A$ , если $B$ , и $B$ , если $A$ (двойная импликация)
$X \in A$	$X$ является элементом $A$
$\forall(X)$	Квантор всеобщности: для всех $X$
$\exists(X)$	Квантор существования: существует $X$
$C \cup D$	Объединение двух множеств
$C \cap D$	Пересечение двух множеств
$\Omega$	Пространство выборки
$X$	Случайная переменная
$x$	Конкретное значение случайной переменной, $X = x$
$\mathbf{X}$	Вектор случайных переменных, $\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_N$
$\mathbf{x}$	Конкретная реализация вектора $\mathbf{X}$ , $\mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_N$
$X_{1:T}$	Вектор переменной $X$ от $t = 1$ до $t = T$ , $X_{1:T} = X_1, X_2, \dots, X_T$
$P(X = x)$	Вероятность переменной $X$ , находящейся в состоянии $x$ ; сокращенно $P(x)$
$P(\mathbf{X} = \mathbf{x})$	Вероятность вектора $\mathbf{X}$ , находящегося в состоянии $\mathbf{x}$ ; сокращенно $P(\mathbf{x})$
$P(x, y)$	Вероятность $x$ и $y$
$P(x \vee y)$	Вероятность $x$ или $y$
$P(x   y)$	Условная вероятность $x$ при заданном $y$
$P(x) \sim y$	Вероятность $x$ пропорциональна $y$ , т. е. $P(x) = k \times y$
$\mathbf{P}(\mathbf{X})$	Кумулятивная функция распределения дискретной переменной $X$
$P(X)$	Функция вероятности дискретной переменной $X$
$F(X)$	Кумулятивная функция распределения непрерывной переменной $X$

$f(X)$	Функция плотности (распределения) вероятности непрерывной переменной $X$
$I(X, Y, Z)$	Переменная $X$ независима от $Z$ при заданной переменной $Y$
$G(V, E)$	Граф $G$ с множеством вершин $V$ и множеством ребер $E$
$Pa(X)$	Родители (предки) узла $X$ в направленном (ориентированном) графе
$Nei(X)$	Соседи узла $X$ в графе
$n!$	Факториал числа $n$ ; $n! = n \times (n - 1) \times (n - 2) \times \dots \times 1$
$\binom{n}{r}$	Число сочетаний из $r$ элементов множества $n$ ; $\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$
$exp(x)$	Экспоненциальная функция от $x$ ; $exp(x) = e^x$
$ X $	Размерность, или число состояний дискретной переменной $X$
$\mu$	Меана (среднее значение)
$\sigma^2$	Дисперсия случайной величины
$\sigma$	Среднеквадратическое (стандартное) отклонение
$N(\mu, \sigma^2)$	Нормальное распределение со средним значением $\mu$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma$
$I(m)$	Информация
$H(M)$	Энтропия
$E(X)$	Ожидаемое значение случайной переменной $X$
$ArgMax_x F(X)$	Значение переменной $X$ , при котором функция $F$ достигает максимума

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)