

Портативный HybriLIT: экономичный вычислительный кластер для образовательных целей и опыт его применения

Д.В. Беляков, Я. Буша, Е.В. Земляная,
М. А. Матвеев, О. И. Стрельцова

Аннотация — В статье представлен опыт разработки и применения портативного кластера HybriLIT — лёгкой HPC-платформы, предназначенной для образовательных целей. Возрастающая потребность в обучении параллельным вычислениям и работе с HPC-системами требует доступных и реалистичных инструментов для подготовки студентов и специалистов. Портативный HybriLIT воспроизводит ключевые элементы современной вычислительной инфраструктуры, включая SSH-доступ, модульную среду, планировщик задач SLURM, поддержку многопроцессорных вычислений (CPU и GPU), обеспечивая реалистичный опыт взаимодействия с HPC-системами. Основными преимуществами предложенного решения являются низкая стоимость, простота сборки и возможность автономной работы в условиях отсутствия интернет-соединения, что особенно актуально для выездных школ, хакатонов и учебных курсов в удалённых регионах. В статье приводятся аппаратно-программное описание кластера, примеры сценариев его использования в образовательных мероприятиях, статистика проведённых курсов и рекомендации по созданию аналогичных решений в других учебных заведениях.

Ключевые слова — Портативный кластер, HybriLIT, параллельные вычисления, учебный кластер, имитационная среда, суперкомпьютерное обучение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Знания о параллельных вычислениях и практические навыки организации ресурсоемких расчетов в параллельном режиме с применением специализированных технологий программирования являются в настоящее время необходимым элементом образовательного багажа ИТ-специалистов, поскольку большинство современных вычислительных систем реализованы с параллельной архитектурой [1-3].

Современный уровень научных исследований и высоких технологий требует постоянного наращивания производительности вычислительных ресурсов, что эффективно достигается за счёт использования кластерных систем, характеризующихся высокой масштабируемостью, удобством системного администрирования и эффективностью применения в таких системах современных методов распределенных и параллельных вычислений [4-6]. Практически все

суперкомпьютерные архитектуры топовой производительности, включаемые в регулярно обновляемый список TOP500 самых мощных вычислительных систем в мире [7], построены на основе кластерных технологий.

Отметим, что высокое быстродействие и общедоступность современных вычислительных систем «эконом-класса», к которым можно отнести персональные компьютеры, ноутбуки, планшеты и смартфоны, позволяет успешно решать широкий спектр вычислительных задач, что может создать иллюзию полной достаточности этих вычислительных средств для всех сфер человеческой жизнедеятельности. Между тем существует огромное количество так называемых «больших задач» [8], для решения которых требуются значительные объемы памяти и затраты компьютерного времени, доступные только на очень мощных вычислительных системах, имеющих параллельную (многоядерную и многопроцессорную), гетерогенную и распределенную архитектуру. Подобные задачи возникают и в научных исследованиях (молекулярная биология, физика высоких энергий, климатология и др.), и в банковской сфере, и при обработке поисковых запросов, и в промышленных высокотехнологичных разработках (компьютерное моделирование краш-тестов в автомобиле- и самолетостроении, создание новых лекарственных препаратов, оптимизация спортивного снаряжения и др.). Для решения именно таких задач необходимы вычислительные системы топовой производительности и инструменты для расчетов на таких системах.

Организация высокопроизводительных вычислений (HPC, High Performance Computing) на суперкомпьютерных системах требует специальных навыков разработки алгоритмов и применения технологий программирования, ориентированных на параллельную архитектуру таких систем. Поэтому в Государственном университете «Дубна» студенты начинают знакомство с технологиями параллельного программирования и организации параллельных вычислений уже на первом курсе [9], в рамках дисциплины «Архитектура вычислительных систем».

