

Селянин Ярослав Владиславович*, независимый эксперт.

Технологическое лидерство, роль государства и неоднозначность цифр в высокотехнологичных областях на примере военно-промышленной политики США в области высокопроизводительных вычислений

В 2015 г. был дан старт работам в рамках Национальной стратегической вычислительной инициативы (National Strategic Computing Initiative, NSCI) президента Б. Обамы. Руководство Соединённых Штатов было глубоко обеспокоено ситуацией в сфере вычислительной техники (особенно на фоне соответствующих успехов Китая)¹. По мнению американских специалистов, перед США возникла угроза утраты лидерства в области высокопроизводительных вычислений, которое рассматривается в качестве важнейшего условия сохранения доминирования в мире. В связи с этим была запущена масштабная государственная программа развития данной отрасли, причём не изолированно, а во взаимосвязи с иными направлениями научных исследований. Ключевую роль в таких работах играют разведсообщество, Министерства обороны и энергетики США.

Финансирование

О приоритетности любой программы можно судить по тому финансированию, которое она получает. Учитывая значительный интерес американских военных к высокопроизводительным вычислениям² в последние

* yaroslav.selyanin@yandex.ru

¹ См. также: Чижов Д.А. Анализ тенденций и перспективных направлений развития суперЭВМ // Проблемы национальной стратегии. 2017. № 6 (45). С. 145–161. URL: <https://riss.ru/bookstore/journal/2017-2/6-45/> (дата обращения: 18.06.2019).

² "Высокопроизводительные вычисления (High Performance Computing) – это вычисления, проводимые на компьютерных системах со спецификациями, которые значительно превышают обычные компьютеры. Чаще всего для проведения высокопроизводительных вычислений используются суперкомпьютеры, компьютерные кластеры и гриды

годы, имеет смысл начать рассмотрение структуры бюджетных ассигнований на эти работы с оборонного бюджета США за 2010–2019 фин. гг. (рис. 1).

Первым главным получателем средств, выделяемых в рамках оборонного бюджета, является Пентагон. В 2010 фин. г. ведомство запрашивало 221 млн долл. на Программу модернизации систем высокопроизводительных вычислений (High Performance Computing Modernization Program, HPCMP; High Perf. Computing, MOD PGM, программный элемент 06037 55D8Z), а конгресс увеличил сумму до 224 млн долл.³

Оборонный бюджет на 2011 фин. г. такой детализации не даёт, однако на 2012 фин. г. – не просто распределяет средства на эту тематику, но и содержит предписание директору Национальной разведки сотрудничать с министром обороны, министром энергетики, главой Национального управления по ядерной безопасности (National Nuclear Security Administration)⁴ и министром торговли в оценке возможностей иностранных государств в области высокопроизводительных вычислений. Конгрессменов интересовали следующие моменты: 1) анализ имеющихся и будущих возможностей, а также направлений развития технологий высокопроизводительных вычислений в США и других странах; 2) описание того, как такие технологии используются другими государствами (в сравнении с США); 3) сопоставление подходов к разработке и применению таких технологий в Соединённых Штатах и других наиболее продвинутых в этом отношении странах; 4) оценка влияния данных технологий на национальную безопасность и экономический рост разных государств на момент составления отчёта и в перспективе; 5) рекомендации по необходимым действиям для гарантированного сохранения лидерства США в этой сфере и по способам наиболее эффективного применения таких технологий в национальных интересах⁵.

В оборонном бюджете США на 2014 фин. г. впервые появилось упоминание об эксафлопных ЭВМ. Документом были предусмотрены создание Плана по разработке вычислительных мощностей эксауровня и их

(англ. computing grids). Суперкомпьютеры (суперЭВМ) – компьютерные системы, значительно превышающие большинство существующих компьютеров по своим параметрам, таким как производительность, доступная оперативная память, доступное число процессоров. Компьютерный кластер – группа компьютеров, которые могут взаимодействовать друг с другом для наращивания доступной памяти и числа процессоров, вовлечённых в работу. Чаще всего такие кластеры строятся внутри исследовательских групп или организаций. Гриды – это группы кластеров и суперкомпьютеров, разбросанных по разным городам и странам". См. подробнее: Просто о сложном: Высокопроизводительные вычисления для инженерных и научно-исследовательских задач // Хабр. 2014. 20 октября. URL: <https://habr.com/ru/post/240899/> (дата обращения: 18.02.2019).

