

# Оглавление

<b>Содержание</b>	<b>5</b>
<b>Введение</b>	<b>19</b>
<b>1 Основы функционального программирования</b>	<b>27</b>
1.1 История функционального программирования . . . . .	28
1.2 Основные свойства функциональных языков . . . . .	44
1.3 Типовые задачи, решаемые методами функционального программирования . . . . .	58
1.4 Конструирование функций . . . . .	69
1.5 Доказательство свойств функций . . . . .	86
<b>2 Базовые принципы языка Haskell</b>	<b>99</b>
2.1 Списки — основа функциональных языков . . . . .	100
2.2 Функции как описания процессов вычисления . . . . .	118
2.3 Типизация данных и функций . . . . .	131
2.4 Элементы программирования . . . . .	142
2.5 Модули и абстрактные типы данных . . . . .	153
<b>3 Классы и их экземпляры</b>	<b>164</b>
3.1 Параметрический полиморфизм данных . . . . .	165
3.2 Классы в языке Haskell как способ абстракции действительности .	170
3.3 Наследование и реализация . . . . .	180
3.4 Стандартные классы языка Haskell . . . . .	192
3.5 Сравнение с другими языками программирования . . . . .	207

<b>4</b>	<b>Монады — последовательное выполнение действий в функциональной парадигме</b>	<b>213</b>
4.1	Монада как тип-контейнер . . . . .	214
4.2	Последовательное выполнение действий . . . . .	222
4.3	Операции ввода/вывода в языке Haskell . . . . .	239
4.4	Стандартные монады языка Haskell . . . . .	252
4.5	Разработка собственных монад . . . . .	262
<b>5</b>	<b>Комбинаторная логика и <math>\lambda</math>-исчисление</b>	<b>273</b>
5.1	Основы комбинаторной логики . . . . .	274
5.2	Абстракция функций как вычислительных процессов . . . . .	288
5.3	$\lambda$ -исчисление как теоретическая основа функционального программирования . . . . .	298
5.4	Кодирование данных в $\lambda$ -исчислении . . . . .	307
5.5	Редукция и вычисления в функциональных языках . . . . .	315
<b>6</b>	<b>Трансляторы программ</b>	<b>331</b>
6.1	Математическая лингвистика . . . . .	331
6.2	Краткое введение в теорию построения трансляторов . . . . .	346
6.3	Реализация трансляторов на языке Haskell . . . . .	360
6.4	Библиотеки для создания трансляторов . . . . .	372
6.5	Частичные вычисления, трансформация программ и суперкомпиляция . . . . .	381
<b>7</b>	<b>Функциональное программирование и искусственный интеллект</b>	<b>395</b>
7.1	Основные задачи искусственного интеллекта . . . . .	396
7.2	Нечеткая математика и функциональное программирование . . . . .	407
7.3	Логический вывод на знаниях . . . . .	429
7.4	Общение с компьютером на естественном языке . . . . .	443
7.5	Перспективы функционального программирования . . . . .	454
	<b>Заключение</b>	<b>463</b>
	<b>Ответы на задачи для самостоятельного решения</b>	<b>465</b>
	Решения задач из главы 1 . . . . .	465

Решения задач из главы 2 . . . . .	467
Решения задач из главы 3 . . . . .	474
Решения задач из главы 4 . . . . .	477
Решения задач из главы 5 . . . . .	483
Решения задач из главы 6 . . . . .	488
<b>A Функциональные языки программирования и Интернет-ресурсы по функциональному программированию</b>	<b>496</b>
Функциональные языки программирования . . . . .	496
Русские Интернет-ресурсы . . . . .	502
Иностранные Интернет-ресурсы . . . . .	503
<b>B Опции различных сред разработки на языке Haskell</b>	<b>506</b>
Интегрированная среда разработки HUGS 98 . . . . .	506
Компилятор GHC . . . . .	510
Компилятор GHC . . . . .	523
Компилятор компиляторов Happy . . . . .	528
<b>C Описание стандартного модуля Prelude</b>	<b>531</b>
Функции . . . . .	531
Описание некоторых операторов языка Haskell . . . . .	586
<b>D Краткий словарь терминов из области функционального программирования</b>	<b>589</b>
<b>Литература</b>	<b>599</b>
Общая литература по функциональному программированию . . . . .	599
Книги, руководства и статьи по языку Haskell . . . . .	601
Комбинаторная логика и $\lambda$ -исчисление . . . . .	602
Математическая лингвистика и теория построения трансляторов . . . . .	603
Искусственный интеллект . . . . .	604

