

## УЧЕБНЫЙ КУРС «ПРОГРАММИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ONEAPI»\*

© 2022 А.В. Сысоев, А.В. Горшков, В.Д. Волокитин,  
Н.В. Шестакова, И.Б. Мееров

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
(603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23)*

*E-mail: sysoyev@vmk.unn.ru, anton.v.gorshkov@gmail.com, volokitin@itmm.unn.ru,  
shestakova@vmk.unn.ru, meerov@vmk.unn.ru*

Поступила в редакцию: 15.09.2022

Современные высокопроизводительные вычислительные системы в массе своей являются гетерогенными. Разработка параллельных программ, способных использовать весь потенциал таких систем, сопряжена со значительными сложностями — требуется не только применять соответствующие языки и технологии программирования, но и учитывать особенности центральных и графических процессоров, влияющие в том числе на схемы организации параллелизма и работу с памятью. На упрощение процесса разработки таких программ направлена модель гетерогенного программирования oneAPI, представленная компанией Intel, и ее ключевой компонент — язык Data Parallel C++, позволяющий разрабатывать переносимые высокопроизводительные программы для CPU, GPU, FPGA и других устройств. В статье представлен учебный курс по oneAPI, разработанный в ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Курс направлен на изучение широкого спектра вопросов, связанных с высокопроизводительными вычислениями с использованием моделей, методов и инструментов параллельного программирования на платформах Intel. В статье представлена концепция курса, описана его структура, категории слушателей, которым он может быть интересен, и варианты построения курса в зависимости от уровня подготовки аудитории.

*Ключевые слова: образование, высокопроизводительные вычисления, параллельное программирование, гетерогенные вычислительные системы, Data Parallel C++, SYCL.*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сысоев А.В., Горшков А.В., Волокитин В.Д., Шестакова Н.В., Мееров И.Б. Учебный курс «Программирование с использованием модели oneAPI» // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2022. Т. 11, № 3. С. 45–58. DOI: 10.14529/cmse220303.

### Введение

Одна из тенденций последнего десятилетия заключается в появлении широкого спектра вычислительных архитектур, уникальные особенности которых требуют разработки, освоения и применения соответствующих языков и средств программирования. Известно, что затраты на подготовку специалистов, способных квалифицированно использовать языки и средства программирования для создания высокопроизводительных программ, существенно отличаются. Так, например, языки C, C++ и Fortran, широко применяемые для разработки программных средств численного моделирования, изучаются при подготовке бакалавров по всему миру, тогда как CUDA, позволяющая программировать для GPU, требует существенно больших трудозатрат (и предварительных знаний) при ее освоении. Принимая во внимание тот факт, что основные средства программирования для CPU и GPU не совместимы, а особенности разных вычислительных архитектур требуют использо-

\*Статья рекомендована к публикации программным комитетом Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России – 2022».

вания специфичных приемов оптимизации кода, нередко требуется разработка, поддержка и развитие нескольких версий программного кода. На это обычно не хватает ресурсов.

Для решения этой проблемы разрабатываются универсальные средства разработки программ (языки, расширения для языков, библиотеки), которые позволяют использовать один язык параллельного программирования для разных вычислительных устройств. Среди таких средств можно отметить OpenCL, OpenACC, SYCL, alpaka, Kokkos и другие разработки. В данной работе мы основываемся на недавно представленном языке гетерогенного программирования Data Parallel C++ (DPC++) [1], который основан на стандарте языка SYCL и является частью модели oneAPI, вобравшей в себя практически весь набор библиотек и инструментов программирования, разработанный в компании Intel за последние десятилетия. Наличие обширного и хорошо проработанного инструментария (компиляторы, профилировщики, отладчик, анализатор кода, математические библиотеки, средства организации и поддержки параллелизма, проблемно-ориентированные библиотеки) и сообщества разработчиков и пользователей является достоинством oneAPI и DPC++, и в целом дает надежду на успешное развитие этого проекта. Несмотря на то, что вопрос переносимости производительности (performance portability) далек от своего решения, сам факт использования единого инструментария уже является существенным шагом вперед. Этими соображениями и обусловлен наш интерес к разработке учебного курса по модели oneAPI и языку DPC++.

Учебный курс по любой технологии параллельного программирования опирается на два предположения относительно слушателя, приступающего к его освоению.

1. Слушатель владеет базовыми знаниями по основам алгоритмизации, модульному программированию, алгоритмам и структурам данных, а также имеет опыт применения этих знаний, как минимум, на учебных задачах.
2. Слушатель владеет языком программирования, на котором построена рассматриваемая технология, как минимум, в той степени, при которой в представленных в курсе примерах программ ему не встречаются незнакомые конструкции языка.

