

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Донецкий государственный университет»

Факультет математики и информационных технологий  
Кафедра теории упругости и вычислительной математики  
имени академика А.С. Космодамианского

УТВЕРЖДАЮ  
проректор

\_\_\_\_\_ П. А. Машаров  
«17» апреля 2025 г.  
МП

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Укрупненная группа направлений подготовки	01.00.00 Математика и механика
Программа высшего образования	Программа магистратуры
Направление подготовки	01.04.02 Прикладная математика и информатика
Направленность (профиль) образовательной программы	Прикладная математика и информатика
Квалификация	Магистр
Форма обучения	Очная

Рабочая программа может быть адаптирована для лиц  
с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Донецк 2025

Рабочая программа дисциплины **«Параллельное программирование алгоритмов исследования моделей деформирования»** для обучающихся по направлению подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика (Профиль: Прикладная математика и информатика), составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – магистратура по направлению подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 января 2018 г. № 13 (с изм. и доп.), Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 06 апреля 2021 г. № 245 (с изм. и доп.), в соответствии с учебным планом, утвержденным Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонГУ» для набора 2025 года.

Разработчик:

профессор кафедры теории упругости  
и вычислительной математики  
им. акад. А.С. Космодамианского,  
д-р. физ.-мат. наук, доцент

Р. Н. Нескородев

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры теории упругости и вычислительной математики им. акад. А.С. Космодамианского.  
Протокол от 03.04.2025 г. № 10.

И.о. заведующего кафедрой

И. А. Моисеенко

СОГЛАСОВАНО:

Декан факультета математики и  
информационных технологий  
16.04.2025 г.

И. А. Моисеенко

Учебно-методическая комиссия факультета математики и информационных технологий.  
Протокол от 16.04.2025 г. № 3.  
Председатель

Л. И. Селякова

Руководитель основной образовательной  
программы, д-р физ.-мат. наук, доц.  
03.04.2025 г.

Р. Н. Нескородев

## 1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Требования к предварительной подготовке обучающихся, предшествующие и сопутствующие дисциплины, на которых основывается изучение данной:

дисциплины программы бакалавриата: Математический анализ, Дискретная математика, Алгебра и геометрия, Архитектура компьютеров, Операционные системы, Численные методы, Языки и методы программирования, Алгоритмы и структуры данных.

дисциплины программы магистратуры: Методология и методы научных исследований, Дискретные математические модели.

1.2. Дисциплины, курсовые работы и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Индустриальные волновые технологии, Неклассические модели теории деформирования, Производственная практика: научно-исследовательская работа (обязательная), Производственная практика: преддипломная практика (обязательная).

## 2. ОПИСАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.1. Общая характеристика

Наименование показателя	Значение показателя
Название образовательной программы (далее – ОП)	01.04.02 Прикладная математика и информатика (Профиль: Прикладная математика и информатика)
Шифр и название в соответствии с учебным планом	Б1.В.ОД Параллельное программирование алгоритмов исследования моделей деформирования
Часть образовательной программы	Вариативная часть: выбор вуза
Количество зачетных единиц / всего часов	4 / 144

### 2.2. Распределение часов по формам и периодам обучения

Форма обучения	курс	семестр	Общее количество часов					Форма контроля
			лекционных	лабораторных	практических	самостоятельной работы + контроль	всего	
Очная	1	2	17	34	–	93	144	экзамен

## 3. ЦЕЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Формирование у студентов практических навыков организации параллельных алгоритмов для многопроцессорных вычислительных систем, в приобретении студентами теоретических и практических знаний в области параллельного программирования.

## 4. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ КОМПОНЕНТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ, ИХ ИНДИКАТОРЫ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

### 4.1. Компетенции

ОПК-1. Способен решать актуальные задачи фундаментальной и прикладной математики.

ПК-2. Способен разрабатывать и применять математические методы, системное и прикладное программное обеспечение для решения задач научной и проектно-технологической деятельности.

#### 4.2. Индикаторы компетенций

ОПК-1.2. Анализирует и исследует математические модели задач профессиональной деятельности на основе полученных теоретических знаний в области параллельных вычислений.

ПК-2.2. Разрабатывает и исследует полученные математические модели конкретных задач профессиональной деятельности с применением методик распараллеливания процессов.