³ H.R.2647 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2010 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/111th-congress/house-bill/2647/text> (дата обращения: 11.02.2019).

⁴ Administrator for Nuclear Security – глава Национального управления по ядерной безопасности (National Nuclear Security Administration).

⁵ H.R.1540 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2012 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 3124. URL: <https://www.congress.gov/bill/112th-congress/house-bill/1540/text>; H.R.6523 – Ike Skelton National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2011 // Ibid. URL: <https://www.congress.gov/bill/111th-congress/house-bill/6523/text> (дата обращения: 11.02.2019).

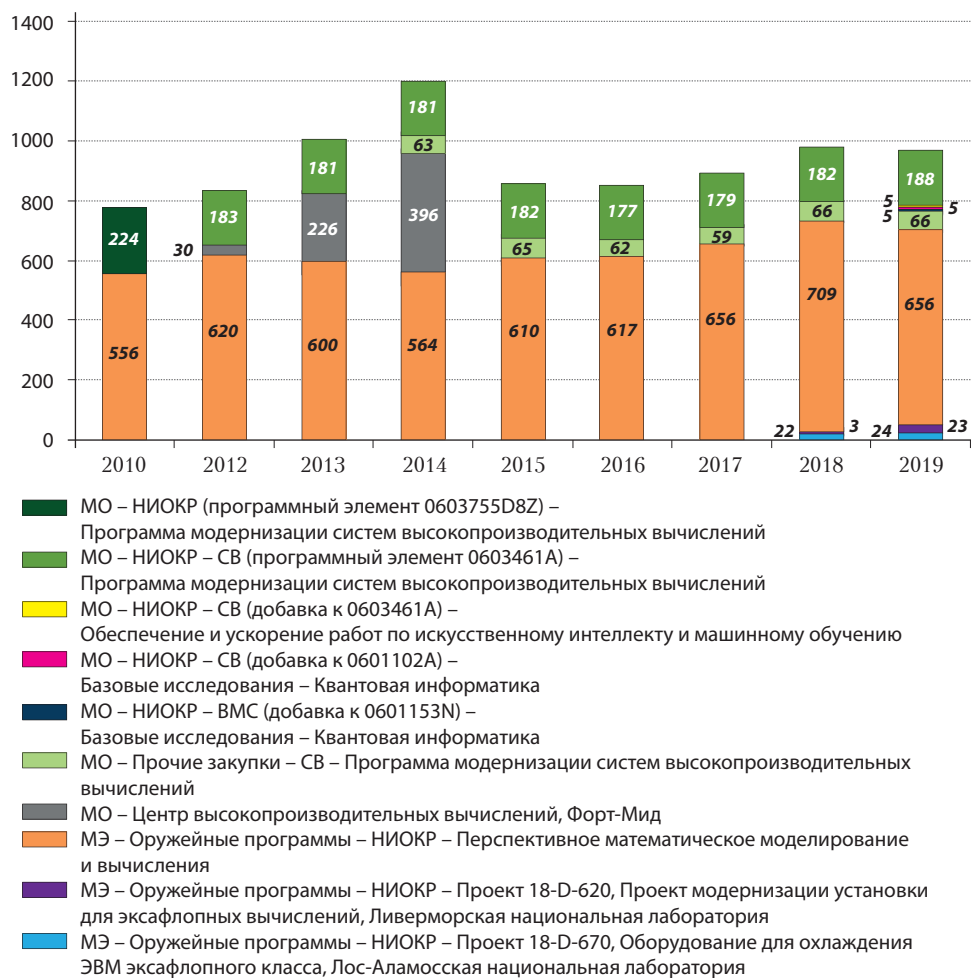


Рис. 1. Расходы Министерств обороны и энергетики на суперЭВМ в рамках оборонного бюджета США в 2010–2019 фин. г. *, млн долл.