# Содержание

<b>Введение</b> .....	<b>19</b>
Краткая биография автора .....	21
О пользовании книгой .....	22
Состав и структура представления информации .....	24
Благодарности .....	26
Контактная информация .....	26
 <b>1 Основы функционального программирования</b> .....	<b>27</b>
<i>В этой главе рассматриваются основополагающие принципы функционального программирования как отдельного направления в математической науке и технологии создания программного обеспечения. Приводится история развития функционального программирования, описываются предпосылки его развития. В главе рассматривается больше теоретического материала, нежели практического, поэтому пока изложение ведется без рассмотрения синтаксиса языка Haskell. Однако для приведения примеров используется именно этот язык наряду с математическими формулами. Изложение знаний о языке Haskell начинается с главы 2.</i>	
<b>1.1 История функционального программирования</b> .....	<b>28</b>
<i>Краткая история развития теории функционального программирования в мире и в России. Разработка функциональных языков для подтверждения теоретических выкладок. Проблемы, с которыми столкнулись исследователи при разработке функциональных языков программирования. Современное состояние теории функционального программирования. Стандарт Haskell 98 как результат унификации и стандартизации процессов развития функционального программирования.</i>	
<i>Предпосылки создания функционального программирования</i> .....	<i>34</i>
<i>История языка Haskell</i> .....	<i>38</i>

Заключительные слова .....	42
1.2 Основные свойства функциональных языков .....	44
<i>Описание основных свойств функциональных языков программирования. Краткость и простота, строгая типизация, модульность, функциональные значения и объекты, чистота и отложенные вычисления. Понимание свойств функциональных языков на примере языка Haskell.</i>	
Краткость и простота .....	44
Строгая типизация .....	48
Модульность .....	50
Функции — это значения и объекты вычисления .....	51
Чистота (отсутствие побочных эффектов и детерминированность) .....	53
Отложенные (ленивые) вычисления .....	55
1.3 Типовые задачи, решаемые методами ФП .....	58
<i>Краткое описание семи типовых задач, которые решаются методами функционального программирования. Получение остаточной процедуры. Построение математического описания функций. Определение формальной семантики языка программирования. Описание динамических структур данных. Автоматическое построение «значительной» части программы по описанию структур данных, которые обрабатываются создаваемой программой. Доказательство наличия некоторого свойства программы. Эквивалентная трансформация программ.</i>	
Получение остаточной процедуры .....	60
Построение математического описания функций .....	62
Определение формальной семантики языка программирования .....	64
Описание динамических структур данных .....	64
Автоматическое построение функций по описанию структур данных .....	66
Доказательство наличия некоторого свойства программы .....	67
Эквивалентная трансформация программ .....	68
1.4 Конструирование функций .....	69
<i>Описание метода конструирования функций, предложенного Ч. Хоаром (синтаксически ориентированное конструирование). Метаязык для конструирования функций. Примеры определения типов и функций для обработки этих типов.</i>	
Декартово произведение .....	70
Размеченное объединение .....	71

Примеры определения типов данных .....	72
--	----

1.5 Доказательство свойств функций .....	86
--	----

*Задача доказательства свойств функций. Описание процесса доказательства свойств функций в зависимости от типа области определения функций. Примеры доказательства свойств функций.*

Область определения $D$ — линейно-упорядоченное множество .....	88
---	----

Множество $D$ определяется как индуктивный класс .....	89
--	----

Рассмотрение некоторых примеров доказательства свойств функций .....	91
--	----

Вопросы для самоконтроля .....	95
--------------------------------	----

Задачи для самостоятельного решения .....	97
---	----

<b>2 Базовые принципы языка Haskell .....</b>	<b>99</b>
---	-----------

*Глава посвящена введению в основные положения языка Haskell, приводится описание синтаксиса для решения основных задач по созданию отдельных функций и законченных модулей. Рассматриваются базовые объекты «список» и «функция» для изучения в рамках функционального программирования, а также их реализация на языке Haskell.*

2.1 Списки — основа функциональных языков .....	100
---	-----

*Понятие списка в функциональном программировании. Списки как основная структура для работы с функциональными языками. Базисные операции для работы со списками. Списки и списочные структуры. Программная реализация списков в функциональных языках. Списки в языке Haskell. Генераторы списков и математические последовательности. Бесконечные списки и другие структуры данных. Кортежи.*

