Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ
Директор филиала МГУ в
городе Сарове
_____/В.В.
Воеводин/

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Высокопроизводительные вычисления на кластерах с использованием графических ускорителей

Уровень высшего образования: магистратура

Направление подготовки / специальность:

02.04.02 "Фундаментальная информатика и информационные технологии" (3++)

Направленность (профиль)/специализация ОПОП:

Суперкомпьютерные технологии и фундаментальная информатика

Форма обучения: очная

Саров 2022

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 02.04.02 "Фундаментальная информатика и информационные технологии" программы магистратуры - приказ МГУ 30 августа 2019 года № 1054 (в редакции приказа МГУ от 11 сентября 2019 года № 1109)

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО:

Дисциплина «Высокопроизводительные вычисления на кластерах с использованием графических ускорителей» входит в базовую часть магистерской программы «Суперкомпьютерные технологии и фундаментальная информатика». Данная дисциплина относится к блоку «Программное обеспечение современных вычислительных комплексов». Дисциплина изучается в 3 семестре.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия:
Учащиеся должны владеть знаниями по курсам, связанным с основами программирования и системами программирования.

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):

Формируемые компетенции	**Результаты обучения**
УК-3. Способен разрабатывать, реализовывать и управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла, предусматривать и учитывать проблемные ситуации и риски проекта.	**Знать** организационные структуры проектной деятельности; методы анализа информации. **Уметь:** работать с нормативно-правовыми и научными источниками информации. **Владеть:** системой понятий, характеризующих отличия в системах научных гипотез и научных методов; навыками и готовностью к самостоятельному выполнению заданий.
ОПК-3. Способен создавать и анализировать математические и информационные модели профессиональных задач, учитывать ограничения и границы применимости моделей, интерпретировать полученные результаты и создавать инновационные методы решения задач в области информатики и математического моделирования.	**Знать:** математические и информационные модели, необходимые для решения задач, связанных с реализацией профессиональной деятельности. **Уметь:** применять математические и информационные модели для решения задач, связанных с реализацией профессиональной деятельности с учетом их ограничений и границы применимости. **Владеть:** способность создавать инновационные методы решения задач, связанных с реализацией профессиональной деятельности.
ОПК-5. Способен	**Знать**

осуществлять управление разработкой и сопровождением проектов в сфере программного обеспечения информационных систем.	Основы организации проектной деятельности, схемы организации групповой работы при создании программного обеспечения информационных систем. **Уметь:** поставить задачу, делегировать обязанности и принять конечный результат с учетом возможностей, членов проектной команды. **Владеть:** Способность управлять разработкой и сопровождением проектов в сфере программного обеспечения информационных систем.
ПК-6. Способен разрабатывать архитектуру, алгоритмические и программные решения системного и прикладного программного обеспечения.	**Знать:** Типовые методы разработки архитектуры, алгоритмических и программных решений системного и прикладного программного обеспечения **Уметь:** разрабатывать архитектуру, алгоритмические и программные решения системного и прикладного программного обеспечения **Владеть:** Опытом разработки архитектуры, алгоритмических и программных решений системного и прикладного программного обеспечения по теме выполняемых работ
ПК-8. Способен определять компонентный состав и архитектуру системы информационных технологий в соответствии с ее назначением, осуществлять оптимальный выбор современных средств ее разработки и сопровождения.	**Знать:** компонентный состав и архитектуру, средства разработки и сопровождения типовых систем информационных технологий; **Уметь:** определять назначение системы информационных технологий, осуществлять анализ ее компонентного состава и архитектуры; определять возможные средства разработки и сопровождения системы информационных технологий. **Владеть:** Опытом разработки и сопровождения системы информационных технологий
МПК-2 Способность разрабатывать и реализовывать масштабируемые параллельные методы и алгоритмы, участвовать в междисциплинарных исследованиях с применением	**Знать:** масштабируемые параллельные методы и алгоритмы, используемые при проведении крупномасштабного математического моделирования и обработки данных на суперкомпьютерных системах; **Уметь:** разрабатывать и реализовывать масштабируемые параллельные методы и алгоритмы для проведения крупномасштабного математического моделирования и обработки данных на