Более 20 лет обучение технологиям параллельного программирования на разных курсах в Государственном университете «Дубна» проводилось с использованием вычислительных ресурсов Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова

Объединенного института ядерных исследований (ЛИТ ОИЯИ), в том числе, начиная с 2016 года, – на гетерогенной вычислительной платформе HybriLIT, которая является частью Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ЛИТ ОИЯИ [10,11]. Платформа HybriLIT в настоящее время включает в себя суперкомпьютер «ГОВОРУН» и учебно-тестовый полигон HybriLIT (кластер HybriLIT), имеющие единую программно-информационную среду.

Портативный кластер HybriLIT, разработанный в ЛИТ ОИЯИ, был введен в эксплуатацию в рамках образовательной деятельности Государственного университета «Дубна» в конце 2021 года в связи с ограничительными мерами, направленными на повышение уровня безопасности вычислительной инфраструктуры ОИЯИ, что сделало невозможным организовывать доступ к вычислительным ресурсам ОИЯИ для возросшего количества студентов ИТ-профиля. С этого времени вычислительные практикумы по дисциплинам, предусматривающим изучение и освоение навыков параллельных вычислений: «Архитектура вычислительных систем» и «Технологии высокопроизводительных вычислений» (бакалавриат), а также по курсу «Архитектура и технологии высокопроизводительных систем» (магистратура) – проходят на установленном для этой цели в Государственном университете «Дубна» мобильном учебно-вычислительном кластере (далее – портативный кластер). Портативный кластер HybriLIT, хотя и значительно уступает по производительности, количеству вычислительных узлов, объему памяти и другим параметрам ресурсам платформы HybriLIT в ЛИТ ОИЯИ, позволяет студентам не только успешно освоить базовые технологии и методы параллельных вычислений, но и получить практический опыт работы на вычислительных системах с параллельной архитектурой в рамках информационно-программной среды, характерной для таких высокопроизводительных ресурсов, как суперкомпьютер «Говорун».

Четырехлетний опыт применения портативного учебно-вычислительного кластера в образовательных целях подтвердил надежность, эффективность и удобство такого программно-аппаратного решения. В данной работе описаны особенности архитектуры и программного обеспечения портативного кластера HybriLIT и особенности его использования в рамках образовательной программы Государственного университета «Дубна».

Отметим, что помимо регулярных учебных курсов описанный портативный кластер может рассматриваться как удобное и относительно недорогое решение для проведения учебных практик и занятий по параллельного программированию и проведению тренингов по высокопроизводительным вычислениям в географически удаленных местах с очень плохим или полностью отсутствующим интернет-соединением, где подключение к вычислительной инфраструктуре какой-либо организации во время занятий невозможно. Опыт использования портативного кластера в таком режиме показал его эффективность в рамках проведения tutorиалов в Летних научных школах «Липня»

(о. Липня), а также занятий и хакатонов в рамках международных летних школ молодых ученых «Современные информационные технологии для решения научных и прикладных задач» (Владикавказ) и Школы по информационным технологиям ОИЯИ (Дубна).

II. ПОРТАТИВНЫЙ HYBRLIT – ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Предложенное решение с точки зрения архитектуры портативного мини-кластера включает один высокоскоростной маршрутизатор, способный обслуживать множество одновременных подключений, и несколько (как минимум два) компьютеров, которые предоставляют сервисы пользователям. Компьютеры подключаются к 1 Gbps портам маршрутизатора с помощью сетевых кабелей.

Портативный кластер HybriLIT включает в себя три узла в компактном формате Tiny (Micro), обеспечивающих необходимую вычислительную мощность и функционал для выполнения учебных задач в области параллельных вычислений (Рис. 1). Данная вычислительная система построена на основе компьютеров со следующими аппаратными характеристиками:

- 2 × Lenovo ThinkStation P330
- процессор Intel Core i7-8700T (6 ядер, 12 потоков);
- графический ускоритель Nvidia Quadro P1000;
- оперативная память объемом 32 ГБ;
- сетевой интерфейс Ethernet 1 Gb/s.
- 1 × Dell OptiPlex 7070
- процессор Intel Core i9-9900 (8 ядер, 16 потоков);
- оперативная память объемом 16 ГБ;
- сетевой интерфейс Ethernet 1 Gb/s.