Проекция списков в язык Haskell .....	101
---------------------------------------	-----

Несколько слов о программной реализации .....	104
---	-----

Примеры .....	106
---------------	-----

Определители списков и математические последовательности .....	110
--	-----

Кортежи .....	117
---------------	-----

2.2 Списки — основа функциональных языков .....	118
---	-----

*Функция — основной объект изучения функционального программирования. Соглашения по именованию объектов в языке Haskell. Описание и определение функций на языке Haskell. Образцы и клозы. Передача параметров и возвращение значений функциями. Инфиксный способ записи функций. Функция как объект*

для передачи в другие функции. Программа на языке *Haskell* — функция, описывающая процесс вычисления.

Соглашения по именованию .....	118
Общий вид определения функции .....	119
Образцы и клозы .....	119
Вызовы функций .....	125
Использование $\lambda$ -исчисления .....	126
Инфиксный способ записи функций .....	127
Несколько слов о функциях высшего порядка .....	131
<b>2.3 Списки — основа функциональных языков .....</b>	<b>131</b>
<i>Структуры и типы данных. Типы функций. Каррированные и некаррированные функции. Язык Haskell и его механизмы для организации каррированных и некаррированных функций. Описание типов функций на языке Haskell. Частичное применение. Ленивые (отложенные) вычисления на языке Haskell.</i>	
Структуры данных и их типы .....	132
Синонимы типов .....	136
Типы функций в функциональных языках .....	137
Полиморфные типы .....	140
<b>2.4 Списки — основа функциональных языков .....</b>	<b>142</b>
<i>Отражающие выражения и конструкции. Локальные переменные для оптимизации кода на функциональном языке и на языке Haskell. Использование накапливающего параметра (аккумулятора) для оптимизации процесса вычислений. Принципы построения определений функций с накапливающим параметром. Головная и хвостовая рекурсии.</i>	
Охрана .....	143
Ветвление алгоритма .....	145
Локальные переменные .....	146
Двумерный синтаксис .....	149
Накапливающий параметр — аккумулятор .....	150
Принципы построения определений с накапливающим параметром .....	152
<b>2.5 Списки — основа функциональных языков .....</b>	<b>153</b>
<i>Модули как способы структуризации и организации программ на языке Haskell. Импорт и экспорт данных при помощи модулей. Соккрытие данных. Абстрактные типы данных и интерфейсы. Иные аспекты использования модулей.</i>	

Абстрактные типы данных .....	156
Другие аспекты использования модулей .....	157
Литературный код .....	158

Вопросы для самоконтроля .....	160
Задачи для самостоятельного решения .....	161

### **3 Классы и их экземпляры ..... 164**

*Эта глава посвящена рассмотрению симбиоза парадигм функционального и объектно-ориентированного программирования. Большинство современных функциональных языков поддерживают механизмы и методы, разработанные в рамках объектно-ориентированного программирования, в том числе и такие базовые концепты, как «наследование», «инкапсуляция» и «полиморфизм». Не обошел своим вниманием этот аспект и язык Haskell, в котором имеются достаточные средства для программирования в объектно-ориентированном стиле.*

#### **3.1 Параметрический полиморфизм данных ..... 165**

*Понятие класса и его реализации в языке Haskell. Чистый (параметрический) полиморфизм на языке Haskell. Примеры параметрического полиморфизма в императивных и функциональных языках, а также в языке Haskell.*

#### **3.2 Классы в языке Haskell как способ абстракции действительности ..... 170**

*Расширенное описание понятия класса в языке Haskell. Класс как высшая абстракция данных и методов для их обработки. Методы класса — шаблоны функций для реализации обработки данных. Минимальное описание методов класса и связь методов.*

#### *Модель типизации Хиндли-Милнера ..... 171*

#### *Определение классов ..... 176*

#### **3.3 Наследование и реализация ..... 180**

*Наследование классов и наследование методов. Экземпляры классов — реализация интерфейсов, предоставляемых реализуемым классом. Реализация методов для обработки данных. Класс — шаблон типа, реализация класса — тип данных.*