Другими словами, в рамках курса по технологии параллельного программирования слушателя не нужно учить разработке последовательных программ на требуемом этой технологией языке. Однако в силу новизны языка DPC++ курс по модели oneAPI может быть интересен разным категориям слушателей с существенно разным уровнем подготовки на входе. Таким образом, в основу построения структуры курса была положена идея модульности и возможности адаптации его наполнения и длительности, исходя из целей обучения и особенностей аудитории.

Дальнейшее изложение в статье построено следующим образом. В разделе 1 представлен обзор положения дел в области подготовки специалистов по высокопроизводительным вычислениям. В разделе 2 изложены требования к уровню знаний слушателя курса, как обязательные, так и желательные, а также описаны категории слушателей, которым курс по oneAPI может быть полезен/интересен. В разделе 3 описана структура курса, в разделе 4 обобщен первый опыт его прочтения.

## 1. Аналогичные работы

Разработка курсов по параллельным вычислениям [2–6] ведется в России и в мире на протяжении многих лет. Среди российских разработок отметим курсы по параллельным базам данных [7, 8], по основам параллельных вычислений для систем с общей [9, 10] и с рас-

пределенной [10] памятью, по параллельным алгоритмам решения задач вычислительной математики [11], по математическим и алгоритмическим основам параллельных вычислений [12], по преподаванию элементов параллельного программирования в школе [13]. Значительный вклад в развитие образовательного сообщества в России внес масштабный проект «Суперкомпьютерное образование», объединивший усилия многих специалистов по всей стране, на протяжении нескольких десятилетий развивавших данную тематику ([14–17]), а также создание Суперкомпьютерного консорциума университетов России.

Несмотря на обилие высококачественных образовательных материалов по параллельным вычислениям, появляющиеся новые технологии требуют разработки новых курсов. В этой связи необходимо особо отметить область гетерогенных вычислений. Давно установлено, что само по себе параллельное программирование сложнее «обычного» программирования, не только в плане вопросов организации данных и алгоритмов, а также производительности вычислений, но и, особенно, в плане тестирования и отладки кода. Не случайно ведущие производители программного обеспечения направляют значительные усилия на разработку соответствующего инструментария (например, отладчика Intel Inspector, входящего в пакет Parallel Studio). Практика показала, что подготовка специалистов по GPU-программированию — еще более сложный вопрос из-за повышенного «порога вхождения» в тему. В сравнении с параллельным программированием для CPU, в данном случае повышаются требования к слушателям в части изучения архитектуры графических процессоров и соответствующих подходов к оптимизации производительности, отличающихся от аналогичных методов для обычных процессоров. Дополнительно усложняется и отладка. Описанные сложности являются одним из дополнительных факторов при разработке моделей, методов и языков для гетерогенного программирования, цель которых — предоставить единые средства для разработки программ, которые могут работать на разных архитектурах, а при необходимости использовать в расчетах разнородные устройства. Одним из таких языков является SYCL и его расширение от компании Intel — Data Parallel C++ [1]. Именно этому языку и, в целом, модели программирования OneAPI и посвящен данный курс.

К настоящему времени учебных материалов по SYCL и DPC++ разработано не так много, соответствующее развитие образовательной экосистемы только начинается. В этой связи прежде всего отметим книгу [1], недавно опубликованные курсы [18, 19], а также серию лекций от отдельных авторов [20] и коммерческих компаний [21]. В целом появление подобных материалов наряду с организацией конференций и воркшопов показывают наличие интереса к данной тематике и доказывают актуальность разработки новых учебных курсов.

## 2. Слушатели курса и требования к уровню их подготовки

Модель oneAPI представляет язык разработки гетерогенных параллельных программ DPC++. Язык DPC++ основан на стандарте языка программирования SYCL, который, в свою очередь, в значительной степени является расширением языка программирования C++ [22–24] (стандарта 11 и выше). Таким образом, курс по oneAPI добавляет к базовым требованиям к слушателю — знаниям по основам алгоритмизации и структурам данных — еще и владение языком программирования C++, а также объектно-ориентированным программированием (ООП). Как ООП, так и базовый C++ не могут быть с хоть сколько-нибудь необходимой детальностью изложены в рамках курса по oneAPI и являются обязательными входными требованиями.

