*УДК 004.02*

***Игнатьев Д.А.,***
***студент***
***2 курс, факультет «Институт цифровых систем, автоматизации и энергетики»***
***Уфимский государственный нефтяной технический университет***
***Россия, г. Уфа***

# ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ОТ ЭКЗАФЛОПСА К КВАНТОВО-ФОТОННЫМ АРХИТЕКТУРАМ

***Аннотация:*** *В статье рассматриваются высокопроизводительные компьютерные системы (HPC), их современное состояние и перспективные направления развития. Основное внимание уделено двум новым технологическим парадигмам — гибридным квантово-классическим системам и фотонным вычислениям, способным преодолеть энергетические ограничения классических суперкомпьютеров.*

***Ключевые слова:*** *высокопроизводительные вычисления, суперкомпьютер, квантовые вычисления, фотонные вычисления, гетерогенные архитектуры.*

***Annotation:*** *The article discusses high-performance computer systems (HPC), their current state and promising areas of development. The main attention is paid to two new technological paradigms — hybrid quantum-classical systems and photonic computing, capable of overcoming the energy limitations of classical supercomputers.*

***Key words:*** *high-performance computing, supercomputer, quantum computing, photonic computing, heterogeneous architectures.*

Высокопроизводительные компьютерные системы (High-Performance Computing, HPC) представляют собой класс вычислительных систем, предназначенных для решения задач, требующих огромных вычислительных ресурсов и невыполнимых на стандартных компьютерах за приемлемое время. Производительность лидирующих суперкомпьютеров уже превысила экзафлопс (1018 операций с плавающей точкой в секунду), что открывает новые горизонты для науки и промышленности [1].

HPC играет ключевую роль в моделировании климата, разработке новых лекарств, астрофизике, промышленном проектировании и обучении больших нейросетевых моделей. Однако дальнейший рост производительности упирается в фундаментальные ограничения: энергопотребление, тепловыделение и законы масштабирования, что стимулирует активный поиск новых архитектурных решений. Именно этим обусловлен интерес к квантовым и фотонным технологиям, способным преодолеть барьеры классических вычислительных систем.

**Классификация архитектур HPC**

Высокопроизводительные системы классифицируются по архитектурным признакам.

Основные типы:

– Массово-параллельные системы (MPP) — системы с распределённой памятью, состоящие из большого числа вычислительных узлов, соединённых высокоскоростной сетью. Масштабируются до сотен тысяч узлов.

– Кластерные системы — наиболее распространённый тип, собранный из стандартных серверов. Относительно недороги и легко модернизируются.

– Системы с общей памятью (SMP) — несколько процессоров имеют доступ к единому адресному пространству памяти. Проще в программировании, но ограничены по масштабируемости.

– Гетерогенные системы — объединяют CPU, GPU, TPU, FPGA и специализированные ускорители. Именно гетерогенный подход позволил достичь экзафлопсной производительности.

**Аппаратное обеспечение HPC**

Аппаратная база HPC постоянно эволюционирует. Ключевые компоненты: Процессоры: Intel Xeon (до 60 ядер), AMD EPYC (до 128 ядер), ARM-процессоры (Fujitsu A64FX).

Графические процессоры: NVIDIA H100 и A100 (лидеры в области ускорения вычислений), AMD Instinct MI300, Intel Max GPU.

Сети передачи данных: InfiniBand (до 400 Гбит/с), Slingshot (HPE), RoCE (Ethernet с поддержкой RDMA).

Системы хранения: распределённая файловая система Lustre, технология GPUDirect Storage для прямого доступа GPU к данным.

**Программное обеспечение для HPC**

Эффективное использование HPC-систем требует специализированного программного обеспечения. Доминирующей операционной системой является Linux.

Для параллельного программирования используются библиотеки MPI (для распределённой памяти), OpenMP (для общей памяти), CUDA и OpenCL (для GPU). Управление ресурсами обеспечивается системами Slurm (наиболее популярная), PBS Pro и IBM Spectrum LSF [2, 3, 4].

**Суперкомпьютер МГУ-270**

Важным примером российской HPC-разработки является суперкомпьютер «МГУ-270», созданный в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова и введённый в эксплуатацию 1 сентября 2023 года. Система является самой мощной в России для задач искусственного интеллекта. Её пиковая производительность в операциях половинной точности (FP16/BF16), критически важных для обучения нейронных сетей, достигает 400 петафлопс [6].



***Рисунок 1. Суперкомпьютер «МГУ-270»***

Система построена примерно на ста современных графических ускорителях и оснащена высокоскоростным интерконнектом. «МГУ-270» используется для разработки и обучения больших языковых моделей, фундаментальных исследований в области искусственного интеллекта, решения задач в физике, химии, биологии и медицине, а также для подготовки высококвалифицированных кадров в сфере ИИ. По состоянию на февраль 2025 года суперкомпьютер полностью загружен исследовательскими задачами, что подтверждает высокий спрос на отечественные HPC-ресурсы.

**Перспективные технологии**

Современные классические HPC-системы достигли экзафлопсной производительности, но дальнейший рост ограничен энергопотреблением, тепловыделением и фундаментальными законами масштабирования. Ответом на эти вызовы становятся две принципиально новые технологические парадигмы: гибридные квантово-классические системы и фотонные вычисления.