суперкомпьютерных систем.	суперкомпьютерных системах; **Владеть:** навыками построения, параллельной реализации и исследования моделей и методов распределенной обработки информации.
МПК-3 Способность разрабатывать эффективное системное и прикладное программное обеспечение для суперкомпьютерных систем и высокопроизводительных кластеров.	**Знать:** основные методы и подходы для оптимизации последовательных и параллельных программ; **Уметь:** оценивать эффективность распределенных алгоритмов; **Владеть:** навыками использования современных инструментальных средств для профилирования и анализа производительности параллельных программ.
МПК-4 Способность проводить теоретическое исследование и экспериментальный анализ эффективности функционирования и методов организации вычислений для многопроцессорных вычислительных систем, проводить оценку масштабируемости параллельных программ.	**Знать:** способы исследования эффективности функционирования многопроцессорных вычислительных систем **Уметь:** Выполнять теоретическое исследование и экспериментальный анализ эффективности функционирования и методов организации вычислений для многопроцессорных вычислительных систем **Владеть:** Методами организации вычислений на многопроцессорных вычислительных системах; методами масштабируемости параллельных программ.

4. Объем дисциплины (модуля).

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов.

54 часа составляет контактная работа с преподавателем – 36 часов занятий лекционного типа, 18 часов научно-практических занятий.

54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий:

В курсе дается обзор основных понятий, методов, концепциях и проблемах связанных ускорением решаемых задач с использованием графических процессоров (GPU) NVIDIA. Изучаются основы программирования с использованием технологии CUDA, приводятся сведения о типах памяти GPU, рассматриваются библиотеки и инструменты, входящие в комплект разработчика CUDA Toolkit, вопросы отладки, профилирования и оптимизации CUDA-программ. Также рассматривается стандарт параллельного программирования

OpenACC и особенности программирования многопроцессорных систем с несколькими GPU.

5.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля), **Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**	**Номинальные трудозатраты обучающегося**			**Всего академических часов**	**Форма текущего контроля успеваемости***
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы		**Самостоятельная работа обучающегося, академические часы**		
	Занятия лекционного типа	**Занятия семинарского типа**			
Тема 1. Введение в программирование GPU NVIDIA.	3	1	3	9	опрос
Тема 2. Программная модель CUDA.	3	1	3	14	опрос, выполнение практического задания

Тема 3. Иерархия памяти CUDA.	3	1	3	15	опрос, выполнение практического задания
Тема 4. Работа с разделяемой памятью CUDA.	3	2	3	17	опрос, выполнение практического задания
Тема 5. Интегрированные среды разработки с поддержкой CUDA, инструменты для отладки и профилирования.	3	2	3	15	опрос, выполнение практического задания
Тема 6. Дополнительные возможности работы с памятью.	3	2	3	10	опрос, выполнение практического задания
Тема 7. CUDA Streams.	3	2	3	14	опрос, выполнение практического задания

Тема 8. Программирование систем с несколькими графическими процессорами (Multi-GPU).	3	2	3	14	опрос, выполнение практического задания
Тема 9. Библиотеки с поддержкой CUDA.	2	2	3	13	опрос, выполнение практического задания
Тема 10. Основы программирования GPU NVIDIA с использованием стандарта OpenACC.	3	2	3	10	опрос, выполнение практического задания
Тема 11. Реализация графовых задач на графических ускорителях.	2	2	3	13	опрос, выполнение практического задания

Итоговая индивидуальная работа по теме «Реализация графового алгоритма поиска в ширину на графических ускорителях NVIDIA»	—	—	21	21	—
Промежуточная аттестация (зачет(ы) и (или) экзамен(ы))	5	—	—	—	— —
Итого	**36**	**18**	**54**	**108**	—

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	**Тема 1. Введение в программирование GPU NVIDIA.**	Базовые понятия программно-аппаратной архитектуры CUDA. Основные различия центральных процессоров и графических ускорителей. Основы работы с суперкомпьютером (заход, компиляция, запуск задач), использующим графические ускорители.