#### *Наследование ..... 180*

#### *Реализация ..... 182*

#### *Реализация для существующих типов ..... 186*

#### *Сорта типов ..... 187*

#### *Дополнительные возможности при определении типов данных ..... 189*



### 3.4 Стандартные классы языка Haskell ..... 192

*Краткое описание всех стандартных классов, разработанных для облегчения программирования на языке Haskell. Дерево наследования стандартных классов. Типичные способы использования стандартных классов языка Haskell. Реализация стандартных классов — типы в языке Haskell.*

<i>Класс Bounded</i> .....	192
<i>Класс Enum</i> .....	193
<i>Класс Eq</i> .....	195
<i>Класс Floating</i> .....	195
<i>Класс Fractional</i> .....	196
<i>Класс Functor</i> .....	197
<i>Класс Integral</i> .....	198
<i>Класс Ix</i> .....	199
<i>Класс Monad</i> .....	199
<i>Класс Num</i> .....	200
<i>Класс Ord</i> .....	201
<i>Класс Read</i> .....	202
<i>Класс Real</i> .....	203
<i>Класс RealFloat</i> .....	203
<i>Класс RealFrac</i> .....	204
<i>Класс Show</i> .....	206

### 3.5 Сравнение с другими языками программирования ..... 207

*Более или менее полное сравнение понятий «класс» и «реализация класса» в языке Haskell с объектно-ориентированными языками программирования (на примере языков C++ и Java, а также некоторых других языков). Глобальные отличия понятия «класс» в функциональных и объектно-ориентированных языках.*

<i>Окончательные замечания</i> .....	209
--------------------------------------	-----

Вопросы для самоконтроля .....	210
--------------------------------	-----

Задачи для самостоятельного решения .....	211
---	-----

## 4 Монады — последовательное выполнение действий в функциональной парадигме ..... 213

*Глава описывает такое незаурядное понятие, введенное в функциональной парадигме программирования, как «монада». Монады, основанные на математической теории категорий, позволяют внедрить в функциональный подход опре-*

деленные структуры для выполнения императивных действий, как, например, операции ввода/вывода, обработка исключений, хранение состояний в процессе вычислений, и многие другие действия, связанные с побочными эффектами. Вместе с тем монады позволяют обернуть императивные действия в функциональную оболочку, спрятав все от «императивного мира» внутри монады.

#### 4.1 Монада как тип-контейнер ..... 214

*Описание монады как типа-контейнера. Использование монад в функциональных языках. Свойства монадических типов. Операции связывания с передачей и без передачи результата выполнения операции на предыдущем шаге. Правила построения монад.*

*Определение понятия «монада» ..... 215*

*Нотация `do` ..... 218*

*Правила построения монад ..... 220*

#### 4.2 Последовательное выполнение действий ..... 222

*Действие — элемент функциональной парадигмы. Императивный код внутри функционального. Выполнение действий и возвращение результата. Сокращенный способ записи последовательности действий. Списки действий. Программирование при помощи действий.*

*Класс `Computations` ..... 224*

*Монада `State` ..... 227*

#### 4.3 Операции ввода/вывода в языке Haskell ..... 239

*Более или менее полное описание базовых операций ввода/вывода в языке Haskell. Монада `IO`. Обработка исключений. Использование файлов, каналов и обработчиков. Нарушение теоретических принципов функционального программирования в монаде `IO`.*

*Действия ввода/вывода ..... 240*

*Программирование при помощи действий ..... 244*

*Обработка исключений ..... 245*

*Файлы и потоки ..... 247*

*Окончательные замечания ..... 251*

#### 4.4 Стандартные монады языка Haskell ..... 252

*Подробное описание монадических типов в стандартной библиотеке языка Haskell. Назначение и применимость монадических типов. Примеры использования стандартных монадических типов (кроме списков и монады `IO`). Модуль `Monad`. Монады `Glasgow Haskell Compiler`.*