При этом, несмотря на то, что существенное обновление языка, привнесенное стандартом C++ 11 и, пусть и в меньшей степени, продолженное последующими стандартами (14, 17 и 20), произошло уже более десяти лет назад, многие учебные курсы, использующие язык C++ в качестве базового при изложении концепций и технологий программирования, включая ООП, все еще ориентированы на изложение C++ 98/03. Как следствие, те конструкции DPC++, которые основаны на возможностях современного C++, могут быть слушателям, с ними незнакомыми, не вполне понятны. Выходов из ситуации видится два: 1) включить во входные требования к курсу по oneAPI знания по C++ стандартов 11 и выше; 2) изложить используемые в DPC++ конструкции современного C++ непосредственно в курсе по oneAPI.

Проанализировав совместно с коллегами из компании Intel язык DPC++ с точки зрения набора используемых им элементов C++ из стандартов, начиная с 11-го, мы пришли к выводу, что этот набор ограничен в достаточной степени, чтобы в рамках курса по oneAPI можно было реализовать именно второй вариант, не повышая тем самым входные требования к потенциальным слушателям.

Аналогичным образом обстоит дело еще с двумя областями знаний: архитектуры вычислительных систем и операционные системы. Качественное освоение любого курса по параллельному программированию и высокопроизводительным вычислениям невозможно без определенного уровня знаний об архитектурах параллельных вычислительных систем [25, 26] и ключевых возможностях современных операционных систем [27, 28], на которых базируется разработка параллельных программ. Предварительное изучение соответствующих курсов безусловно будет полезно перед тем, как приступить к знакомству с миром разработки параллельных программ, но, тем не менее, не является строго обязательным. Необходимый минимум сведений из архитектур и операционных систем может быть изложен непосредственно в курсе по параллельному программированию в виде дополнительных начальных модулей, которые для подготовленных слушателей могут быть как сокращены, так и опущены вовсе.

Как уже было отмечено во введении, курс по oneAPI может быть интересен разным категориям слушателей. В первую очередь, это студенты бакалавриата, уже прошедшие через курсы по основам программирования, алгоритмам и структурам данных, и освоившие язык C++ и технологию ООП. Курс может быть полезен магистрантам, возможно уже знакомым с какими-то из технологий разработки параллельных программ (OpenMP, TBB, MPI и др.). Курс может заинтересовать и преподавателей вузов, читающих учебные курсы по технологиям параллельного программирования и желающих их актуализировать. Наконец, в силу новизны языка DPC++ курс может привлечь и специалистов в области высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий, желающих попробовать и/или освоить новую технологию. Очевидно, что каждой из указанных категорий слушателей требуется разная степень детальности изложения материала, каждая из них на входе в курс обладает разными входными знаниями и опытом. Именно по этой причине структура курса по oneAPI построена в виде отдельных модулей, часть из которых может быть опущена и/или сокращена при соответствующем уровне подготовки слушателей.

### 3. Структура курса

Курс состоит из 6 модулей:

1. Введение в мир суперкомпьютерных вычислений.

2. Архитектурные механизмы, влияющие на производительность. Уровни параллелизма.
3. Операционные системы. Аспекты параллелизма.
4. Программирование на языке Data Parallel C++.
5. Программные библиотеки и инструменты oneAPI.
6. Высокопроизводительные вычисления и научное моделирование. Примеры использования.

Модули 2 и 3 относятся к необязательным и, как уже было сказано выше, могут быть сокращены или опущены.

Модуль по DPC++ является основным в курсе. Именно к нему, в первую очередь, относятся сформулированные в разделе 2 входные требования к слушателям.

Модуль 5 содержит обзорные материалы по библиотекам, включенным компанией Intel в oneAPI, а также инструментам, поддерживающим процесс разработки параллельных программ.

В модуле 6 демонстрируется использование библиотек и инструментов oneAPI при решении задач в научных проектах.

Рассмотрим содержание модулей более подробно.

### **3.1. Модуль «Введение в мир суперкомпьютерных вычислений»**

Продолжительность модуля — одна лекция.

Предварительные требования к освоению модуля отсутствуют.

В модуле дается обзор предметной области суперкомпьютерных вычислений, показывается разнообразие типов вычислительных систем и подходов к разработке параллельных программ. Обсуждаются сильные и слабые стороны подходов. Демонстрируется, чем DPC++ может помочь разработчикам параллельных программ для гетерогенных вычислительных систем.

### **3.2. Модуль «Архитектурные механизмы, влияющие на производительность. Уровни параллелизма»**

Продолжительность модуля — две лекции.