#### 4.3. Результаты обучения

ОПК-1.2.1. Знает математические методы и системы параллельного программирования для разработки и реализации алгоритмов решения прикладных задач.

ОПК-1.2.2. Умеет осуществлять выбор и адаптацию математических методов и программного обеспечения для разработки и реализации алгоритмов решения задач профессиональной деятельности с использованием параллельных технологий.

ОПК-1.3.3. Владеет навыками осуществления тестирования параллельных программ для оценки достоверности полученных результатов.

ПК-2.2.1. Знает математические модели для решения задач профессиональной деятельности и методы их модификации с учетом возможностей параллельных вычислений.

ПК-2.2.2. Умеет использовать, анализировать и модифицировать математические модели в современном естествознании с использованием параллельных подходов.

### 5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Название темы	Краткое содержание темы (вопросы темы)
Раздел 1. Принципы построения параллельных вычислительных систем.	Параллельные компьютеры и суперЭВМ. Классификация параллельных вычислительных систем. Типы параллелизма. Параллелизм на уровне команд. Конвейер. Суперскалярность. SIMD команды. Параллелизм на уровне задач.
Раздел 2. Анализ вычислительной сложности параллельных алгоритмов	Аналитические методы определения вычислительной сложности. Оценка вычислительной сложности для последовательных алгоритмов. Показатели для оценки параллельных алгоритмов: ускорение, эффективность и стоимость параллельных алгоритмов. Экспериментальные методы определения вычислительной сложности.
Раздел 3. Разработка параллельных программ	Декомпозиция по функциям и по данным. Планирование параллельных программ. Зависимости данных. Способы синхронизации. Определение стоимости программы с учетом параллельного выполнения. Масштабируемость.
Раздел 4. Параллельное программирование при помощи технологии OpenMP	Параллельные и последовательные области. Директива parallel. Распараллеливание оператора цикла. Использование параллельных секций. Синхронизация потоков. Параллельные методы матричного умножения. Вычисление определенного интеграла в многопроцессорной системе. Параллельные алгоритмы сортировки данных. Задача поиска кратчайших путей в графе.

## 6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## 6.1. Форма обучения – очная, курс – 1, семестр – 2

Наименования разделов и тем	Количество часов				
	Лекц.	Лабор.	Практ.	СРС+К	Всего
Раздел 1. Принципы построения параллельных вычислительных систем.	<b>4</b>	<b>8</b>	–	<b>22</b>	<b>34</b>
Параллельные компьютеры и суперЭВМ. Классификация параллельных вычислительных систем. Типы параллелизма.	2	4	–	10	16
Параллелизм на уровне команд. Конвейер. Суперскалярность. SIMD команды. Параллелизм на уровне задач.	2	4	–	12	18
Раздел 2. Анализ вычислительной сложности параллельных алгоритмов.	<b>4</b>	<b>8</b>	–	<b>24</b>	<b>36</b>
Аналитические методы определения вычислительной сложности. Оценка вычислительной сложности для последовательных алгоритмов.	2	4	–	12	18
Показатели для оценки параллельных алгоритмов: ускорение, эффективность и стоимость параллельных алгоритмов. Экспериментальные методы определения вычислительной сложности.	2	4	–	12	18
Раздел 3. Разработка параллельных программ.	<b>6</b>	<b>8</b>	–	<b>24</b>	<b>38</b>
Декомпозиция по функциям и по данным. Планирование параллельных программ. Зависимости данных.	4	4	–	12	20
Способы синхронизации. Определение стоимости программы с учетом параллельного выполнения. Масштабируемость.	2	4	–	12	18
Раздел 4. Параллельное программирование при помощи технологии OpenMP.	<b>3</b>	<b>10</b>	–	<b>23</b>	<b>36</b>
Параллельные и последовательные области. Директива parallel. Распараллеливание оператора цикла. Использование параллельных секций. Синхронизация потоков.	2	6	–	12	20
Параллельные методы матричного умножения. Вычисление определенного интеграла в многопроцессорной системе. Параллельные алгоритмы сортировки данных. Задача поиска кратчайших путей в графе.	1	4	–	11	16
<b>ИТОГО ПО КОМПОНЕНТУ ОПОП</b>	<b>17</b>	<b>34</b>	–	<b>93</b>	<b>144</b>

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (СРЕДСТВА) ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### 7.1. Контрольные вопросы