Рис. 1. Аппаратная конфигурация портативного учебно-вычислительного кластера, включающего сервисно-вычислительный узел и два вычислительных узла.

Несмотря на то, что большую часть времени портативный кластер используется в сети организации при проведении практических занятий по курсам, предполагающим освоение навыков параллельных вычислений, он также включает в себя WiFi-роутер, который обеспечивает возможность автономного использования системы в условиях отсутствия интернет-соединения. В таком режиме пользователи

подключаются к сети кластера через WiFi и получают доступ к его ресурсам, включая SSH-подключение и все необходимые сервисы.

В архитектуре кластера выделяется сервисно-вычислительный узел (узел 0 на рис. 1), реализованный на базе сервера Dell OptiPlex 7070. Этот узел не оснащён дискретным графическим ускорителем, однако обладает увеличенным количеством ядер центрального процессора и более объёмным локальным дисковым хранилищем по сравнению с остальными узлами. На нём размещены основные сервисы управления кластером, включая SSH-доступ, NFS, LDAP и SLURM. При этом данный узел может использоваться как полноценный вычислительный ресурс.

Другие два сервера (узел 1 и узел 2) функционируют как вычислительные узлы с графическим ускорителем, обеспечивая поддержку параллельных и гибридных вычислений на базе CPU и GPU, что позволяет эффективно решать учебные задачи в параллельном режиме. Все три сервера объединены в единую вычислительную систему, предоставляющую пользователям возможности работы в среде, максимально приближённой к инфраструктуре современных НРС-комплексов, включая вычислительные ресурсы платформы HybriLIT.

III. ПОРТАТИВНЫЙ HYBRILIT – СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ НА КЛАСТЕРЕ

Структура аппаратно-программного среды портативного кластера HybriLIT представлена на рис. 2. Как упоминалось выше, узел 0 выполняет функции сервисно-вычислительного узла и пользовательского интерфейса, в то время как узлы 1 и 2 функционируют как вычислительные узлы с поддержкой гибридных вычислений на базе CPU и GPU.

Для распределения вычислительных ресурсов между пользователями, а также для управления очередью заданий в портативном кластере HybriLIT используется планировщик задач SLURM. В процессе выполнения заданий через планировщик программ необходим доступ к пользовательским данным, который обеспечивается с помощью сетевой файловой системы NFS. Такое решение позволяет организовать единое пространство данных, доступное на всех вычислительных узлах кластера.

Задачи пользователей классифицируются на два основных типа в зависимости от используемых вычислительных ресурсов – CPU-ориентированные и GPU-ориентированные, поэтому для управления программными окружениями в системе установлен пакет Environment Modules, который позволяет гибко подключать необходимые библиотеки и инструменты. Применение такого модульного подхода обеспечивает пользователям портативного кластера возможность работы в вычислительной среде, аналогичной полнофункциональному НРС-комплексу.



Рис. 2. Структура аппаратно-программного окружения портативного кластера HybriLIT.

В процессе проведения занятий пользователи осуществляют подключение к сервисно-вычислительному узлу портативного кластера HybriLIT преимущественно по протоколам SSH или SFTP, что позволяет им работать в командной строке, передавать файлы и управлять вычислительными задачами. Для удобства работы возможно использование дополнительных программных инструментов, таких как PuTTY, WinSCP или X2Go, поддерживаемых различными операционными системами.

В портативном кластере HybriLIT учётные записи пользователей создаются специально для каждого образовательного курса и являются временными. Для обеспечения структурированного доступа формируется отдельный пул учётных записей, который передаётся преподавателям для распределения среди слушателей. Такой подход позволяет организовать управляемый доступ к ресурсам кластера и рационально распределять вычислительные мощности в рамках учебного процесса.