Модуль <i>Monad</i> .....	253
Стандартные монады .....	257
4.5 Разработка собственных монад .....	262
<i>Критерии возможности и необходимости разработки собственного монадического типа. Комбинирование монадических вычислений. Преобразователи монад. Примеры преобразования.</i>	
Комбинирование монадических вычислений .....	263
Преобразователи монад .....	264
Пример с преобразователем <i>StateT</i> .....	267
Окончательные замечания .....	268
Вопросы для самоконтроля .....	269
Задачи для самостоятельного решения .....	270
<b>5 Комбинаторная логика и <math>\lambda</math>-исчисление .....</b>	<b>273</b>
<i>В главе рассматриваются основополагающие теоретические формализмы, которые стояли у истоков функционального программирования, а именно комбинаторная логика и <math>\lambda</math>-исчисление, разработанные в качестве расширений формальной логики и теории множеств в начале XX в. Приводятся самые основы этих направлений дискретной математики, достаточные для понимания сути того, что в свое время стояло за парадигмой функционального программирования.</i>	
5.1 Основы комбинаторной логики .....	274
<i>Введение в комбинаторную логику. Поверхностное описание принципов комбинаторной логики. Комбинаторы и вычисления при помощи комбинаторов. Базисы в комбинаторной логике. Использование базисных комбинаторов для выражения любых вычислительных процессов. Числа и иные математические объекты в виде комбинаторов.</i>	
Базовые комбинаторы .....	274
Комбинатор неподвижной точки .....	281
Нумералы и арифметические операции .....	283
Заключительные слова .....	286
5.2 Абстракция функций как вычислительных процессов .....	288
<i>Функция — объект математического исследования. Вычислительный процесс — функция. Описание функций как <math>\lambda</math>-выражений. Свободные и связанные иденти-</i>	

*фикаторы. Применение (апликация) значений к  $\lambda$ -выражениям. Непрерывная точка функций и теорема о непрерывной точке.*

«Наивное» определение $\lambda$ -исчисления .....	289
Связь с комбинаторной логикой .....	292
Редукция .....	293
Тезис Черча-Тьюринга .....	294

## 5.3 $\lambda$ -исчисление как теоретическая основа функционального программирования .....

298

*Предположение о том, что любая функция представима в виде  $\lambda$ -выражения. Интенционал и экстенционал функций. Формальная система. Построение формальной системы для обоснования теории функционального программирования. Правила вывода. Соответствия между вычислениями функциональных программ и редукцией  $\lambda$ -выражений.*

Построение формальной системы .....	299
Функциональное программирование как формальная система .....	303
Теорема Черча-Россера .....	305

## 5.4 Кодирование данных в $\lambda$ -исчислении .....

307

*Механизм кодирования данных в  $\lambda$ -исчислении.  $\lambda$ -исчисление — достаточный формализм для представления значений истинности, упорядоченных пар, натуральных чисел, списков, а также базовых операций над этими объектами.*

Булевские значения .....	308
Упорядоченные пары .....	309
Натуральные числа .....	311
Списки .....	314

## 5.5 Редукция и вычисления в функциональных языках .....

315

*Понятие редукции. Частичные вычисления с точки зрения редукции  $\lambda$ -выражений. Различные редукционные стратегии и их свойства.*

Стратегия редукции и стратегия вычислений .....	315
Ленивая редукция .....	321

## Вопросы для самоконтроля .....

327

## Задачи для самостоятельного решения .....

329

## 6 Трансляторы программ .....

331

*В главе 6 представлено краткое описание теории построения трансляторов для интерпретации и компиляции языков программирования. Теория рассматривается на примерах, написанных на языке Haskell. Кроме того, рассматриваются способы построения парсеров, а также готовые библиотеки для синтаксического анализа. Суперкомпиляция.*

## 6.1 Математическая лингвистика ..... 331

*Краткое введение в математическую лингвистику. Обзор методов и принципов математической лингвистики. Классификация языков и грамматик. Конечные автоматы и контекстно-свободные языки. Грамматики типа  $LL(k)$ . Контекстно-зависимые грамматики.*

*Базовые понятия ..... 332*

*Расширенная нотация Бэкуса — Наура ..... 335*

*Классификация грамматик ..... 337*

*Конечные лингвистические автоматы ..... 338*

*Синтаксический анализ контекстно-свободных языков ..... 343*

## 6.2 Краткое введение в теорию построения трансляторов ..... 346

*Трансляторы: определения, типы и классификация, применимость для тех или иных типов языков и грамматик. Интерпретаторы и компиляторы. Компиляторы компиляторов. Методы построения трансляторов. Автоматическое построение транслятора по грамматике языка (для ограниченного множества языков). Понятие трансформационной грамматики.*

*Классификация трансляторов и их типовые структуры ..... 347*

*Трансформационные грамматики ..... 354*

*Автоматическое построение анализатора для отдельных типов языков ..... 358*

## 6.3 Реализация трансляторов на языке Haskell ..... 360

*Функциональные языки, как естественный инструмент реализации трансляторов. Синтаксические анализаторы. Методы написания трансляторов на языке Haskell. Примеры синтаксических анализаторов для различных форматов данных. Пример вычисления арифметических выражений, записанных в различной нотации.*