2.	**Тема 2. Программная модель CUDA.**	Основные понятия параллельной архитектуры CUDA: нить, warp, блок, грид, ядро. Использование CUDA API для взаимодействия между хостом и устройством. Передача данных между хостом и устройством. Параллельное сложение векторов на GPU средствами CUDA.
3.	**Тема 3. Иерархия памяти CUDA.**	Иерархия памяти современных графических ускорителей. Основы работы с глобальной памятью. Шаблоны доступа к глобальной памяти. Механизм транзакций и работа с кэшами L1 и L2 графических ускорителей.
4.	**Тема 4. Работа с разделяемой памятью CUDA.**	Различные способы и шаблоны работы с разделяемой памятью. Синхронизация нитей блока при использовании разделяемой памяти. Использование разделяемой памяти для ускорения решения прикладных задач.
5.	**Тема 5. Интегрированные среды разработки с поддержкой CUDA, инструменты для отладки и профилирования.**	Использование средства профилировки nvprof для анализа эффективности CUDA приложений. Примеры использования Nvidia Visual profiler для различных реальных приложений. Дистанционный сбор данных профилировки с удаленного сервера. Основные подходы к анализу эффективности и оптимизации GPU программ на основе рассмотренных средств.
6.	**Тема 6. Дополнительные возможности работы с памятью.**	Pageble и Page-locked память. Unified память. Pinned-память. Использование атомарных операций в CUDA-ядрах.

7.	**Тема 7. CUDA Streams.**	Использование CUDA Streams для реализации асинхронных операций: асинхронных пересылок, запусков ядер в конкурентном режиме.
8.	**Тема 8. Программирование систем с несколькими графическими процессорами (Multi-GPU).**	Использования модели OpenMP и механизма переключения контекстов для создания программ, использующих несколько графических ускорителей. Разработка программ на основе MPI для кластеров, построенных на основе графических ускорителей.
9.	**Тема 9. Библиотеки с поддержкой CUDA.**	Обзор интерфейсов и основных возможностей прикладных библиотек CUBLAS, cuSPARSE, cuRAND, nvGRAPH, thrust и др. Пример использования данных библиотек для реализации матричного умножения.
10.	**Тема 10. Основы программирования GPU NVIDIA с использованием стандарта OpenACC.**	Основные директивы OpenACC, принципы копирований данных. Примеры адаптации программ с помощью OpenACC.
11.	**Тема 11. Реализация графовых задач на графических ускорителях.**	Примеры графовых задач и алгоритмов их решения. Типовые шаблоны доступа к данным в графовых задачах. Проблема балансировки параллельной нагрузки для графов реального мира. Основные подходы к оптимизации графовых задач.

6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Темы практических заданий.

1) Реализация базового сложения векторов с использованием CUDA.
2) Реализация базового транспонирования плотных матриц: сравнение различных подходов к выбору размеров конфигураций ядра и сетки.
3) Оптимизация ядра графового алгоритма поиска кратчайших путей от заданной вершины-источника.
4) Реализация блочного транспонирования плотных матриц с использование разделяемой памяти.
5) Реализация умножения плотных матриц с использованием глобальной (6 вариантов расстановки циклов) и разделяемой памяти. Дополнительная оптимизация алгоритма матричного умножения.
6) Реализация задач сложения векторов и умножения плотных матриц с использованием Pinned-памяти и Unified-памяти.
7) Реализация задачи сложения векторов с использованием технологии CUDA-потоков.
8) Реализация бечмарка random memory access и его модификация с использованием технологии CUDA-потоков.
9) Реализация задачи сложения векторов с использованием Multi-GPU.
10) Реализация задачи умножения матриц при помощи библиотек CUBLAS, CURAND, Thrust.
11) Реализация задачи поиска кратчайших путей в графе при помощи библиотеки NVGRAPH.
12) Умножение плотных матриц и сложение плотных векторов с использованием технологий CUDA и OpenACC.