1. Предположим, что один землекоп может за час вырыть яму размером  $1 \times 1 \times 1$  м<sup>3</sup> и способен работать в таком режиме достаточно долго. За какое время бригада из 5, 10, 20 землекопов выроет яму размером  $2 \times 2$  м<sup>2</sup> и глубиной 1 м.
2. Постройте график времени выполнения работы в зависимости от числа землекопов в бригаде.
3. Повторите задания п. 1, 2 для ямы  $10 \times 10$  м<sup>2</sup>, глубиной 1 м и бригады из 10, 100 землекопов.
4. Конвейерное устройство состоит из пяти устройств. Времена срабатываний ступеней равны 1, 1, 2, 1 и 3 такта соответственно. С какой максимальной частотой на выходе данного устройства будут появляться результаты, если на его вход аргументы поступают без перебоев?
5. За какое минимальное число тактов может быть выполнено 70 операций, если в распоряжении есть устройство, описанное в задаче 5.
6. В компьютере есть 7 параллельно работающих устройств, каждое из которых может выполнить операцию за 7 единиц времени. За какое минимальное время этот компьютер обработает 7 независимых операций?
7. Конвейерное устройство состоит из  $k$  ступеней, срабатывающих за  $n_1, n_2, \dots, n_k$  тактов соответственно. За какое минимальное число тактов может быть выполнено  $m$  операций на таком устройстве?
8. Назовите уровни параллелизма. К какому уровню относится конвейерная обработка команд?
9. Что такое временная сложность алгоритма?
10. Какие показатели используются для оценки параллельных алгоритмов?
11. Оцените 2 алгоритма, стоимости которых в последовательном и параллельном режиме одинаковы. Имеет ли смысл использовать параллельный алгоритм в этом случае?
12. Определите значения ускорения, эффективности и стоимости, если известны следующие временные характеристики: для 6 процессоров время выполнения последовательной части составляет 25 % и время выполнения параллельной части составляет 75 %.
13. Определите временную сложность для алгоритма вычисления суммы элементов одномерного массива в последовательном режиме. Проверьте экспериментально полученные соотношения.
14. Определите временную сложность для алгоритма сортировки методом простой вставки одномерного массива в последовательном режиме. Проверьте экспериментально полученные соотношения.
15. Определите временную сложность для алгоритма вычисления скалярного произведения двух одномерных векторов в последовательном режиме. Проверьте экспериментально полученные соотношения.
16. Определите временную сложность для алгоритма вычисления произведения матрицы на вектор в последовательном режиме. Проверьте экспериментально полученные соотношения.
17. Определите временную сложность для алгоритма вычисления произведения прямоугольных матриц в последовательном режиме. Проверьте экспериментально полученные соотношения.
18. Определите значения ускорения, эффективности и стоимости для алгоритма вычисления суммы элементов одномерного массива, если: а) число процессоров не ограничено; б) число процессоров задано ( $p > 2$ ).

19. Что определяют условия Бернштейна?
20. Используя *GCD* тест, проверить наличие или отсутствие зависимости для цикла:  
`for(i=0; i<n; ++i) x[i]=x[2*i];`
21. Может ли ускорение быть больше, чем число ядер процессора, в каком случае это возможно?
22. Для каких операционных систем и языков программирования есть поддержка OpenMP?
23. Как программно проверить, что режим OpenMP включен?
24. В каких единицах возвращает время функция *omp\_get\_wtime()*? Как определить точность измерения времени? Напишите соответствующий код.
25. Составьте функции для вычисления скалярного произведения двух векторов в последовательном и параллельном режимах. Для накопления суммы в параллельном режиме используйте *reduction*. Сравните производительности функций.
26. Составьте функции для умножения матрицы на вектор в последовательном и параллельном режимах. Для накопления сумм в параллельном режиме используйте *reduction*. Сравните производительности функций.
27. Пусть параллельный участок программы содержит вывод элементов массива, сформированных в процессе вычислений. Как обеспечить вывод в естественном порядке, а не в порядке выполнения потоков? Напишите функции с выводом в произвольном и фиксированном порядке. Измерьте время выполнения функций для обоих вариантов. Сделайте выводы.