*Простейшие парсеры ..... 361*

*Комбинаторы синтаксического анализа ..... 363*

*Дополнительные комбинаторы синтаксического анализа ..... 366*

*Анализ нотации Бэкуса — Наура ..... 368*

6.4	Библиотеки для создания трансляторов .....	372
	<i>Описание имеющихся библиотек для языка Haskell, предназначенных для создания трансляторов. Монадическая библиотека <b>Parsec</b> для самостоятельного создания трансляторов. Компилятор компиляторов <b>Happy</b>.</i>	
	<i>Монадическая библиотека парсеров <b>Parsec</b> .....</i>	<i>372</i>
	<i>Компилятор компиляторов <b>Happy</b> .....</i>	<i>377</i>
6.5	Частичные вычисления, трансформация программ и суперкомпиляция .....	381
	<i>Задача трансформации программ. Частичные вычисления, как инструмент для трансформации программ. Частичный вычислитель — инструмент для получения остаточного кода заданной функциональной программы. Интерпретатор, компилятор и компилятор компиляторов, их связь. Проекция Футамуры-Турчина. Суперкомпиляция.</i>	
	<i>Частичные вычисления и трансляция программ .....</i>	<i>382</i>
	<i>Проекция Футамуры — Турчина .....</i>	<i>385</i>
	<i>Трансформация программ .....</i>	<i>387</i>
	Вопросы для самоконтроля .....	392
	Задачи для самостоятельного решения .....	394
7	ФП и искусственный интеллект .....	395
	<i>Заключительная глава книги рассматривает такую область человеческого знания, как искусственный интеллект, то есть методы решения слабоформализованных задач, для которых не существует алгоритмического решения либо такое решение слишком сложно. Такой интерес связан с тем, что именно парадигма функционального программирования нашла свое непосредственное применение в рамках искусственного интеллекта.</i>	
7.1	Основные задачи искусственного интеллекта .....	396
	<i>Историческая справка о развитии искусственного интеллекта, как области научного исследования. Введение в базовые понятия искусственного интеллекта. Место функционального программирования в искусственном интеллекте. Функциональное и логическое программирования. Задачи искусственного интеллекта, которые могут быть решены при помощи методов и средств функционального программирования.</i>	
	<i>История развития искусственного интеллекта .....</i>	<i>398</i>
	<i>Различные подходы к построению систем искусственного интеллекта .....</i>	<i>402</i>
	<i>Место функционального программирования в искусственном интеллекте .....</i>	<i>405</i>

7.2	Нечеткая математика и функциональное программирование .....	407
	<i>Небольшой экскурс в нечеткую математику. Функции принадлежности и лингвистические переменные. Базовые операции над функциями принадлежности. Кусочно-линейные функции принадлежности. Операции сравнения, арифметические и логические операции над кусочно-линейными функциями принадлежности. Использование языка Haskell для реализации методов обработки кусочно-линейных функций принадлежности.</i>	
	Базовые концепты нечеткой логики .....	407
	От нечеткой логики к нечеткой математике .....	409
	Функции принадлежности как способ описания нечетких значений .....	411
	Нечеткие и лингвистические переменные .....	417
	Операции над функциями принадлежности .....	418
	Пример модуля для обработки кусочно-линейных функций принадлежности .....	423
7.3	Логический вывод на знаниях .....	429
	<i>Знания и данные. Модели представления знаний. Понятие логического вывода на знаниях. Стратегии вывода на знаниях. Машины вывода. Эволюция машинного вывода на знаниях. Интерпретаторы функциональных языков как естественные машины вывода. Язык Haskell и его возможности в логическом выводе на знаниях. Универсальный вывод на продукционной модели знания.</i>	
	Знания и данные .....	430
	Вывод на знаниях .....	434
	Прямой нечеткий вывод .....	437
	Обратный нечеткий вывод .....	439
	Некоторые окончательные замечания о машинном выводе .....	442
7.4	Общение с компьютером на естественном языке .....	443
	<i>Принципы общения с компьютерными системами на естественном языке. Ограниченный естественный язык, деловая проза. Трансляция фраз на естественном языке во внутренний язык представления смысла. Понимание текстов на естественном языке. Использование методов функционального программирования.</i>	
	Обобщенная схема интеллектуальных диалоговых систем .....	444
	Схема анализа входного текста .....	447
	Некоторые окончательные замечания .....	453
7.5	Перспективы функционального программирования .....	454