Предварительные требования к освоению модуля отсутствуют.

В модуле рассматриваются ключевые особенности современных вычислительных архитектур, с точки зрения высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий. Обсуждается их влияние на производительность и эффективность параллельных программ.

### **3.3. Модуль «Операционные системы. Аспекты параллелизма»**

Продолжительность модуля — две лекции, одна практика.

Предварительные требования к освоению модуля отсутствуют.

В модуле дается обзор ключевых особенностей современных операционных систем с точки зрения разработки параллельных программ. Рассматриваются процессы, потоки и планирование времени центрального процессора. Обсуждаются вопросы синхронизации выполнения потоков.

### **3.4. Модуль «Программирование на языке Data Parallel C++»**

Модуль состоит из пяти лекций и пяти практик.

Предварительные требования к освоению модуля: знание технологий структурного, модульного и объектно-ориентированного программирования. Знание C++ 98/03 или C++ 11. Представление об архитектуре многоядерных центральных процессоров. Представление об архитектуре графических процессоров. Представление о потоках и их синхронизации.

Поскольку данный модуль является в курсе основным, его структуру и наполнение рассмотрим более детально.

### *Лекция 0. Элементы современного C++*

Рассматриваются конструкции языка C++, появившиеся в нем в стандарте C++ 11 и последующих, активно используемые при разработке параллельных программ на языке DPC++.

### *Практика 0. Элементы современного C++ 11, используемые в DPC++*

### *Лекция 1. Введение в Data Parallel C++*

Основные темы лекции:

- обзор Intel oneAPI — концепция, языки, библиотеки, инструменты;
- базовые понятия гетерогенного программирования — хост, устройство, ядро, очередь, типы памяти;
- язык DPC++, основные особенности — язык высокого уровня, единый исходный код для всех поддерживаемых устройств, стандартный C++;
- модель SPMD (single program, multiple data);
- обработка ошибок;
- вывод информации с устройства.

### *Практика 1. Hello World*

Задачи практики:

- вывести в консоль все доступные платформы и устройства средствами DPC++;
- разработать ядро (kernel), чтобы напечатать “Hello” из ядра каждого из устройств.

### *Лекция 2. Исполнение ядер в Data Parallel C++*

Основные темы лекции:

- модель исполнения ядра DPC++;
- запуск ядра — анатомия ядра, типы параллелизма, индексация потоков/групп;
- измерение времени выполнения ядра;
- групповые алгоритмы.

### *Практика 2. Вычисление двойного интеграла методом сумм Римана*

Задачи практики:

- реализовать на DPC++ вычисление заданного интеграла с использованием средней суммы Римана;
- сравнить производительность ядра для разных платформ и числа разбиений.

### *Лекция 3. Управление памятью в Data Parallel C++*

Основные темы лекции:

- модель памяти;
- буферы и объекты доступа (аксессоры);
- типы аксессоров;
- атомарные операции;
- унифицированная разделяемая память;
- пример: матрично-векторное умножение.

### *Практика 3. Решение систем линейных уравнений методом Якоби*

Задачи практики:

- реализовать на DPC++ решение системы уравнений методом Якоби;
- разработать три версии — с использованием аксессоров, разделяемой памяти (модель USM), памяти устройства;
- сравнить производительность для разных версий, устройств и входных данных.

### *Лекция 4. Оптимизация программ на Data Parallel C++*

Основные темы лекции:

- базовые рекомендации;
- глобальная память;
- локальная память;
- подгруппы;
- приватная память;
- векторизация;
- высокопроизводительные библиотеки.

### *Практика 4. Умножение матриц*

Задачи практики:

- реализовать на DPC++ умножение матриц;
- разработать четыре версии — «наивную», блочную, векторизованную блочную, с использованием oneMKL;
- сравнить производительность для разных версий, устройств и входных данных.

## **3.5. Модуль «Программные библиотеки и инструменты oneAPI»**

Продолжительность модуля — две лекции, одна практика, три мастер-класса.

Предварительные требования к освоению модуля отсутствуют.

В модуле дается краткий обзор библиотек IPP, oneVPL, oneDAL, oneMKL, oneTBB, oneDPL с точки зрения их использования при разработке параллельных программ. Более детально рассматривается работа с библиотекой oneVPL. В виде мастер-классов демонстрируется оптимизация программ с использованием Intel VTune и Intel Advisor, а также вопросы высокопроизводительного вывода нейронных сетей с Intel Distribution of OpenVINO toolkit.

