

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт вычислительного моделирования  
Сибирского отделения Российской академии наук»

Сибирский научно-образовательный центр  
суперкомпьютерных технологий

**Е. Д. Карпова**

## **ОСНОВЫ МНОГОПОТОЧНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Допущено УМО по классическому университетскому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям ВПО 010400 «Прикладная математика и информатика» и 010300 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», 23 марта 2015 г.

Красноярск  
СФУ  
2016

УДК 004.272(07)  
ББК 32.973я73  
К225

**Карпова, Е. Д.**  
К225      Основы многопоточного и параллельного программирования :  
учеб. пособие / Е. Д. Карпова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. –  
356 с.  
ISBN 978-5-7638-3385-0

Рассматриваются современные подходы к разработке программного обеспечения для высокопроизводительных параллельных вычислительных систем. Приводятся общие сведения об архитектурах современных суперкомпьютеров и методах их программирования. Описываются особенности ряда популярных средств разработки многопоточных и параллельных программ и их использования для эффективного решения научных и прикладных задач.

Предназначено для студентов, аспирантов, инженеров и исследователей, работающих в области прикладной математики, вычислительной физики и высокопроизводительных параллельных вычислений.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда  
(проект № 14-11-00147)*

**Электронный вариант издания см.:**  
**<http://catalog.sfu-kras.ru>**

**УДК 004.272(07)**  
**ББК 32.973я73**

ISBN 978-5-7638-3385-0

© Сибирский федеральный  
университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Г л а в а 1. ОБЗОР ОБЛАСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ .....	10
1.1. Основные архитектурные особенности построения параллельной вычислительной среды .....	10
1.2. Основные классы современных параллельных компьютеров .....	17
1.3. Разработка параллельных приложений .....	25
1.4. Программные средства.....	29
1.5. Парадигмы параллельных приложений .....	34
Контрольные вопросы и задания .....	51
Задачи .....	52
Г л а в а 2. ПРОБЛЕМЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ОБЩЕЙ ПАМЯТЬЮ .....	54
2.1. Анатомия потока.....	54
2.2. Синхронизация потоков. Оператор ожидания.....	58
2.3. Взаимное исключение. Задача критической секции .....	60
2.4. Сигнализирующие события. Барьерная синхронизация.....	65
2.5. Семафоры.....	73
2.6. Мониторы .....	85
Контрольные вопросы и задания .....	91
Задачи .....	93
Г л а в а 3. УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ WinAPI .....	95
3.1. Объекты ядра.....	95
3.2. Процессы.....	101
3.3. Потоки .....	108
3.4. Синхронизация потоков в пользовательском режиме ...	113
3.5. Синхронизация потоков с помощью объектов ядра .....	120
3.6. Проблемы условной синхронизации .....	128
3.7. Проецируемые в память файлы.....	138
3.8. Совместный доступ процессов к данным через механизм проецирования .....	144
Контрольные вопросы и задания .....	146
Задачи .....	147

Г л а в а 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ OpenMP .....	153
4.1. Программная модель OpenMP .....	153
4.2. Модель памяти OpenMP .....	156
4.3. Среда выполнения OpenMP-программы .....	158
4.4. Директива <code>omp parallel</code> .....	164
4.5. Распределение работы в параллельной области по нитям .....	171
4.6. Директивы синхронизации .....	191
4.7. Переменные среды и функции времени выполнения ....	204
4.8. Спецификации стандарта OpenMP v. 4.0 .....	210
4.9. Оптимизация программ OpenMP .....	212
4.10. Ограничения OpenMP .....	213
Контрольные вопросы и задания .....	215
Задачи .....	215
Г л а в а 5. СОГЛАСОВАННОЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ .....	221
5.1. Проблемы программирования для вычислительных систем с распределенной памятью .....	221
5.2. Оценка эффективности параллельных алгоритмов .....	225
5.3. Реализация базовых алгоритмов вычислительной математики .....	248
5.4. Проблемы выбора эффективной параллельной реализации .....	272
Контрольные вопросы и задания .....	289
Г л а в а 6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ MPI .....	291
6.1. Архитектурная парадигма MPI .....	291
6.2. Обрамляющие и информационные функции MPI .....	293
6.3. MPI и крупноблочное распараллеливание .....	294
6.4. Организация вычислений .....	300
6.5. Организация взаимодействий процессов .....	311
6.6. Повышение эффективности MPI-программ .....	335
Контрольные вопросы и задания .....	338
Задачи .....	340
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	347