**Гибридные квантово-классические системы**

Идея заключается в тесной интеграции классических вычислительных узлов (CPU и GPU) с квантовыми процессорами (QPU) в рамках единой суперкомпьютерной архитектуры. Классическая часть управляет общим вычислительным процессом, подготавливает данные и выполняет

последовательные операции, а квантовый ускоритель берёт на себя задачи, для решения которых у него есть экспоненциальное преимущество.

В отличие от классического бита, который может находиться в состоянии 0 или 1, квантовый бит (кубит) может находиться в суперпозиции — одновременно в состоянии 0 и 1 с определёнными вероятностями. Кроме того, кубиты могут быть запутаны, что позволяет мгновенно передавать информацию между ними. Эти свойства обеспечивают экспоненциальный выигрыш в производительности для таких задач, как моделирование сложных молекул, задачи оптимизации, криптоанализ и поиск в неструктурированных базах данных.

Разработки в этом направлении ведутся ведущими технологическими компаниями мира. IBM и AMD объявили о совместной работе над созданием квантово-ориентированных суперкомпьютеров нового поколения. NVIDIA предлагает платформу CUDA-Q и специализированное межсоединение NVQLink с задержкой менее 4 микросекунд. Компания QuEra на конференции SC’25 продемонстрировала действующий прототип, в котором её нейтрально-атомный квантовый процессор был интегрирован с серверами Dell на базе NVIDIA GPU [8].

Прогнозируется, что к 2030 году гибридные квантово-классические системы станут стандартным инструментом для решения определённых классов научных и инженерных задач.

**Фотонные и оптические вычисления**

Вторая революционная технология основана на использовании фотонов (частиц света) вместо электронов для передачи и обработки информации. В отличие от классических электрических цепей, фотонные волноводы практически не создают тепловыделения, позволяют передавать данные со скоростью света и обеспечивают беспрецедентный уровень параллелизма за счёт использования различных длин волн (технология WDM). Фотонные чипы

особенно эффективны для операций матричного умножения, составляющих основу вычислений в нейронных сетях.

2025 год ознаменовался несколькими прорывами в этой области. Microsoft Research представила аналоговый оптический компьютер (AOC), который, по заявлениям разработчиков, в 100 раз превосходит традиционные GPU как по скорости, так и по энергоэффективности. Параллельно китайские учёные создали первый в мире чип для ультравысокопараллельных оптических вычислений с производительностью 2560 TOPS. Компания AMD также подтвердила, что активно изучает оптические межсоединения как ключевую технологию для суперкомпьютеров следующего поколения [7].

Фотонные вычисления обещают снять фундаментальное ограничение современных HPC-систем — проблему энергопотребления и тепловыделения. Однако на пути к коммерческому внедрению стоят серьёзные препятствия: сложность интеграции фотонных чипов с существующей электронной элементной базой, высокая стоимость производства и отсутствие эффективной оптической памяти.

**Заключение**

Высокопроизводительные компьютерные системы являются двигателем научно-технического прогресса. Современные экзафлопсные системы достигли впечатляющих показателей производительности, однако сталкиваются с фундаментальными ограничениями по энергопотреблению и масштабируемости.

Две перспективные технологии способны преодолеть эти ограничения: гибридные квантово-классические системы, обеспечивающие экспоненциальное ускорение для специальных классов задач, и фотонные вычисления, предлагающие радикальное повышение энергоэффективности и скорости за счёт использования света. У каждой из этих технологий есть свои преимущества и недостатки, но обе находятся в активной стадии разработки и уже имеют действующие прототипы.

Параллельно в России развивается суперкомпьютер МГУ-270, который уже сегодня решает задачи мирового уровня в области искусственного интеллекта. Без дальнейшего развития высокопроизводительных вычислений невозможно прогрессирование искусственного интеллекта, обработки больших данных и многих фундаментальных научных направлений.

**Использованные источники:**

1. TOP500 Supercomputer Sites. TOP500 List [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: https://www.top500.org (дата обращения: 15.04.2026).

2. Message Passing Interface Forum. MPI: A Message-Passing Interface Standard. Version 4.0 [Текст]. – 2021. – 856 с.

3. OpenMP Architecture Review Board. OpenMP Application Programming Interface. Version 5.2 [Текст]. – 2021. – 560 с.

4. SchedMD. Slurm Workload Manager. Documentation [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: https://slurm.schedmd.com (дата обращения: 15.04.2026).

5. NVIDIA Corporation. NVIDIA H100 Tensor Core GPU Architecture. Whitepaper [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: https://www.nvidia.com (дата обращения: 15.04.2026).

6. МГУ имени М.В. Ломоносова. Суперкомпьютер «МГУ-270» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rci.ru (дата обращения: 15.04.2026).

7. Microsoft Research. Analog Optical Computer for AI Inference [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: https://www.microsoft.com/research (дата обращения: 15.04.2026).

8. QuEra Computing Inc. Quantum-Classical Hybrid Demonstration at SC’25 [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: https://www.quera.com (да-та обращения: 15.04.2026).

9. Таненбаум, Э. Современные операционные системы [Текст] / Э. Таненбаум, Х. Бос. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2019. – 1120 с.