### 3.6. Модуль «Высокопроизводительные вычисления и научное моделирование. Примеры использования»

Продолжительность модуля — четыре мастер-класса.

Предварительные требования к освоению модуля: знание технологий структурного, модульного и объектно-ориентированного программирования; знание C++ 11; знание языка DPC++.

В модуле предполагается продемонстрировать использование библиотек и инструментов oneAPI при решении задач в научных проектах. Запланированы следующие мастер-классы:

- портирование модуля движения частиц [29–31] на DPC++ (анализ и оптимизация производительности на CPU и GPU с использованием Intel VTune);
- анализ финансовых рынков: вычисление формулы Блэка–Шоулса (анализ и оптимизация производительности на CPU и GPU с использованием Intel VTune);
- интегрирование уравнений Максвелла методом FDTD (анализ и оптимизация производительности на CPU и GPU);
- вычисления в смешанной точности на CPU и GPU на примере задачи интегрирования уравнений Максвелла методом FDTD.

В настоящий момент готовы первый и второй мастер-класс, остальные находятся в разработке.

## 4. Внедрение курса в учебный процесс

При разработке курса мы ориентировались на его всестороннюю апробацию, сбор отзывов от разных категорий слушателей и соответствующую адаптацию материалов. В начале мы провели серию открытых лекций, преимущественно ориентированных на студентов 3-6 курсов, которые ранее уже занимались проблематикой высокопроизводительных вычислений. На основе полученной обратной связи, а также в ходе консультаций с разработчиками oneAPI была сформирована программа курса, описанная в предыдущем разделе статьи. После разработки основной части материалов курс был прочитан студентам магистерской программы «Вычислительные методы и суперкомпьютерные технологии» [32]. С использованием материалов курса был проведен мастер-класс на конференции «Суперкомпьютерные дни в России» (Москва, сентябрь 2021 года). Материалы курса прошли рецензирование у разработчиков oneAPI. По итогам была разработана и опубликована текущая версия материалов курса на русском [33] и английском [34] языках.

В январе 2022 года была организована в онлайн-формате программа повышения квалификации по программированию с использованием модели oneAPI для преподавателей вузов и сотрудников НИИ России. Получены положительные отзывы по результатам прохождения обучения, материалы переданы коллегам для дальнейшего использования.

## 5. Заключение

В статье представлен учебный курс по oneAPI, разработанный в ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Приведена модульная структура курса и указаны соображения, положенные в основу его организации. Описаны категории слушателей, которым курс по oneAPI может быть полезен/интересен, а также изложены требования к предварительному уровню знаний слушателей.



Отличительная особенность курса — демонстрация использования возможностей oneAPI при решении практических задач из разных предметных областей. Часть запланированных примеров уже включена в курс, еще несколько из реальных научных проектов Центра суперкомпьютерных технологий ННГУ находятся в процессе доработки.

*Учебный курс разработан в Центре компетенций oneAPI ННГУ при поддержке компании Intel. Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования, проект № 0729-2020-0055.*

## Литература

1. Reinders J., Ashbaugh B., Brodman J., *et al.* Data Parallel C++ Mastering: DPC++ for Programming of Heterogeneous Systems using C++ and SYCL. Apress Berkeley, CA, 2021. 548 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5574-2.
2. Воеводин В.В. Параллельные вычисления и математическое образование // Математика в высшем образовании. 2005. Т. 3. С. 9–26. URL: [https://www.mathedu.ru/text/mvo\\_2005\\_3/p9/](https://www.mathedu.ru/text/mvo_2005_3/p9/).
3. Nevison C.H. Parallel computing in the undergraduate curriculum // Computer. 1995. Vol. 28, no. 12. P. 51–56. DOI: 10.1109/2.476199.
4. El-Rewini H., Lewis T.G. Distributed and parallel computing. Manning Publications Co., 1998.
5. Crichlow J.M. An introduction to distributed and parallel computing. Prentice-Hall, 1988.
6. Grama A., Gupta A., Karypis G., Kumar V. Introduction to parallel computing. Addison-Wesley, 2003. 664 p.
7. Цымблер М.Л., Соколинский Л.Б., Лепихов А.В. Прототипирование параллельной СУБД как основа учебного курса по параллельным системам баз данных // Суперкомпьютерные системы и их применение. 2004. С. 212–217.
8. Соколинский Л.Б., Цымблер М.Л. Лекции по курсу «Параллельные системы баз данных». URL: <https://pds.susu.ru/CourseManual.html> (дата обращения: 14.09.2022).
9. Биллиг В.А. Параллельные вычисления и многопоточное программирование. Москва: НОУ «ИНТУИТ», 2016.
10. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем. Москва: Издательство Московского университета, 2010. 534 с.
11. Баркалов К.А., Мееров И.Б., Бахраков С.И. Об опыте разработки и чтения курса лекций «Параллельные численные методы» // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, 28–29 сентября, 2015. Москва: Московский государственный университет, 2015. С. 772–775.
12. Антонов А.С., Воеводин В.В., Попова Н.Н. Параллельная структура алгоритмов и подготовка специалистов по вычислительным технологиям // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. 2017. С. 4–11.
13. Плаксин М.А. О пропедевтике параллельных вычислений в школьной информатике // Информатика и образование. 2016. № 10. С. 27–36.