Критерии оценивания каждого из практических заданий:
1) задание сдано преподавателю в обозначенный в курсе лекций срок, проведено детальное исследование эффективности и производительности полученной реализации — отл.
2) задание сдано преподавателю в обозначенный в курсе лекций срок, но не приведено достаточного обоснования производительности и эффективности разработанной реализации — хор.
3) задание сдано преподавателю позже указанного в курсе срока, либо при его решении используются заведомо неоптимальные подходы к реализации, обсуждаемые в рамках курса — удовл.
4) задание не сдано до момента зачета/экзамена по курса — неудовл.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Практические задания:

1) Реализация трехмерного stencil-ядера с использованием разделяемой памяти, Multi-GPU, unified(или pinned) памяти.
2) Конкурсная реализация задачи поиска в ширину в графе.

Критерии оценивания каждого из практических заданий:
1) задание сдано преподавателю в обозначенный в курсе лекций срок, проведено детальное исследование эффективности и производительности полученной реализации — отл.
2) задание сдано преподавателю в обозначенный в курсе лекций срок, но не приведено достаточного обоснования производительности и эффективности разработанной реализации — хор.
3) задание сдано преподавателю позже указанного в курсе срока, либо при его решении используются заведомо неоптимальные подходы к реализации, обсуждаемые в рамках курса — удовл.
4) задание не сдано до момента зачета/экзамена по курса — неудовл.

Промежуточные тестирования:
1) Тестирование по базовым возможностям работы с графическими ускорителями: темы 1 — 5 представленной программы, 20 теоретических вопросов.
2) Тестирование по дополнительным возможностям программирования графических ускорителей: темы 6 — 10 представленной программы, 20 теоретических вопросов.

Критерии оценивания каждого из практических заданий:
1) 18 и более правильных ответов — отл.
2) 15 и более правильных ответов — хор.
3) 12 и более правильных ответов — удовл.
4) менее 12 правильных ответов — неудовл.

---

7. Ресурсное обеспечение:
7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература:

1) Попова Н.Н., Колганов А.С., Снытников А.В., Математическое моделирование и программная модель CUDA, издательство ООО "МАКС Пресс" (Москва) , ISBN ISBN 978-5-317-05911-8, 176 с., 2018 г.
2) Боресков А. В. и др. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учебное пособие. Издательство Московского университета, 2012
3) Сандерс Дж., Кэндрот Эд. Технология CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров. ДМК Пресс, 2011 г.

Дополнительная литература:
1) Pharr M (Ed.) GPU Gems 2. Programming Techniques for. High-Performance Graphics and. General-Purpose Computation. Addison-Wesley, 2005.

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства (подлежит обновлению при необходимости)

1) Программное обеспечение для подготовки слайдов лекций
2) Программное обеспечение для создания и просмотра pdf-документов
3) Пакет putty (или openssh)
4) CUDA Programming Toolkit со следующими компонентами: компилятор NVCC, NVIDIA command line profiler, NVIDIA Visual profiler, cuRAND, cuBLAS, cuSparse, NVGRAPH, thrust libraries, CUDA samples.

7.3. Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем (подлежит обновлению при необходимости)

http://www.edu.ru – портал Министерства образования и науки РФ
http://www.ict.edu.ru – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
http://www.openet.ru - Российский портал открытого образования
http://www.mon.gov.ru - Министерство образования и науки Российской Федерации
http://www.fasi.gov.ru - Федеральное агентство по науке и инновациям

7.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

CUDA Programming tookit: https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit
CUDA Developer additional resources: https://developer.nvidia.com/additional-resources
Stackoverflow, CUDA questions: https://stackoverflow.com/questions/tagged/cuda

7.5. Описание материально-технического обеспечения.

Медиапроектор и экран для проведения лекций-презентаций. Суперкомпьютерный комплекс на основе графических ускорителей для выполнения практических заданий.

8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.

9. Разработчик (разработчики) программы.

Афанасьев Илья Викторович (afanasiev_ilya@icloud.com)