Каждому пользователю предоставляется возможность самостоятельно изменять пароль своей учётной записи, что способствует повышению уровня безопасности и защите конфиденциальной информации. Учётные записи удаляются по завершении курса вместе с пользовательскими данными. Такая практика обеспечивает подготовку инфраструктуры к проведению последующих образовательных мероприятий и способствует сохранению конфиденциальности пользовательской информации.

Как уже упоминалось выше, пользователь, подключаясь к портативному кластеру HybriLIT, должен иметь возможность работать в условиях, максимально приближённых к реальным. Для этого он должен:

- иметь возможность создавать и редактировать свои файлы, а также осуществлять компиляцию программ;
- запускать вычислительные задания с использованием планировщика задач SLURM;
- получать информацию о доступных вычислительных ресурсах, включая количество доступных ядер и наличие GPU;
- иметь возможность загружать необходимые модули программного окружения (например, OpenMPI, CUDA) через систему Environment Modules;

- использовать все доступные вычислительные ресурсы подключённых узлов для имитации многопроцессорной среды с поддержкой MPI;
- при наличии GPU на всех узлах запускать приложения, использующие гибридные вычисления на базе MPI и CUDA.

Все эти возможности обеспечиваются реализованной аппаратно-программной средой портативного кластера HybriLIT.

IV. ВНЕДРЕНИЕ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС – ИЗУЧАЕМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Мобильный учебно-вычислительный кластер, используемый в Университете «Дубна», предназначен для практического освоения технологий MPI, OpenMP и CUDA, относящихся к популярным и активно используемым инструментам параллельного программирования.

Несмотря на то, что технологии MPI (Message Passing Interface) и OpenMP (Open specifications for Multi-Processing) были разработаны и внедрены в 1990-х гг., они продолжают оставаться активно используемыми и входят в состав стандартного программного обеспечения практически любого кластера или суперкомпьютера, при этом имеются возможности работы с MPI и OpenMP на персональных и мобильных компьютерах. Обе технологии совместимы как между собой, так и с многими другими технологиями программирования.

Технология MPI [12] разрабатывалась с ориентацией в первую очередь на вычислительные системы с распределенной памятью. В идеализированном представлении такая вычислительная системы состоит из группы однородных параллельно работающих вычислительных устройств (MPI-процессов), в каждом из которых имеется собственная локальная память. Все процессы выполняют единую программу, при этом каждый процесс работает над данными в собственной локальной памяти и при необходимости имеет возможность обмениваться данными с остальными процессами в группе.

Технология MPI организована в виде библиотеки MPI-функций, обеспечивающих различные варианты обмена данными между параллельными MPI-процессами. Концепция MPI-программирования не зависит от конкретной вычислительной архитектуры и в настоящее время MPI успешно используется на многоядерных архитектурах, относящихся к системам с общей памятью.

В отличие от MPI, технология OpenMP [13] представляет собой вариант многопоточного программирования и предназначена для организации параллельных вычислений на компьютерах с общей памятью (включая, естественно, и многоядерные архитектуры). Концепция реализации параллелизма в OpenMP основана на директивах компилятору для выделения параллельных областей в программе, параллельного выполнения циклов и независимых фрагментов компьютерного кода. Благодаря равноправному доступу к общей памяти из разных

OpenMP-нитей, отсутствует необходимость явных пересылок данных. Наличие возможностей автоматического распараллеливания циклов и независимых фрагментов в целом упрощает разработку программы. Отметим, что на современных многоядерных архитектурах различия между двумя этими технологиями с точки зрения производительности вычислений «сглаживаются», поэтому реализация многих алгоритмов на MPI и OpenMP обеспечивает сопоставимые времена счета и динамику ускорения вычисления при увеличении количества параллельных MPI-процессов и OpenMP-нитей [14].

