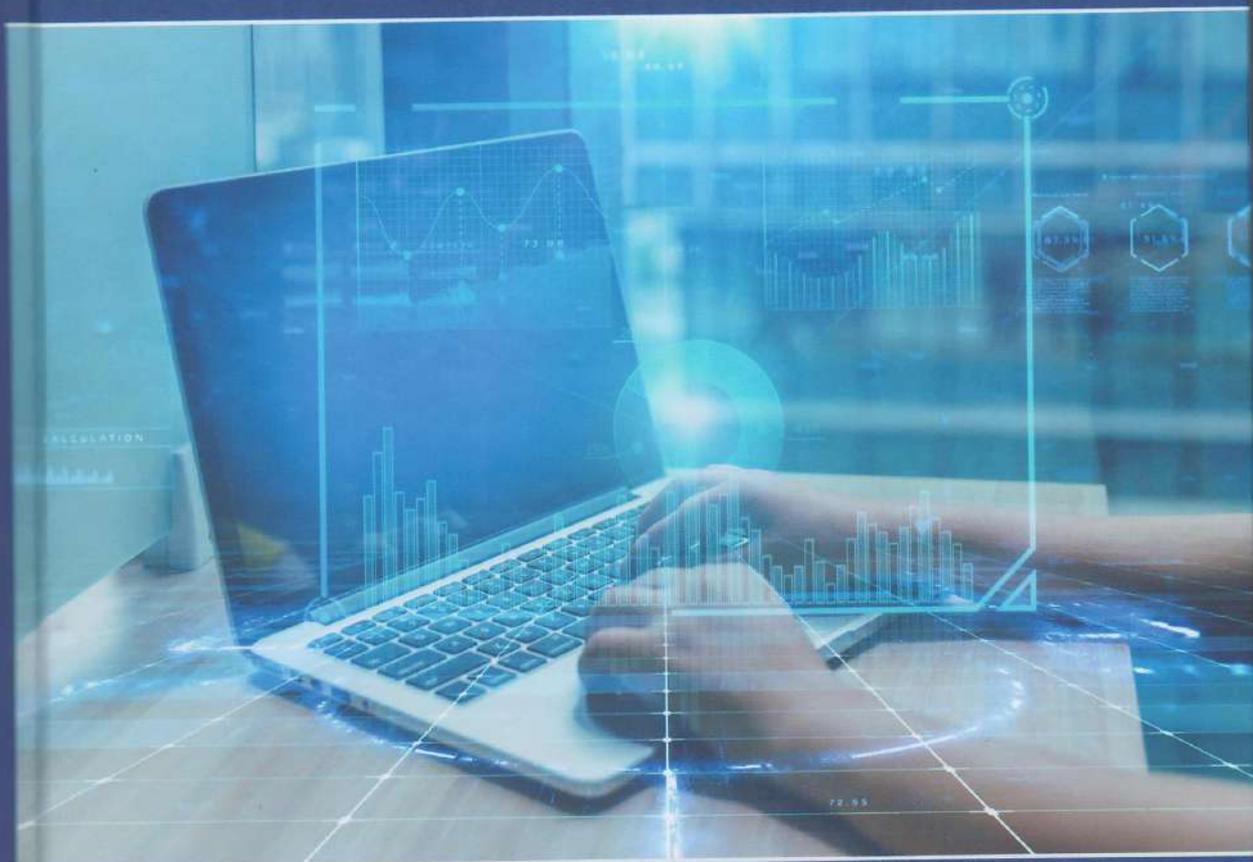


Р.И.ПАРОВИК, З.Р.РАХМОНОВ

# СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ



**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ  
И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА  
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

**Р.И.ПАРОВИК, З.Р.РАХМОНОВ**

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИИ**

*УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ*

*70540201-Прикладная математика*

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТАФАККУР»  
ТАШКЕНТ – 2024**

УДК: 004.056.55

ББК: 32.81

П 91

**Паровик Р.И., Рахмонов З.Р.** Суперкомпьютерное моделирование и технологии. Учебное пособие. – Ташкент: издательство «Tafakkur», 2024. – 220 с.

**Рецензенты:**

**Ю.В.Марапулец** – директор института Космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, д.ф.-м.н., профессор;

**А.Хайдаров** – доцент кафедры «Прикладная математика и компьютерный анализ» Национального университета Узбекистана, д.ф.-м.н., доцент.

Учебное пособие «Суперкомпьютерное моделирование и технологии» предназначен для изучения дисциплин, связанных с суперкомпьютерными технологиями, технологиями параллельного программирования, студентами, обучающимися по направлениям подготовки 60540200 - Прикладная математика (уровень бакалавриата) и направления подготовки 70540201-Прикладная математика (уровень магистратура). Учебное пособие, также можно использовать для изучения дисциплин, связанных с применением вычислений на высокопроизводительных системах и кластерах.