*Описание видения будущего функционального программирования, функциональных языков и языка Haskell. Значение функциональной парадигмы для технологии программирования вообще.*

Вопросы для самоконтроля .....460

Задачи для самостоятельного решения ..... 461

**Заключение .....463**

**Ответы на задачи для самостоятельного решения .....465**

Решения задач из главы 1 ..... 465

Решения задач из главы 2 ..... 467

Решения задач из главы 3 ..... 474

Решения задач из главы 4 ..... 477

Решения задач из главы 5 ..... 483

Решения задач из главы 6 ..... 488

**А Функциональные языки программирования и Интернет-ресурсы по функциональному программированию ..... 496**

*Список наиболее известных и широко используемых функциональных языков программирования с краткой аннотацией. Список Интернет-ресурсов, посвященных функциональному программированию как в русском сегменте Интернета, так и во всем остальном мире.*

Функциональные языки программирования .....496

Русские Интернет-ресурсы ..... 502

Иностранные Интернет-ресурсы .....503

**В Опции различных сред разработки на языке Haskell ..... 506**

*Описание типичных настроек интегрированных сред разработки и компиляторов на примере продуктов HUGS 98 и GHC для полноценной работы и выполнения различных задач на языке Haskell. Список команд, ключей командной строки и внутренних директив интерпретатора HUGS 98. Список параметров командной строки для компилятора GHC. Другие функциональные средства разработки.*

Интегрированная среда разработки HUGS 98 .....506

Компилятор GHC .....510

Компилятор GHC .....523

Компилятор компиляторов **Нарру** ..... 528



<b>С</b>	<b>Описание стандартного модуля Prelude .....</b>	<b>531</b>
	<i>Список функций из стандартного модуля языка Haskell Prelude с более или менее подробным описанием.</i>	
	Функции .....	531
	Описание некоторых операторов языка Haskell .....	586
<b>Д</b>	<b>Краткий словарь терминов из области функционального программирования .....</b>	<b>589</b>
	<i>Краткий словарь терминов, имеющих отношение к функциональному программированию. для каждого термина даются ссылки на страницы, где он описан, а также переводы на некоторые иностранные языки.</i>	
	<b>Литература .....</b>	<b>599</b>
	Общая литература по функциональному программированию .....	599
	Книги, руководства и статьи по языку Haskell .....	601
	Комбинаторная логика и $\lambda$ -исчисление .....	602
	Математическая лингвистика и теория построения трансляторов .....	603
	Искусственный интеллект .....	604

# Введение

Данная книга является первым в России изданием, рассматривающим функциональное программирование в полном объеме, достаточном и для понимания новичку, и для использования книги в качестве справочного пособия теми, кто уже использует парадигму<sup>1</sup> функционального программирования в своей практике. Эту книгу можно использовать и в качестве учебника по функциональному программированию, и в качестве вспомогательного учебного пособия по смежным дисциплинам, в первую очередь по комбинаторной логике и  $\lambda$ -исчислению<sup>2</sup>. Также книга будет интересна тем, кто всерьез занимается изучением новых компьютерных технологий, искусственного интеллекта и синергетическим слиянием научных направлений человеческой деятельности.

Необходимость написания подобной книги в первую очередь вызвана тем, что на русском языке нет полноценного справочного и учебного пособия по языку Haskell, в то время как этот функциональный язык все больше и больше завоевывает сердца программистов по всему миру. Более того, этот язык уже используют и для написания полноценных программных систем, в том числе для коммерческого использования. Однако в России изучение языка Haskell проповедуется лишь энтузиастами, а в строгой академической школе довольствуются традиционным рассмотрением языка Lisp в качестве иллюстрации основ функционального программирования.

---

<sup>1</sup> Под парадигмой (от греч. *παράδειγμα* — пример, модель, образец) здесь и далее понимается общая концептуальная схема постановки проблем и методов их решения. В более узком смысле под парадигмой программирования будет пониматься не просто стиль написания программ, а способ мышления, который позволяет использовать тот или иной стиль при создании таких программ.

<sup>2</sup> Основы комбинаторной логики и  $\lambda$ -исчисление кратко рассматриваются в главе 5 этой книги.