Примечание: в оборонном бюджете США на 2011 фин. г. детализация расходов на суперЭВМ отсутствует

Источник: составлено автором на основе данных об оборонном бюджете США за 2010–2019 фин. г. См.: Офиц. сайт Федеральной правовой информации США. URL: <https://www.congress.gov> (дата обращения: 11.02.2019)

внедрение в Программу управления ядерным арсеналом (Plan for Developing Exascale Computing and Incorporating such Computing into the Stockpile Stewardship Program). План должен быть реализован в течение десяти лет. Разработкой документа занимался глава Национального управления по ядерной безопасности в сотрудничестве с замминистра энергетики по науке (Under Secretary of Energy for Science), министром обороны и разведсообществом США.

О повышении интереса американских военных к высокотехнологичным областям науки и техники и заинтересованности в привлечении соответствующих специалистов говорит тот факт, что в оборонном бюджете

на 2018 фин. г. появился раздел "Механизмы ускоренного доступа к талантам в технических областях и экспертным знаниям в академических учреждениях в интересах Министерства обороны", где упомянуты непосредственно высокопроизводительные вычисления и квантовая⁶ информатика, а также искусственный интеллект, анализ данных, математическое моделирование⁷.

Термин "квантовая информатика" (quantum information science) в оборонном бюджете США впервые появляется именно в документе 2018 фин. г., когда министру обороны было поручено обеспечить сотрудничество с вузами по ряду тем, включая квантовую информатику, высокопроизводительные вычисления (а также беспилотные системы, искусственный интеллект, анализ данных, математическое моделирование)⁸, но без дальнейшей детализации.

Детали обозначились годом позже, в оборонном бюджете на 2019 фин. г. Заместителю министра обороны по НИОКР (Under Secretary of Defense for Research and Engineering) было поручено сформулировать цели и задачи, выработать план работ по их достижению для следующих направлений:

- оптимизация и анализ особых массивов данных, важных для национальной безопасности (national security data sets);
- разработка алгоритмов квантовых вычислений в интересах Министерства обороны;
- разработка новых материалов и поиск новых свойств молекул (molecular functions);
- защищённая связь и криптография, включая разработку протоколов квантовой связи;
- квантовые датчики⁹ и метрология;
- разработка математического аппарата (development of mathematics) для квантовых средств, расширяющих возможности детектирования, связи и вычислительной техники;
- технологии изготовления и производства недорогих, защищённых, надёжных устройств и систем, использующих квантовые технологии¹⁰.

⁶ "Квантовая технология в целом – это технология, которая основана на манипуляции сложными квантовыми системами на уровне их индивидуальных компонентов, а не просто технология, основанная на квантовой физике. Допустим, транзистор, согласно этому определению, не является квантовой технологией, потому что, хотя он и основан на квантовой физике, в нём нет управления индивидуальными электронами, а в квантовых технологиях речь идёт именно об управляемых квантовых частицах". См.: FAQ: Квантовые технологии // ПостНаука. 2014. 28 апреля. URL: <https://postnauka.ru/faq/24983> (дата обращения: 18.02.2019).

⁷ H.R.2810 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2018 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 216. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/2810/text> (дата обращения: 11.02.2019).

⁸ Ibid.

⁹ "Квантовые датчики... обладают, во-первых, колоссальной чувствительностью, а во-вторых, колоссальным пространственным разрешением. Такой датчик можно внедрить, например, в клетку и понять биологические процессы, которые происходят в ней, понять, почему эта клетка болеет и как её вылечить". См.: FAQ: Квантовые технологии.

¹⁰ H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 234. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/5515/text> (дата обращения: 11.02.2019).

Конгресс потребовал от министра обороны, главы Разведывательного управления Министерства обороны (РУМО) и разведсообщества подготовить серию закрытых докладов, где сравнивались бы возможности Соединённых Штатов и их противников в ряде областей, включая квантовую информатику и искусственный интеллект. Анализ должен включать сопоставление затрат США и их соперников по указанным темам, качество и количество исследований, испытательной инфраструктуры и специалистов, характеристику состояния технологического прогресса по темам, описание временных рамок внедрения новых технологий, а также оценку намерений или готовности противников использовать такие технологии на практике¹¹.