Среди технологий, ориентированных на специальные вычислительные архитектуры, наибольшую популярность в настоящее время имеет технология CUDA [15], разработанная компанией Nvidia для программирования на “гибридных” системах, состоящих из центрального и графического процессоров. В настоящее время в связи с популярностью таких архитектур, технология CUDA представляет собой достойную альтернативу для “классических” технологий параллельного программирования, так что её изучение наряду с MPI и OpenMP в рамках ИТ-дисциплин, предполагающих освоение параллельного программирования, представляется вполне оправданным.

Как упоминалось выше портативный кластер HybriLIT представляет собой гетерогенную вычислительную систему, включающую вычислительные узлы с многоядерными процессорами и графическими ускорителями. Кластер состоит из трех вычислительных узлов, один из которых дополнительно выполняет роль пользовательского сервера. Такая архитектура позволяет студентам и слушателям осваивать не только основные технологии параллельного программирования, но и может быть полезной для приобретения навыков работы со специализированными программными пакетами для расчетов на гетерогенных вычислительных кластерах.

Портативный кластер работает под управлением операционной системы CentOS Linux 7 (по состоянию на начало 2025 года). В доступное программное обеспечение входят компиляторы, библиотеки и инструменты для разработки, тестирования и оптимизации параллельных программ.

Пользователь при подключении к кластеру попадает на Узел 0 с пользовательским интерфейсом (Рис. 1). На этом сервере пользователь создает программу, компилирует её и затем запускает её на вычислительных узлах с помощью планировщика SLURM.

Для редактирования текстовых файлов на портативном кластере доступны редакторы vim, nano и mcedit (в составе Midnight Commander).

Как и на учебно-тестовом полигоне HybriLIT, на портативном кластере HybriLIT установлены пакет Environment Modules для управления программной средой и планировщик задач SLURM для распределения вычислительных ресурсов. По умолчанию в конфигурации SLURM заданы следующие параметры:

– DefMemPerCPU=512 (лимит оперативной памяти на одно CPU-ядро);
 – SelectType=select/cons_res и SelectTypeParameters=CR_Core_Memory (алгоритм отбора ресурсов по ядрам и памяти для более сбалансированной нагрузки кластера);
 – AccountingStorageTRES=gres/gpu и GresTypes=gpu (учёт и описание GPU ресурсов).

Для компиляции и запуска научных приложений установлены следующие компиляторы и интерпретаторы:

gcc, g++, mpicc, mpic++, mpiCC, mpicxx, mpif77, mpif90, mpifort, nvcc, python2.7 и python3.6.

Для компиляции программного кода параллельных вычислений на MPI, требуется загрузка модуля OpenMPI (версия 4.0.4). Для выполнения вычислений на графических процессорах необходимо подключение модуля CUDA (версия 11.0). Команды загрузки соответствующих модулей имеют вид:

```
$ module add openmpi/v4.0.4
$ module add cuda/v11.0
```

Для работы с OpenMP-программами загрузка специального модуля не требуется.

Данное программное обеспечение и указанные параметры настроек были подобраны исходя из опыта администрирования Гетерогенной платформы HybriLIT и на практике они показали свою эффективность для организации учебного процесса.

Работа с MPI-программами на учебном кластере аналогична порядку, принятому на кластере HybriLIT. Пользователь должен:

1. Подключиться к кластеру по протоколу SSH. Например, с помощью программы PuTTY, указав в поле Host Name: hydra.uni-dubna.ru.
2. Подготовить исходный код программы, используя доступные текстовые редакторы.
3. Загрузить необходимые модули окружения с помощью команды module add или module load.
4. Выполнить компиляцию программы с помощью соответствующего MPI-компилятора (mpicc, mpic++ и др.).
5. Создать скрипт-файл для запуска задачи через SLURM.
6. Запустить программу в batch (пакетном) режиме с помощью команды sbatch.