14. Антонов А.С., Воеводин В.В., Гергель В.П., Соколинский Л.Б. Системный подход к суперкомпьютерному образованию // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2, № 2. С. 5–17. DOI: 10.14529/cmse130201.
15. Воеводин В.В., Гергель В.П., Соколинский Л.Б., др. Развитие системы суперкомпьютерного образования в России: текущие результаты и перспективы // Вестник Нижегородского университета. 2013. Т. 2, № 2. С. 203–209.
16. Воеводин В.В., Гергель В.П. Суперкомпьютерное образование: третья составляющая суперкомпьютерных технологий // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11. С. 117–122.
17. Гергель В.П., Демкин В.П., Коньков К.А. и др. Проект «Суперкомпьютерное образование»: 2012 год // Вестник Нижегородского университета. 2013. 1(1). С. 12–16.
18. Fuentes J., López D., González S. Teaching Heterogeneous Computing Using DPC++ // IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS Workshops 2022, Lyon, France, May 30 - June 3, 2022. IEEE, 2022. P. 354–360. DOI: 10.1109/ipdpsw55747.2022.00069.
19. Heterogeneous programming with SYCL. URL: <https://enccs.github.io/sycl-workshop/> (дата обращения: 14.09.2022).
20. Владимиров К. Краткий обзор современного гетерогенного программирования в OpenCL и SYCL а также расширения от Intel, составляющие DPC++. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fAVOPJLu2qA> (дата обращения: 14.09.2022).
21. SYCL Training. URL: <https://www.codeplay.com/solutions/sycl-training/> (дата обращения: 14.09.2022).
22. Stroustrup B. The C++ Programming Language (4th Edition). Addison-Wesley, 2013. 1376 p.
23. Josuttis N.M. The C++ Standard Library – A Tutorial and Reference, second edition. Addison-Wesley, 2012. 1136 p.
24. C++ FAQ. URL: <https://isocpp.org/wiki/faq> (дата обращения: 14.09.2022).
25. Паттерсон Д., Хеннесси Д. Архитектура компьютера и проектирование компьютерных систем. Издательский Дом ПИТЕР, 2012. 784 с.
26. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. 4-е изд. Издательский Дом ПИТЕР, 2015. 704 с.
27. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. Издательский Дом ПИТЕР, 2015. 1120 с.
28. Коньков К., Карпов В. Основы операционных систем: курс лекций: учеб. пособие для вузов. НОУ «ИНТУИТ», 2016.
29. Код Hi-Chi. URL: <https://github.com/hi-chi/pyHiChi> (дата обращения: 14.09.2022).
30. О проекте. URL: <http://hpc-education.unn.ru/en/research/overview/laser-plasma> (дата обращения: 14.09.2022).

31. Volokitin V., Bashinov A.V., Efimenko E., *et al.* High Performance Implementation of Boris Particle Pusher on DPC++. A First Look at oneAPI // Parallel Computing Technologies - 16th International Conference, PaCT 2021, Kaliningrad, Russia, September 13-18, 2021, Proceedings. Vol. 12942 / ed. by V. Malyshkin. Springer, 2021. P. 288–300. Lecture Notes in Computer Science. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3\_22.
32. Meyerov I.B., Sysoyev A., Pirova A., *et al.* Bridging the Gap Between Applications and Supercomputing: A New Master's Program in Computational Science // Supercomputing - 5th Russian Supercomputing Days, RuSCDays 2019, Moscow, Russia, September 23-24, 2019, Revised Selected Papers. Vol. 1129 / ed. by V.V. Voevodin, S. Sobolev. Springer, 2019. P. 529–541. Communications in Computer and Information Science. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9\_43.
33. Программирование с использованием модели oneAPI. URL: <https://hpc-education.unn.ru/ru/центр-компетенций-oneapi-в-ннгу/курс-oneapi> (дата обращения: 14.09.2022).
34. Programming with oneAPI. URL: <https://hpc-education.unn.ru/en/the-oneapi-center-of-excellence/programming-with-oneapi> (дата обращения: 14.09.2022).