В оборонном бюджете на 2019 фин. г. в разделе НИОКР предусмотрено финансирование фундаментальных исследований в области квантовой информатики в интересах Министерства обороны. Так, сухопутным войскам (программный элемент 0601102A) и ВМС (программный элемент 0601153N) выделяется по 5 млн долл.¹²

Другим главным получателем средств по направлению высокопроизводительных вычислений в рамках оборонного бюджета является Министерство энергетики. Финансирование выделяется по статье "Перспективное моделирование и вычисления" (Advanced Simulation and Computing) в рамках ассигнований на оружейные программы (Weapons Activities). В 2019 фин. г. по этой статье ведомство запросило и получило 703 млн долл.¹³

Внимание к запросам Министерства энергетики по данной тематике со всей очевидностью говорит о её значимости для высшего военно-политического руководства США. В бюджете на 2018–2019 фин. гг. предусматриваются расходы по указанной статье на два проекта: модернизация установки для экскафлопных вычислений (Project 18-D-620, Exascale Computing Facility Modernization Project) в подведомственной Ливерморской национальной лаборатории (3 и 23 млн долл. соответственно)¹⁴, создание оборудования для охлаждения ЭВМ экскафлопного класса (Project 18-D-670, Exascale Class Computer Cooling Equipment) в подведомственной Лос-Аламосской национальной лаборатории (22 и 24 млн долл. соответственно)¹⁵. В целом объёмы финансирования, предоставляемые ведомству в рамках американского оборонного бюджета по направлению высокопроизводительных вычислений, значительно превосходят средства, выделяемые на нужды Пентагона.

Финансирование работ в области высокопроизводительных вычислений не ограничивается оборонным бюджетом. Так, в Стратегическом плане

¹¹ А также гиперзвуковые системы, оружие направленной передачи энергии/лазерное оружие (directed energy weapons) и иные на усмотрение министра обороны. См. подробнее: H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019. Sec. 247.

¹² H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019. Sec. 4201.

¹³ Ibid. Sec. 4701.

¹⁴ H.R.2810 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2018. Sec. 4701; H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019. Sec. 4701.

¹⁵ Ibid.

реализации суперкомпьютерной инициативы заявлено, что бюджетный запрос на 2017 фин. г. на осуществление Национальной стратегической вычислительной инициативы составлял 285 млн долл. для Министерства энергетики и 33 млн долл. для Национального научного фонда¹⁶. Средства включали:

– 95 млн долл. для подведомственного Национального управления по ядерной безопасности на работы по теме "Перспективное моделирование и вычисления", нацеленные на создание вычислительных мощностей экзауровня, которые должны быть готовы к использованию для решения задач национальной безопасности в начале 2020-х гг.;

– 190 млн долл. для Управления науки данного министерства. Из них: 154 млн долл. – на перспективные разработки в области научных вычислений (Advanced Scientific Computing Research) – НИОКР по созданию систем экзауровня; 26 млн – на фундаментальные исследования в области материалов и химических процессов (Basic Energy Sciences); 10 млн долл. – на создание научной базы для повышения эффективности комплексного моделирования климата и приложения для анализа данных (Biological and Environmental Research)¹⁷.

Средства, запрашиваемые для Национального научного фонда, предполагалось направить на НИОКР в области высокопроизводительных вычислений, их применение для научных исследований, развитие отрасли и подготовку специалистов. И всё это – в дополнение к уже существующим ключевым программам, связанным с реализацией Стратегической вычислительной инициативы¹⁸.

О высокопроизводительных вычислениях и их практическом использовании идёт речь и в таких узкоспециализированных актах, как Закон об инновациях в исследовании и прогнозировании погоды 2017 г. (Weather Research and Forecasting Innovation Act of 2017). Он предписывает Национальному управлению океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration) в целях улучшения качества прогнозирования погодных явлений провести работы по ряду направлений, в том числе в области высокопроизводительных вычислений и информационных технологий¹⁹. Бюджетом США на 2018 фин. г. было предусмотрено выделение этой структуре 50 млн долл. на улучшение суперкомпьютерной инфраструктуры и повышение эффективности использования спутниковых систем для предсказания силы и направления движения ураганов. Такие решения были приняты по результатам

¹⁶ National Strategic Computing Initiative (NSCI) Strategic Plan: Report prepared by The National Strategic Computing Initiative Executive Council, July 2016 // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).

¹⁷ Panel "National Strategic Computing Initiative Update". November 15, 2016 // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/f/fe/SC16_Panel_NSCI_update.pdf (дата обращения: 11.02.2019).