Отметим, что учебный кластер не обеспечен сервисами пользовательской поддержки, которые обычно присутствуют на крупных вычислительных системах, таких как гетерогенная вычислительная платформа HybriLIT. Информирование о правилах работы на учебном кластере и порядке его использования, а также регистрация студентов для удаленного доступа осуществляются преподавателями в рамках учебного процесса.

Также следует отметить, что подключение к учебному кластеру по протоколу SSH возможно не только в компьютерных классах Университета «Дубна», но и извне – с любых устройств, имеющих доступ к сети Интернет. Это обеспечивает студентам возможность

выполнения домашних заданий, лабораторных работ и самостоятельной работы для освоения учебного материала.

Как отмечалось ранее, на первом курсе бакалавриата студенты практически всех ИТ-направлений (в общей сложности более 200 человек) знакомятся с технологиями MPI и OpenMP в рамках дисциплины «Архитектура вычислительных систем» (ABC), используя портативный кластер HybriLIT.

На четвертом курсе бакалавриата более подробное освоение этих технологий, а также знакомство с технологией CUDA, происходит в рамках дисциплины «Технология высокопроизводительных вычислений» (ТБВ), преподаваемой студентам направлений «Прикладная математика и информатика», «Программная инженерия» и др. Количество студентов варьируется от 50 до 80 человек.

Наконец, в магистратуре студенты направлений «Системный анализ и управление» и «Прикладная математика и информатика» более детально изучают указанные технологии и особенности их применения для практических вычислительных задач, включая типовые методы вычислительной математики, в рамках дисциплины «Архитектура и технологии высокопроизводительных систем» (АиТВС).

Статистика по годам количества учетных записей, открываемых на портативном кластере HybriLIT каждый семестр, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Количество студентов по образовательным дисциплинам, в которых используется портативный вычислительный кластер за период 2022–2025 гг.

Год	1-ый курс ABC	4-ый курс ТБВ	Магистратура АиТВС
2021/2022	245	50	55
2022/2023	246	77	71
2023/2024	72*	72	30
2024/2025	209	68	10
Итого:	772	267	166

Таким образом, четырехлетнее практическое использование портативного кластера HybriLIT в рамках образовательной программы Государственного университета «Дубна» подтверждает надежность, эффективность и удобство предложенного программно-аппаратного решения для обучения студентов ИТ-профиля методам и технологиям параллельного программирования.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен опыт разработки, конфигурации и эксплуатации портативного вычислительного кластера HybriLIT, предназначенного для образовательных целей. Внедрение этой системы и его успешная эксплуатация в Государственном университете «Дубна» показали, что представленная система эффективно

* Уменьшение количества студентов в 2023/2024 учебном году связано с ограничением количества бюджетных мест в связи с процессом перехода Университета «Дубна» из областного в