Сысоев Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (национальный исследовательский университет) (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Горшков Антон Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (национальный исследовательский университет) (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Волокитин Валентин Дмитриевич, младший научный сотрудник, кафедра математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (национальный исследовательский университет) (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Шестакова Наталья Валерьевна, старший преподаватель кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (национальный исследовательский университет) (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Мееров Иосиф Борисович, к.т.н., доцент, зам.зав. кафедрой математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (национальный исследовательский университет) (Нижний Новгород, Российская Федерация)

## PROGRAMMING WITH ONEAPI: A NEW COURSE ON HETEROGENEOUS COMPUTING

© 2022 A.V. Sysoyev, A.V. Gorshkov, V.D. Volokitin,  
N.V. Shestakova, I.B. Meyerov

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
(pr. Gagarina 23, Nizhny Novgorod, 603022 Russia)*

*E-mail: sysoyev@vmk.unn.ru, anton.v.gorshkov@gmail.com, volokitin@itmm.unn.ru,  
shestakova@vmk.unn.ru, meerov@vmk.unn.ru*

Received: 15.09.2022

Modern high-performance computing systems are mostly heterogeneous. The development of parallel programs that can use the full potential of such systems is fraught with significant difficulties. It is required not only to use the appropriate programming languages and technologies, but also to take into account the features of central and graphic processors that affect, among other things, the implementation of parallel schemes and memory management. The oneAPI heterogeneous programming model presented by Intel is aimed at simplifying the process of developing such programs, and its key component is the Data Parallel C++ language, which allows developing portable high-performance programs for CPU, GPU, FPGA and other devices. The article presents a training course on oneAPI, developed at the Lobachevsky University. The course is aimed at studying a wide range of issues related to high-performance computing using models, methods and tools for parallel programming on Intel platforms. The article presents the concept of the course, describes its structure, categories of listeners who may be interested in it, and options for building a course depending on the level of preparation of the audience.

*Keywords: education, high performance computing, parallel programming, heterogeneous computing systems, Data Parallel C++, SYCL.*

### FOR CITATION

Sysoyev A.V., Gorshkov A.V., Volokitin V.D., Shestakova N.V., Meyerov I.B. Programming with oneAPI: New Course Heterogenous Computing. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 45–58. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse220303.

*This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.*

### References

1. Reinders J., Ashbaugh B., Brodman J., *et al.* Data Parallel C++ Mastering: DPC++ for Programming of Heterogeneous Systems using C++ and SYCL. Apress Berkeley, CA, 2021. 548 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5574-2.
2. Voevodin V.V. Parallel Computing and Mathematics Education. Mathematics in higher education. 2005. Vol. 3. P. 9–26. URL: [https://www.mathedu.ru/text/mvo\\_2005\\_3/p9/](https://www.mathedu.ru/text/mvo_2005_3/p9/) (in Russian).
3. Nevison C.H. Parallel computing in the undergraduate curriculum. Computer. 1995. Vol. 28, no. 12. P. 51–56. DOI: 10.1109/2.476199.
4. El-Rewini H., Lewis T.G. Distributed and parallel computing. Manning Publications Co., 1998.