¹⁸ Ibid.

¹⁹ H.R.353 – Weather Research and Forecasting Innovation Act of 2017 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 102. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/353/text> (дата обращения: 11.02.2019).

оценки ущерба, нанесённого Соединённым Штатам ураганами "Харви", "Ирма" и "Мария" в 2017 г.²⁰

Кроме того, администрация Д. Трампа запросила на 2018 фин. г. 376 млн долл. дополнительно на создание к 2021 г. эксафлопной ЭВМ (ею должна стать система Augoga)²¹.

В США вопросам создания эксафлопной²² ЭВМ в последнее время уделяется очень много внимания. Так, Законом об исследованиях и инновациях Министерства энергетики (Department of Energy Research and Innovation Act), принятом в сентябре 2018 г., ведомству предписывается реализовать исследовательскую программу в области создания вычислительных машин с производительностью порядка Эфлоп/с. В рамках данной работы должны быть решены следующие задачи:

- обеспечить сотрудничество не менее двух подведомственных национальных лабораторий с ИТ-индустрией и высшими учебными заведениями с целью разработки не менее двух новых эффективных архитектур для эксафлопных систем;

- добиться продвижения в аппаратных и программных технологиях, которые позволят полностью реализовать потенциал таких систем в решении задач, стоящих перед министерством, а также научных проблем, включающих прогнозирование на основе математических моделей и анализ больших массивов данных;

- оценить эффективность и целесообразность использования таких систем для развития науки и техники;

- обеспечить доступ к эксафлопным вычислительным системам исследователей из научных кругов, вузов и промышленности.

Перед Управлением науки Министерства энергетики поставлена задача поддерживать разработки в области высокопроизводительных вычислений и сетей, применяемых в программах фундаментальных и прикладных исследований ведомства в области энергетики, включая математическое моделирование и расширенный анализ данных. Управление будет осуществлять разработку, тестирование и обеспечение: 1) математического аппарата, моделей, алгоритмов, сред программирования; 2) инструментов, языков и операционных систем для высокопроизводительных вычислительных систем²³.

В июле 2018 г. Белый дом опубликовал меморандум о бюджетных приоритетах президентской администрации в области НИОКР на 2020 фин. г.

²⁰ H.R.1892 – Bipartisan Budget Act of 2018 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/1892/text> (дата обращения: 11.02.2019).

²¹ The US again has the World's Most Powerful Supercomputer // WIRED. 2018. 6 August. URL: <https://www.wired.com/story/the-us-again-has-worlds-most-powerful-supercomputer/> (дата обращения: 11.02.2019).

²² Внесистемная единица измерения производительности компьютеров флоп/с (flop/s) показывает, сколько операций с плавающей запятой в секунду выполняет данная вычислительная система. Соответственно, петафлоп/с (petaflop/s) указывает на способность выполнять 10^{15} таких арифметических операций в секунду, а эксафлоп/с (Эфлоп/с, exaflop/s, exaflops) указывает на способность выполнять 10^{18} арифметических операций с плавающей запятой в секунду.

²³ H.R.589 – Department of Energy Research and Innovation Act // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/589> (дата обращения: 11.02.2019).

Среди них – исследования в сфере искусственного интеллекта (ИИ), автономных систем, перспективных микроэлектроники и вычислений. Должно быть обеспечено лидерство в области искусственного интеллекта²⁴ (машинное обучение, автономные системы, приложения), квантовой информатики (проведение НИОКР по созданию технической и научной базы для развития теории и создания нового поколения устройств и приложений в этой сфере), осуществления вычислений стратегического уровня (намечены инвестиции в исследования и инфраструктуру, ускоряющие создание суперЭВМ с низким энергопотреблением, поддерживающие национальную экосистему суперЭВМ, способствующие поиску новых путей развития вычислений в пост-Муровскую²⁵ эру). Указанные области признаны критически важными для национальной безопасности и экономической конкурентоспособности²⁶.