Однако если рассматривать англоязычные источники, руководства и учебники по языку Haskell, то налицо сложности, с которыми сталкиваются те, кто начинает самостоятельно изучать этот функциональный язык. Во-первых, это скупой и формальный подход при описании синтаксиса языка — на этом принципе основаны все руководства по языку Haskell. Во-вторых, это отсутствие какой-либо системности, или даже присутствие антисистемности в изложении как основ функционального программирования, так и способов программирования на языке Haskell. Например, в учебнике «Haskell: The Craft of Functional Programming» автор перескакивает с одной темы на другую безо всяких переходов между ними. Начинает с описания списков, а продолжает принципами создания программного обеспечения вообще. Описывает систему классов, перескакивает на описание системы ввода/вывода практически без затрагивания темы монад. А это — один из основных учебников по языку Haskell на английском языке.

Книга рассчитана на всех, кто интересуется современными тенденциями развития компьютерной науки и технологии, а также искусственным интеллектом. Она может служить основным или дополнительным учебным пособием для студентов и аспирантов, обучающихся по специальности «прикладная математика» и специализации «искусственный интеллект». Также книга будет полезна в качестве справочного материала по языку Haskell всем тем, кто использует функциональную парадигму в целом и этот функциональный язык в частности в научных исследованиях или повседневной работе.

Для чтения книги необходимо обладать базовыми познаниями в дискретной математике, а также иметь представление о методах разработки алгоритмах и алгоритмическом решении задач (теория алгоритмов). В процессе написания книги полагалось, что читатель знаком с базовыми концептами дискретной математики, поэтому лишние математические определения в книге не приводятся. Сложные разделы математики, представленные в заключительных главах, требуют более серьезных знаний, поэтому их описание сопровождается небольшими экскурсами в теорию. Это касается таких разделов дискретной математики, как комбинаторная логика,  $\lambda$ -исчисление, математическая лингвистика и теория построения трансляторов, а также базовые принципы искусственного интеллекта.

Рассмотрение парадигмы функционального программирования производится на примере языка Haskell, на котором написаны все исходные коды, представленные в книге. Все представленные примеры, функции, модули и исходные тексты программ проверены в интегрированной среде разработки HUGS 98 (за исклю-

чением тех, которые предназначены для компиляции в среде GHC — Glasgow Haskell Compiler). Для удобства читателя, желающего проверить и закрепить свои знания на практике, все приведенные в книге программы и функции размещены на сайте издательства [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com)

Книгу нельзя рассматривать в качестве скрупулезного введения в язык Haskell и программирования на нем, так как цель автора — не преподать некоторую догму относительно использования языка Haskell, но направить читателя на путь, следуя которому он сам сможет понять, что и как необходимо делать для получения правильных программ. В связи с этим в книге не рассматриваются вопросы о том, какие инструкции на языке необходимо написать, чтобы получить определенный эффект (или рассматриваются в самом минимальном виде), но предлагаются пути решения разных задач, встающих перед программистом. Именно поэтому главы, непосредственно посвященные языку Haskell, написаны сухим языком. Цель этих глав — преподнести читателю как можно больше информации о синтаксисе языка без лишнего упоминания о том, как использовать предлагаемые синтаксические конструкции. Для этого необходимо обратиться к последним главам книги, где, однако, упоминание о языке Haskell сведено к минимуму. Такой формат представления информации позволит (и даже принудит) читателю самостоятельно следовать по пути использования парадигмы функционального программирования.

Также на прилагаемом CD-диске можно найти текст данной книги в формате Adobe PDF (Portable Document Format) для использования его в личных нуждах.

## Краткая биография автора

**Душкин Роман Викторович.** С 2001 г. читает лекции по функциональному программированию для студентов четвертого курса кафедры кибернетики (№ 22) факультета «К» Московского инженерно-физического института (МИФИ). Базисом для авторского курса по функциональному программированию послужил текст лекций Г. М. Сергиевского, читавшихся до 2001 г. Данные лекции были кардинально переработаны с учетом современных веяний в науке и технике, основа была переведена с языка Lisp на Haskell (вместе с полной переработкой курса лабораторных работ), а сами лекции были дополнены строгим научным обоснованием как самой парадигмы функционального программирования, так и ее прикладных аспектов.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине «Электронный универс»  
([e-Univers.ru](http://e-Univers.ru))