5. Crichlow J.M. An introduction to distributed and parallel computing. Prentice-Hall, 1988.
6. Grama A., Gupta A., Karypis G., Kumar V. Introduction to parallel computing. Addison-Wesley, 2003. 664 p.
7. Zymbler M.L., Sokolinsky L.B., Lepihov A.V. Prototyping a Parallel DBMS as the Basis for a Training Course on Parallel Database Systems. Supercomputer systems and their applications. 2004. P. 212–217. (in Russian).
8. Sokolinsky L.B., Zymbler M.L. Training course “Parallel database systems”. URL: <https://pdbs.susu.ru/CourseManual.html> (accessed: 14.09.2022) (in Russian).
9. Billig V.A. Parallel Computing and Multithreaded Programming. Moscow: INTUIT, 2016. (in Russian).
10. Gergel V.P. High performance computing for multiprocessor multicore systems. Moscow: Moscow University Press, 2010. 534 p. (in Russian).
11. Barkalov K.A., Meyerov I.B., Bastrakov S.I. About the experience of developing and teaching the course of lectures “Parallel Numerical Methods”. Russian Supercomputer Days in Russia: Proceedings of the international conference, September 28–29, 2015. Moscow: Moscow State University, 2015. P. 772–775. (in Russian).
12. Antonov A.S., Voevodin V.V., Popova N.N. Parallel structure of algorithms and training of specialists in computing technologies. Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics. 2017. P. 4–11. (in Russian).
13. Plaksin M.A. On propaedeutics of parallel computing in school informatics. Computer science and education. 2016. No. 10. P. 27–36. (in Russian).
14. Antonov A.S., Voevodin V.V., Gergel V.P., Sokolinsky L.B. A systematic approach to supercomputing education. Bulletin of the South Ural State University. Computational Mathematics and Software Engineering. 2013. Vol. 2, no. 2. P. 5–17. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse130201.
15. Voevodin V.V., Gergel V.P., Sokolinsky L.B., *et al.* Development of the system of supercomputer education in Russia: current results and prospects. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. 2013. Vol. 2, no. 2. P. 203–209. (in Russian).
16. Voevodin V.V., Gergel V.P. Supercomputer education: the third component of supercomputer technologies. Computational methods and programming. 2010. Vol. 11. P. 117–122. (in Russian).
17. Gergel V.P., Demkin V.P., Konkov K.A., *et al.* Project “Supercomputer Education”: 2012. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. 2013. 1(1). P. 12–16. (in Russian).
18. Fuentes J., López D., González S. Teaching Heterogeneous Computing Using DPC++. IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS Workshops 2022, Lyon, France, May 30 - June 3, 2022. IEEE, 2022. P. 354–360. DOI: 10.1109/ipdpsw55747.2022.00069.
19. Heterogeneous programming with SYCL. URL: <https://enccs.github.io/sycl-workshop/> (accessed: 14.09.2022).
20. Vladimirov K. A brief overview of modern heterogeneous programming in OpenCL and SYCL, as well as extensions from Intel that are part of DPC++. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fAVOPJLu2qA> (accessed: 14.09.2022) (in Russian).

21. SYCL Training. URL: <https://www.codeplay.com/solutions/sycl-training/> (accessed: 14.09.2022).
22. Stroustrup B. The C++ Programming Language (4th Edition). Addison-Wesley, 2013. 1376 p.
23. Josuttis N.M. The C++ Standard Library – A Tutorial and Reference, second edition. Addison-Wesley, 2012. 1136 p.
24. C++ FAQ. URL: <https://isocpp.org/wiki/faq> (accessed: 14.09.2022).
25. Patterson D., Hennessy J. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann, 2011. 856 p.
26. Tanenbaum A. Structured Computer Organization. Pearson, 2012. 704 p.
27. Tanenbaum A., Bos H. Modern Operating Systems. Pearson, 2014. 1136 p.
28. Konkov K., Karpov V. Fundamentals of operating systems: a course of lectures: a textbook for universities. NOU INTUIT, 2016. (in Russian).
29. Hi-Chi. URL: <https://github.com/hi-chi/pyHiChi> (accessed: 14.09.2022).
30. About project. URL: <http://hpc-education.unn.ru/en/research/overview/laser-plasma> (accessed: 14.09.2022).
31. Volokitin V., Bashinov A.V., Efimenko E., *et al.* High Performance Implementation of Boris Particle Pusher on DPC++. A First Look at oneAPI. Parallel Computing Technologies - 16th International Conference, PaCT 2021, Kaliningrad, Russia, September 13-18, 2021, Proceedings. Vol. 12942 / ed. by V. Malyshkin. Springer, 2021. P. 288–300. Lecture Notes in Computer Science. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3\_22.
32. Meyerov I.B., Sysoyev A., Pirova A., *et al.* Bridging the Gap Between Applications and Supercomputing: A New Master’s Program in Computational Science. Supercomputing - 5th Russian Supercomputing Days, RuSCDays 2019, Moscow, Russia, September 23-24, 2019, Revised Selected Papers. Vol. 1129 / ed. by V.V. Voevodin, S. Sobolev. Springer, 2019. P. 529–541. Communications in Computer and Information Science. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9\_43.
33. Programming with oneAPI. URL: <https://hpc-education.unn.ru/ru/центр-компетенций-oneapi-в-ннгу/курс-oneapi> (accessed: 14.09.2022) (in Russian).
34. Programming with oneAPI. URL: <https://hpc-education.unn.ru/en/the-oneapi-center-of-excellence/programming-with-oneapi> (accessed: 14.09.2022).