воспроизводит вычислительную среду, характерную для современных HPC-комплексов, обеспечивая пользователям доступ к инструментам параллельных вычислений и работе с многопроцессорными и гибридными (CPU+GPU) архитектурами. Портативность, надежность, низкая стоимость и возможность автономной работы делают подобный портативный кластер востребованным инструментом для проведения выездных школ, хакатонов, учебных курсов и других образовательных мероприятий, особенно в условиях ограниченной сетевой инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения подобных систем в учебном процессе и демонстрируют потенциал их распространения в образовательных учреждениях. Портативный кластер HybriLIT может служить моделью для внедрения в других учебных учреждениях, заинтересованных в развитии компетенций в области высокопроизводительных вычислений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Александру Сергеевичу Айрияну за инициативу в подготовке данной статьи и значительный вклад в её реализацию, без которого данная публикация не была бы возможна, а также Марии Александровне Любимовой за идеи схематического представления материала и техническую поддержку при подготовке работы. Авторы также выражают признательность Дмитрию Владимировичу Подгайному, Яну Броулиму и Ивану Штеклу за поддержку и содействие в организации портативного вычислительного кластера HybriLIT.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Степанов А.Н. Архитектура вычислительных систем и компьютерных сетей, -СПб.: Питер, 2007. - 509 с.
- [2] Столлингс В., Структурная организация и архитектура компьютерных систем: Проектирование и производительность - 5. изд. - М.: Вильямс, 2002. - 892 с.
- [3] Таненбаум Э., Остин Т., Архитектура компьютера – 6. изд. - СПб.: Питер, 2022. – 816 с.
- [4] Воеводин Вл.В., Жуматий С.А. Вычислительное дело и кластерные системы. М.: Изд-во МГУ, 2007. - 150 с. ISBN 978-5-211-05440-0
- [5] Buyya, R. High Performance Cluster Computing: Architectures and Systems. USA: Prentice Hall PTR, 1999. - 849 p. ISBN: 978-0-13-013784-5
- [6] Buyya, R. High Performance Cluster Computing: Programming and Applications. USA: Prentice Hall PTR, 1999. – 664p. ISBN: 978-0-13-013785-2
- [7] Top 500 <https://top500.org/lists/top500/>
- [8] Воеводин В.В., Воеводин В.В. Параллельные вычисления: Пособие -СПб: Изд-во БХВ-Петербург, 2015. - 603 с.
- [9] Земляная Е.В., Башашин М.В. Введение в параллельное программирование на основе технологий MPI и OpenMP. Учебное пособие. Дубна: Гос. Ун-т «Дубна», 2023. – 101 с.
- [10] Гетерогенная вычислительная платформа HybriLIT: <http://hlit.jinr.ru/>
- [11] Adam Gh. et al. IT-ecosystem of the HybriLIT heterogeneous platform for high-performance computing and training of IT-specialists. CEUR Workshop Proceedings. — V. 2267., 2018 — P. 638-644.
- [12] Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI. Third Edition. – Cambridge, MA: MIT Press, 2014. – 384 p.

- [13] Гегель В.П., Современные языки и технологии параллельного программирования: Учебник. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 408 с.
- [14] Башашин М.В., Земляная Е.В., Сравнительный анализ производительности MPI- и OpenMP-программ на примере параллельных расчетов в рамках модели ядро-ядерного потенциала и модели φ 0-спинтроники. Современные информационные технологии и ИТ-образование, Т.18, №3, 2022, сс. 545-557.
- [15] Сандерс Д., Кэннон Э. Программирование GPU с использованием CUDA. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 336 с.

Статья получена 1 августа 2025.

Дмитрий Викторович Беляков, Объединённый институт ядерных исследований (e-mail: dmitry@jinr.ru)

Ян Буша (PhD), Объединённый институт ядерных исследований; Национальная научная лаборатория имени А.И. Алиханяна (Ереванский Институт Физики) (e-mail: busa@jinr.ru)

Елена Валериевна Земляная (д.ф.-м.н.), Объединённый институт ядерных исследований; Государственный университет «Дубна» (e-mail: elena@jinr.ru)

Михаил Александрович Матвеев, Объединённый институт ядерных исследований; Государственный университет «Дубна» (e-mail: matveevma@jinr.ru)

Оксана Ивановна Стрельцова (к.ф.-м.н.), Объединённый институт ядерных исследований; Государственный университет «Дубна» (e-mail: strel@jinr.ru)

Portable HybriLIT: a low-cost computing cluster for educational purposes and its implementation experience

Dmitry Belyakov, Ján Buša Jr., Elena Zemlyanaya,
Mikhail Matveev, Oksana Streltsova

Abstract — This article presents the development and implementation of the portable HybriLIT cluster—a lightweight HPC platform designed for educational purposes. The growing need for training in parallel computing and HPC systems requires accessible and realistic tools for preparing students and professionals. Portable HybriLIT replicates key elements of a modern computing infrastructure, including SSH access, a module environment, the SLURM task scheduler, and support for multiprocessor computing (CPU and GPU), providing a realistic experience of practical use the HPC system. The main advantages of the proposed solution are low cost, ease of assembly, and the ability to operate autonomously without an internet connection, which is especially relevant for mobile schools, hackathons, and training courses in remote regions. The article provides a hardware and software description of the cluster, examples of its use in educational activities, statistics on completed courses, and recommendations for creating similar solutions at other educational institutions.