*Учебное пособие рекомендовано для публикации Советом Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека протоколом №8 от 31.05.2024 г.*

ISBN 978-9910-8944-4-2

©Р.И.Паровик, З.Р.Рахмонов, 2024

© Издательство «Tafakkur», 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Суперкомпьютерное моделирование и технологии» предназначен для изучения дисциплин, связанных с суперкомпьютерными технологиями, технологиями параллельного программирования, студентами, обучающимися по направлениям подготовки 60540200 - Прикладная математика (уровень бакалавриата) и направления подготовки 70540201-Прикладная математика (уровень магистратура). Учебное пособие, также можно использовать для изучения дисциплин, связанных с применением вычислений на высокопроизводительных системах и кластерах.

Учебное пособие состоит из 12 лекций, каждая из которых содержит: план, ссылку на источники литературы, основные понятия и определения, теоретический материал, практические примеры, а также задачи для самостоятельного решения.

В лекциях делается упор на технологии параллельного программирования, которые являются основой суперкомпьютерного моделирования. Последовательно вводится понятие параллельного программирования, дается архитектура вычислительных систем, понятия ускорения, эффективности и стоимости параллельных алгоритмов, лемма Брента, закон Амдала и условие Бернштейна. Несколько лекций посвящены исследованию простых и вложенных циклов на возможность их распараллеливания. Приводятся различные приёмы эквивалентных преобразований простых и вложенных циклов, которые в большинстве случаев могут приводить к возможности их распараллеливания. Исследование циклов на возможность их распараллеливания возникает в связи с использованием численных алгоритмов для решения различных задач.

Далее изучаются технологии MPI, OpenMP, которые используются для параллельного программирования на процессорах CPU, потом исследуются технология CUDA для графических

процессоров видео карт GPU. Здесь раскрываются различные функции и директивы, методы параллельного программирования, приводятся примеры. Потом рассматривается технология OpenCL для гетерогенных систем.

Завершает учебное пособие, лекция, посвященная встроенным возможностям параллельного программирования в математических пакетах Maple, Matlab, Mathematica. В этой лекции дается справочная информация по встроенным командам для параллельного программирования и приводятся сопоставления с командами технологии MPI. Приводятся простейшие примеры использования встроенных процедур для параллельного программирования в математических пакетах Maple, Matlab, Mathematica.

## ЛЕКЦИЯ №1. ВВЕДЕНИЕ В СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### План лекции:

- Определение понятия «суперкомпьютер»
- История суперкомпьютеров
- Применение суперкомпьютеров
- Производительность суперкомпьютеров
- Программное обеспечение
- Проект TOP-500
- Темы для семинарского занятия

Рекомендуемая литература: [1].

### Определение понятия «суперкомпьютер»

**Определение 1.1.** *Суперкомпьютер (англ. Supercomputer, СверхЭВМ, СуперЭВМ, сверхвычислитель) – специализированная вычислительная машина, значительно превосходящая по своим техническим параметрам и скорости вычислений большинство существующих в мире компьютеров.*

Как правило, современные суперкомпьютеры представляют собой большое число высокопроизводительных серверных компьютеров, соединённых друг с другом локальной высокоскоростной магистралью для достижения максимальной производительности в рамках реализации распараллеливания вычислительной задачи.

Определение понятия «суперкомпьютер» не раз было предметом многочисленных споров и обсуждений.

Чаще всего авторство термина приписывается Джорджу Майклу (George Anthony Michael) и Сиднею Фернбачу (Sidney Fernbach), в конце 60-х годов XX века работавшим в Ливерморской национальной лаборатории (Калифорния, США), и компании CDC (Control Data Corporation). Тем не менее, известен

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ЛЕКЦИЯ №1. ВВЕДЕНИЕ В СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....	5
Определение понятия «суперкомпьютер» .....	5
История суперкомпьютеров .....	8
Применение суперкомпьютеров .....	10
Производительность суперкомпьютеров .....	11
Программное обеспечение .....	12
Проект TOP-500 .....	13
Темы для семинарского занятия .....	16
ЛЕКЦИЯ №2. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....	17
Параллельные вычисления .....	17
Необходимость параллельных вычислений .....	20
Примеры приложений .....	21
Значимость параллельных вычислений .....	24
Решение задач .....	25
ЛЕКЦИЯ №3. КЛАССИФИКАЦИЯ АРХИТЕКТУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....	26
Актуальность современных вычислительных систем	26
Классификация Флинна .....	27
Средства параллельного программирования .....	31
Контрольные вопросы к лекции .....	32