Министерством энергетики в 2016 фин. г. запущен Проект создания вычислительных мощностей эксауровня (Exascale Computing Project, ECP), в рамках которого осуществляются исследования и разработка эксафлопных систем с выходом на их внедрение к 2023 г. (рис. 2). В июле 2016 г. заместитель главы ведомства утвердил потенциальные затраты, оцениваемые в 3,1–5,1 млрд долл.²⁷

В июне 2017 г. стало известно, что в рамках ECP Министерство энергетики в течение трёх лет выделит на исследования по проекту 258 млн долл. шести ведущим американским компаниям – Advanced Micro Devices (AMD), Cray Inc. (CRAY), Hewlett Packard Enterprise (HPE), International Business Machines (IBM), Intel Corp. (Intel), NVIDIA Corp. (NVIDIA). Сами компании также обязаны предоставить не менее 172 млн долл. Инвестиции по данному проекту должны достичь 430 млн долл. Финансирование со стороны ведомства по этой программе нацелено на поддержку НИОКР, ведущихся в трёх направлениях – аппаратные технологии, программное обеспечение (ПО) и разработка приложений. Поставлена цель реализовать как минимум одну эксафлопную систему к 2021 г.²⁸

²⁴ См. также: *Виловатых А.В.* Искусственный интеллект как фактор военной политики будущего // Проблемы национальной стратегии. 2019. № 1 (52). С. 177–192. URL: <https://riss.ru/bookstore/journal/2019-g/problemy-natsionalnoj-strategii-1-52/> (дата обращения: 18.06.2019).

²⁵ Пост-Муровской эрой (post-Moore's Law era) в вычислительной технике называют эру после прекращения действия закона Мура. "Закон Мура (Moore's law) – прогноз, сделанный соучредителем компании Intel Гордоном Муром (Gordon Earle Moore) на основе эмпирических данных, согласно которому количество транзисторов, резисторов и конденсаторов в микросхемах удваивается каждые 24 месяца". См.: *Denning P.J.* Exponential Laws of Computing Growth // Communications of the ACM. 2017. January. Vol. 60. No. 1. URL: <https://cacm.acm.org/magazines/2017/1/211094-exponential-laws-of-computing-growth/abstract> (дата обращения: 11.02.2019).

²⁶ M-18-22 Memorandum for the heads of execute departments and agencies // The White House. Official website. 2018. 31 July. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/07/M-18-22.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).

²⁷ Panel "National Strategic Computing Initiative Update".

²⁸ Department of Energy Awards Six Research Contracts Totaling \$258 Million to Accelerate U.S. Supercomputing Technology // U.S. Department of Energy. 2017. 15 June. URL: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-awards-six-research-contracts-totaling-258-million-accelerate-us> (дата обращения: 11.02.2019).

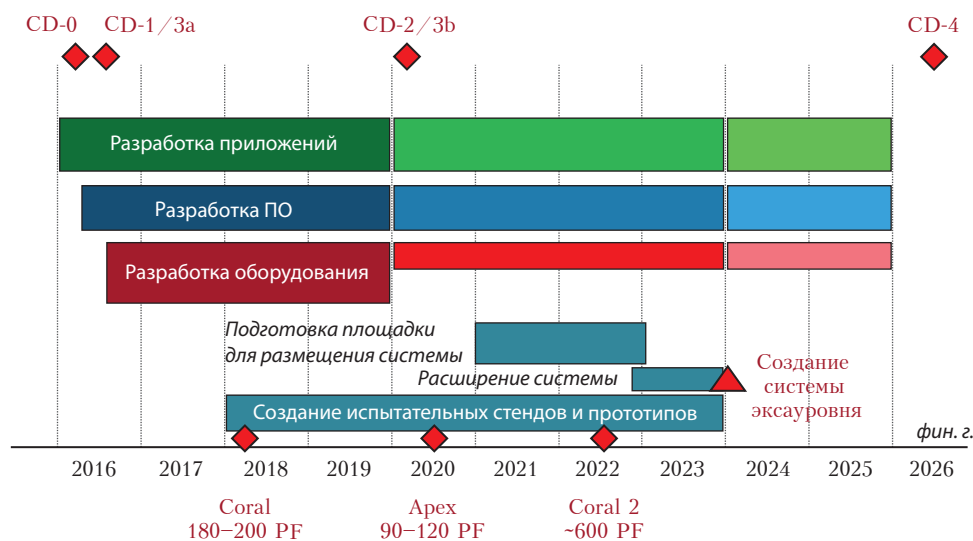


Рис. 2. График работ Министерства энергетики США по Проекту создания вычислительных мощностей эксасуровня