## 7.2. Темы индивидуальных заданий

- 1) Вычислить элементы двумерного квадратного массива  $(a_{ij})$   $(i, j = \overline{0, N-1})$ , используя для вычисления функцию  $a_{ij} = f(i, j)$  при помощи последовательного и параллельного алгоритмов. Для различных значений размерности массива  $N$  и количества процессорных ядер определить экспериментально показатели эффективности для этих алгоритмов и сравнить их с ожидаемыми. Результаты представить в виде таблицы. Сделайте соответствующие выводы.
  - 2) а) Выполните реализацию параллельного алгоритма умножения матрицы на вектор, основанного на ленточном разбиении матрицы на горизонтальные полосы. Проведите вычислительные эксперименты с учетом параметров используемой вычислительной системы. Сравните результаты реальных экспериментов с теоретическими оценками. В качестве исходной матрицы  $A$  используйте двумерный массив из индивидуального задания 1, выбирая вариант из табл. 1. В качестве вектора  $b$  выбрать один из столбцов матрицы  $A$ .
    - б) Выполните параллельную реализацию матричного умножения  $A \cdot A$ , проведите соответствующие эксперименты и сделайте выводы.
  - 3) Провести численные эксперименты для последовательной и двух параллельных версий двумерного интегрирования функции  $f(x, y)$  по области  $D = [0, a] \times [0, a]$  с помощью формулы параллелепипедов в многоядерной вычислительной системе. Построить диаграммы, сделать соответствующие выводы.
  - 4) Выполните реализацию последовательного и параллельного алгоритмов обобщенной пузырьковой сортировки (чет-нечетная перестановка). Массив сортируемых данных генерировать случайным образом. Проведите вычислительные эксперименты. Сравните полученные экспериментальные результаты с теоретическими оценками. Сделайте выводы.
  - 5) Выполните реализацию параллельного алгоритма Флойда. Проведите вычислительные эксперименты. Постройте теоретические оценки с учетом параметров

используемой вычислительной системы. Сравните полученные оценки с экспериментальными данными.

### 7.3.Образец содержания экзаменационного билета

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № X

1. Параллельные компьютеры и суперЭВМ.
2. Способы синхронизации потоков в OpenMP.
3. Пусть в решаемой задаче используется восемь процессоров и при этом достигается ускорение в два раза. Если использовать закон Амдала, какова доля последовательной части
  - a)  $3/7$
  - b)  $1/3$
  - c)  $2/5$
4. Ускорение параллельных вычислений - это
  - a) отношение времени последовательного алгоритма ко времени параллельного решения задачи
  - b) отношение времени параллельного алгоритма ко времени последовательного решения задачи
  - c) отношение доли распараллеленности задачи к количеству процессоров

В случае ведения учебного процесса с использованием электронного обучения и дистанционных образовательных технологий, содержание билета может отличаться от приведенного.

### 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛЛОВ, КОТОРЫЕ ПОЛУЧАЮТ ОБУЧАЮЩИЕСЯ

Общая оценка знаний обучающихся по дисциплине проводится по 100-балльной шкале исходя из максимума, приведенного в таблице ниже. Организационно-учебная работа в аудитории оценивается на основе таких критериев как посещаемость занятий, своевременное и качественное выполнение домашних заданий, активность во время проведения лекционных и практических занятий (участие в обсуждении текущего и пройденного материала, решение задач и т.п.).

Номера разделов	Виды работ	Максимальное количество баллов
1-4	Организационно-учебная работа в аудитории	
	Самостоятельная работа	
	Контрольные работы по практике	
	Контрольная работа по теоретическому материалу	30
	Индивидуальное задание	70
ИТОГО		100
Экзамен		100
Общий итог за семестр		100



## Соответствие баллов оценке

Количество баллов из 100	ECTS	Оценка по пятибалльной шкале	
		Экзамен, дифференцированный зачет	Зачет
90-100	A	отлично	зачтено
80-89	B	хорошо	зачтено
75-79	C		зачтено
70-74	D	удовлетворительно	зачтено
60-69	E		зачтено
35-59	FX	неудовлетворительно	не зачтено
0-34	F		не зачтено

## 9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Учебные занятия проводятся в Главном корпусе ДонГУ (г. Донецк, пр. Гурова, 6), в Учебно-практическом вычислительном центре ДонГУ (г. Донецк, пр. Гурова, 6, корпус 12).

Для проведения лекций требуется аудитория, оборудованная меловой или маркерной доской / сенсорным экраном / мультимедийный проектор с экраном и ноутбуком, комплект учебной мебели для студентов, рабочее место преподавателя.