ЛЕКЦИЯ №4. ОСНОВЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ .....	33
Модели RAM и PRAM. Теорема об эмуляции .....	33
Понятия ускорения, эффективности, стоимости параллельных алгоритмов .....	37
Лемма Брента. Закон Амдала .....	39
Граф операции–операнды .....	42
Условия Бернштейна .....	44
Задачи для самостоятельной работы .....	46
ЛЕКЦИЯ №5. ПРОСТЫЕ ЦИКЛЫ И ИХ АНАЛИЗ НА ПАРАЛЛЕЛЬНОСТЬ .....	50
Введение .....	50
Простые циклы. Развертка цикла .....	50
Зависимости в простых циклах. Расстояние зависимости и типы зависимости .....	53
Задачи для самостоятельной работы .....	59
ЛЕКЦИЯ №6. ВЛОЖЕННЫЕ ЦИКЛЫ И ИХ АНАЛИЗ НА ПАРАЛЛЕЛЬНОСТЬ .....	61
Введение .....	61
Вложенные циклы. Развертка цикла .....	61
Зависимость вложенных циклов .....	64
Задачи для самостоятельной работы .....	74
ЛЕКЦИЯ №7. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УСТРАНЕНИЕ ИСТИННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ЦИКЛАХ .....	75
Введение .....	75
Граф алгоритма .....	76

Эквивалентные преобразования .....	78
Задачи для самостоятельной работы .....	85
<b>ЛЕКЦИЯ №8. ТЕХНОЛОГИЯ OPENMP .....</b>	<b>86</b>
Введение .....	86
Модель параллельной программы .....	87
Основные директивы OpenMP .....	90
Вспомогательные функции и переменные окружения .....	91
Основные методы распараллеливания (циклы и секции) .....	94
Задачи для самостоятельной работы .....	100
<b>ЛЕКЦИЯ №9. ТЕХНОЛОГИЯ MPI .....</b>	<b>102</b>
Введение .....	102
Важнейшие функции MPI .....	104
Стандартный способ передачи сообщений .....	108
Групповые имена и недействительные процессы .....	115
Измерение времени .....	116
Способы передачи сообщений .....	117
Коллективные взаимодействия .....	122
Задачи для самостоятельной работы .....	129
<b>ЛЕКЦИЯ 10. ТЕХНОЛОГИЯ CUDA .....</b>	<b>131</b>
Введение .....	131
Основы работы с CUDA .....	132
Свойства видеокарт .....	138
Простейшие программы на CUDA .....	147
Атомарные операции в CUDA .....	152
Задачи для самостоятельной работы .....	155

<b>ЛЕКЦИЯ 11. ТЕХНОЛОГИЯ OPENCL .....</b>	<b>157</b>
Введение .....	157
Основные понятия и определения .....	158
Организация OpenCL приложения .....	161
Информация о возможностях устройств .....	165
Очередь команд .....	174
Типы данных .....	180
Квалификаторы .....	181
Решения задач для самостоятельной работы .....	188
<b>ЛЕКЦИЯ 12. ИНСТРУМЕНТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПАКЕТАХ .....</b>	<b>190</b>
Введение .....	190
Средства параллельного программирования в MATLAB ...	191
Средства параллельного программирования в Maple .....	195
Средства параллельного программирования в Mathematica .....	198
Задачи для самостоятельной работы .....	201
Заключение .....	202
Тест по дисциплине .....	203
Глоссарий .....	210
Литература .....	213

**Р.И.ПАРОВИК, З.Р.РАХМОНОВ**

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

**РЕДАКТОР:** МИРЗААХМАД АЛИМОВ  
**ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР:** ОЛМОС МУХТОРОВ  
**ВЁРСТКА И ДИЗАЙНЕР:** ХУСАН САФРАЛИНОВ

Издательская лицензия



5209

Подписано в печать 15.12.2024.  
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.  
Гарнитура "Times New Roman". печ. л. 13,75.  
Тираж 50 экз.

Оригинал макета изготовлен в издательстве «ТАФАККУР».  
Издательство «ТАФАККУР», Ташкентский р-н.,  
Кизгалдоқ, СГМ «Бунёдкор», улица Кўл, проезд 17, дом 9.  
Телефон, факс: (71) 244-75-88, (94) 664-40-03.  
E-mail: tafakkurmaktub@mail.ru

Web sayt: fanvatalim.uz  
E-mail: info@fanvatalim.uz

Отпечатано в типографии издательства «Tafakkur».