Источник: Panel "National Strategic Computing Initiative Update". November 15, 2016 // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/f/fe/SC16_Panel_NSCI_update.pdf (дата обращения: 11.02.2019)

В апреле 2018 г. цели Министерства энергетики были расширены. Ведомство объявило о готовности заключить контракт стоимостью до 1,8 млрд долл. на разработку как минимум двух эксасфлопных систем. Новые суперкомпьютеры должны последовать за первой американской системой эксасуровня под названием Augora. В настоящее время она создаётся в Аргоннской национальной лаборатории (Argonne National Laboratory, ANL) и должна заработать в 2021 г. Опубликованный в апреле 2018 г. запрос на подачу заинтересованными компаниями конкурсных предложений также предусматривал возможность модернизации или даже кардинальной перестройки ЭВМ Augora в 2022–2023 гг. (это зависит от оценки потребностей и возможностей к тому моменту). Системы должны быть размещены в трёх национальных лабораториях министерства в 2021–2023 гг. – Окриджской, Аргоннской и Ливерморской, объединённых в проект, известный как CORAL (Collaboration of Oak Ridge, Argonne and Livermore). Затраты на каждую из суперЭВМ могут составить от 400 до 600 млн долл.²⁹

В июле 2018 г. в рамках Проекта создания вычислительных мощностей эксасуровня дан старт организации шестого по счёту центра совместного проектирования (Co-Design Center) под названием ExaLearn, который станет местом совместной разработки технологий машинного обучения для систем с производительностью порядка Эфлоп/с. Центр будет объединять

²⁹ Secretary of energy Rick Perry announces \$1.8 billion initiative for new supercomputers // Exascale Computing Project. 2018. 9 April. URL: <https://www.exascaleproject.org/secretary-energy-rick-perry-announces-1-8-billion-initiative-new-supercomputers/> (дата обращения: 11.02.2019).

экспертов из восьми национальных лабораторий Министерства энергетики (Brookhaven National Laboratory, Argonne National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Sandia National Laboratories) и сотрудничать с шестью лидирующими технологическими компаниями, участвующими в создании новых экзафлопных суперЭВМ – AMD, CRAY, HPE, IBM, Intel, NVIDIA. Задача центра – предоставить ПО для проектов Министерства энергетики в области машинного обучения, реализуемых на экзафлопных системах. Конечным продуктом должна стать масштабируемая и устойчивая программная основа, позволяющая учёным и специалистам в сфере прикладной математики и информатики участвовать в проектировании в области машинного обучения³⁰.

Министерство обороны в лице DARPA в июле 2018 г. запустило пятилетнюю Программу возрождения электроники (Electronic Resurgence Initiative, ERI) с объёмом финансирования 1,5 млрд долл. Её цель – дать вторую жизнь полупроводниковым технологиям, после того как они достигнут предела своих возможностей. В центре внимания – новые архитектуры чипов, дизайн и материалы интегральных схем. Директор Отдела технологий микросистем (Microsystems Technology Office) DARPA Уильям Чаппелл (William Chappell) подчёркивает, что задача ведомства настолько масштабна и фундаментальна, что выходит за рамки того, на что частные компании могли бы решиться сами³¹.

Не лишены внимания и квантовые технологии. В 2018 г. в конгресс был представлен документ под названием "Закон о национальной квантовой инициативе" (National Quantum Initiative Act), предусматривающий выделение с 2019 по 2023 фин. г. 400 млн долл. (по 80 млн в год) для Национального института стандартов и технологий (NIST) на проведение мероприятий и семинаров; 250 млн долл. (по 50 млн в год) для Национального научного фонда (NSF) на финансирование многопрофильных центров квантовых исследований и обучения (Multidisciplinary Centers for Quantum Research and Education) и неуказанную меньшую сумму для координационного бюро (Coordination Office). В ходе прохождения законопроекта через палату представителей законодатели добавили 625 млн долл. (по 125 млн в год) Министерству энергетики на создание пяти национальных научно-исследовательских центров квантовой информатики (National Quantum Information Science Research Centers). Общий объём средств в рамках законопроекта палаты представителей составил 1,275 млрд долл. 21 декабря 2018 г. документ был подписан президентом США Д. Трампом³².