Для проведения практических занятий требуется аудитория, оборудованная меловой или маркерной доской / сенсорным экраном / мультимедийный проектор с экраном и ноутбук, комплект учебной мебели для студентов, рабочее место преподавателя.

Для проведения лабораторных занятий требуется аудитория, оборудованная маркерной доской или сенсорным экраном / мультимедийный проектор с экраном и ноутбук, персональные компьютеры, комплект учебной мебели для студентов, рабочее место преподавателя, выход в Интернет – проводной или с использованием Wi-Fi.

Для самостоятельной работы используются текстовые и электронные ресурсы Научной библиотеки университета и других электронных библиотечных баз данных, учебно-методическое обеспечение, представленное в аудиториях Главного корпуса (ауд. 511, 605, 610).

Обучающиеся имеют возможность использовать учебные материалы по дисциплине, размещенные на платформе Moodle Центра дистанционного образования ФГБОУ ВО «ДонГУ». При изучении дисциплины применяются электронное обучение и дистанционные образовательные технологии.

С использованием ресурсов платформы дистанционного образования осуществляется текущий контроль знаний обучающихся на основе тестирования и проверки результатов самостоятельной работы.

## 10. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

## 10.1. Основная литература

1. Нескороев, Р.Н. Параллельное программирование [Электронный ресурс]: учебное пособие / Р.Н. Нескороев; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет». – Донецк: ДонНУ, 2019. – электронные данные (1 файл).

2. Нескороев, Р.Н. Организация параллельных вычислений при помощи технологии OpenMP [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика / Р. Н. Нескороев; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет». – Донецк: ДонНУ, 2019. – электронные данные (1 файл).

## 10.2. Дополнительная литература

3. Воеводин В.В. Параллельные вычисления: Учеб. пособие для вузов по направлению "Прикладная математика и информатика" / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
4. Качко Е.Г. Параллельное программирование / Е.Г. Качко. – Харьков: Форт, 2011. – 528 с.
5. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии / А.Б. Барский. – М.: Интернет-Ун-т информ. технологий: БИНОМ. Лаб. знаний, 2007. – 502 с.
6. Гегель В.П. Теория и практика параллельных вычислений / В.П. Гегель. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 424 с.
7. Калоеров С.А. Программирование на языке C++: учеб. пособие / С.А. Калоеров. – Донецк: Юго-Восток, 2009. – 298 с.
8. Бахвалов, Н. С. Численные методы: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. спец. вузов / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 2-е изд. – М.: Лаб. Баз. Знаний; СПб.: Невский диалект, 2008. – 640 с.

## 11. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. **Национальная электронная библиотека (НЭБ):** федеральная государственная информационная система / Министерство Культуры РФ; Российская государственная библиотека. – Москва, 2019- . – URL: <https://rusneb.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный, подписка. Необходима установка программного обеспечения. – Текст: электронный.
2. **eLIBRARY.RU:** научная электронная библиотека: сайт. – Москва, 2000- . – URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
3. Научная электронная библиотека **«КиберЛенинка»:** сайт / Ассоциация «Открытая наука». – Москва, 2014- . – URL: <https://cyberleninka.ru/>. – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
4. Электронно-библиотечная система **«Лань»:** [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
5. **ЭБС Юрайт:** электронная библиотечная система: сайт. – Москва, 2013. – URL: <https://biblio-online.ru> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
6. **Электронно-библиотечная система ДонГУ:** сайт / ФГБОУ ВО «ДонГУ». – Донецк, 2016- . – URL: <http://library.donnu.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
7. **Электронный каталог** Научной библиотеки ДонГУ: раздел сайта / НБ ДонГУ. – Текст: электронный // ЭБС ДонГУ: сайт. – URL: <http://library.donnu.ru/catalog/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: поиск свободный, электронные документы – для пользователей ДонГУ.

## 12. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Windows 7 PRO (корпоративная лицензия ДонГУ № 46484614)
2. Microsoft Office (корпоративная лицензия ДонГУ № 46472919)
3. Microsoft Visual Studio (лицензия программы Dream Spark для высших учебных заведений)
4. Антивирус Касперского, Adobe Acrobat Reader, xPDF (лицензии GPL, Apache, BSD для свободного программного обеспечения).