Keywords — Portable cluster, HybriLIT, parallel computing, educational cluster, simulation environment, supercomputer training.

REFERENCES

- [1] Stepanov A.N. Architecture of computing systems and computer networks. Saint Petersburg “Piter”, 2007, 509p. (in Rus)
- [2] Stallings W., Computer Organization and Architecture: Designing for Performance, 5th Edition – M. Williams, 2002. – 892 p.
- [3] Tanenbaum A., Austin T., Structured computer organization – 6th Edition – Pearson, 2012. – 816 p.
- [4] Voevodin V., Zhumatiy S., Computing and cluster systems. Moscow, MSU, 2007, 150p. (in Rus). ISBN 978-5-211-05440-0
- [5] Buyya, R. High Performance Cluster Computing: Architectures and Systems. USA: Prentice Hall PTR, 1999. - 849 p. ISBN: 978-0-13-013784-5
- [6] Buyya, R. High Performance Cluster Computing: Programming and Applications. USA: Prentice Hall PTR, 1999. – 664p. ISBN: 978-0-13-013785-2
- [7] Top 500 <https://top500.org/lists/top500/>
- [8] Voevodin V.V., Voevodin Vi.V. Parallel Computing. Saint Petersburg, “BHV”, 2015, 603p. (in Rus)
- [9] Zemlyanaya E.V., Bashashin M.V. Introduction to Parallel Programming Based on MPI and OpenMP Technologies. Handbook. Dubna, State University “Dubna”, 2023, 101p. (in Rus)
- [10] Heterogeneous platform HybriLIT: <http://hlit.jinr.ru/>
- [11] Adam Gh. et al. IT-ecosystem of the HybriLIT heterogeneous platform for high-performance computing and training of IT-specialists. CEUR Workshop Proceedings. — V. 2267., 2018 — P. 638-644.
- [12] Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI. Third Edition. – Cambridge, MA: MIT Press, 2014. – 384 p.
- [13] Gergel V. G., Modern languages and technologies of parallel programming. Textbook. Moscow, MSU, 2012, 408p. (in Rus)
- [14] Bashashin M.V., Zemlyanaya E.V., Comparative Performance Analysis of MPI- and OpenMP Programs on the Example of Parallel Calculations in the Framework of the Nucleus-Nucleus Potential Model and the ϕ 0-Spintronic Model. Modern information technologies and IT education, T.18, №3, 2022, 545-557p. (rus).
- [15] Sanders J, Kandrot E. CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming, Addison-Wesley Professional, 2010. — 312 p.

Dmitry Viktorovich Belyakov, Joint Institute for Nuclear Research (e-mail: dmitry@jinr.ru)

Ján Buša Jr. (PhD), Joint Institute for Nuclear Research; Alikhanyan National Science Laboratory (Yerevan Physics Institute), Yerevan, Armenia (e-mail: busa@jinr.ru)

Elena Valerievna Zemlyanaya, Dr.Sci. Phys.-Math., Joint Institute for Nuclear Research; Dubna State University (e-mail: elena@jinr.ru)

Mikhail Aleksandrovich Matveev, Joint Institute for Nuclear Research; Dubna State University (e-mail: matveevma@jinr.ru)

Oksana Ivanovna Streltsova, Cand.Sci. Phys.-Math., Joint Institute for Nuclear Research; Dubna State University (e-mail: strel@jinr.ru)