³⁰ ECP announces new co-design center to focus on exascale machine learning technologies // Exascale Computing Project. 2018. 20 July. URL: <https://www.exascaleproject.org/ecp-announces-new-co-design-center-to-focus-on-exascale-machine-learning-technologies/> (дата обращения: 11.02.2019).

³¹ Leopold G. DARPA Effort Pushes Beyond Moore's Law // HPCwire. 2018. 24 July. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/07/24/darpa-effort-pushes-beyond-moores-law/> (дата обращения: 11.02.2019).

³² Larzelere A.R. Summertime in Washington: Some Unexpected Advanced Computing News // HPCwire. 2018. 8 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/08/summertime-in-washington-some-unexpected-advanced-computing-news/>; Russell J. House Passes

Национальная квантовая инициатива – это программа, охватывающая многие аспекты развития экосистемы квантовых вычислений. Её появление, по мнению американских специалистов, отчасти вызвано геополитическими опасениями США отстать в глобальной гонке квантовых вычислений³³.

Вторым важным законопроектом в этой сфере стал Закон об исследованиях в области квантовых вычислений 2018 г. (Quantum Computing Research Act of 2018), фокусирующийся на деятельности Министерства обороны и направленный на согласование усилий правительства Соединённых Штатов, академического сообщества и частного сектора в получении новых технологий для обеспечения обороны страны³⁴.

Практическая работа в указанной сфере уже началась. Так, в августе 2018 г. Национальный научный фонд запустил две программы, касающиеся квантовых компьютеров.

Первая – это разработка в течение ближайших пяти лет квантового компьютера для решения прикладных задач (Software-Tailored Architecture for Quantum co-design, STAQ). Участники сосредотачивают усилия на основных целях, включая:

- разработку квантового компьютера с достаточным количеством кубитов для выполнения сложных вычислений;
- проверку правильности взаимодействия всех кубитов системы;
- интеграцию программного обеспечения, алгоритмов и аппаратных средств.

Программа "направлена на создание квантовых компьютеров... с 64 кубитами или более, разработку квантовых алгоритмов, подходящих для „шумных“ квантовых устройств". Ключевая роль при решении этой задачи отводится созданию специального ПО³⁵.

Вторая программа – разработка и создание образцов квантовых материалов и устройств в рамках проекта "Содействие квантовому скачку" (Enabling Quantum Leap: Convergent Accelerated Discovery Foundries for Quantum Materials Science, Engineering, and Information, Q-AMASE-i). Общая сумма финансирования составит от 20 до 25 млн долл. в течение шести лет³⁶.

Более того, в сентябре 2018 г. Министерство энергетики объявило о финансировании 85 проектов в области квантовой информатики на сумму 218 млн долл. Национальный научный фонд выделил 31 млн долл. на

\$1.275B National Quantum Initiative // Ibid. 2018. 17 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/17/house-passes-1-275b-national-quantum-initiative/>; *Russell J.* HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions // Ibid. 2018. 19 December. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/12/19/hpc-reflections-and-mostly-hopeful-predictions/> (дата обращения: 11.02.2019).

³³ *Russell J.* HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions.

³⁴ *Russell J.* House Passes \$1.275B National Quantum Initiative.

³⁵ *Trader T.* NSF Invests \$15 Million in Quantum STAQ // HPCwire. 2018. 7 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/07/nsf-invests-15-million-quantum-staq/> (дата обращения: 11.02.2019).

³⁶ NSF Ramps Quantum Investment, Tabs up to \$25M for Q-AMASE-i Foundry Program // HPCwire. 2018. 23 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/23/nsf-ramps-quantum-investment-tabs-up-to-25m-for-q-amase-i-foundry-program/> (дата обращения: 11.02.2019).

поддержку междисциплинарных квантовых исследований. Кроме того, в США опубликован национальный стратегический обзор в области квантовой информатики.

Сегодня работы по грантам Министерства энергетики ведутся под руководством учёных из "28 высших учебных заведений по всей стране и девяти национальных лабораторий министерства и охватывают широкий круг вопросов, таких как разработка оборудования и программного обеспечения для нового поколения квантовых компьютеров, синтез и описание новых материалов с особыми квантовыми свойствами, поиск путей осуществления квантовых вычислений и обработка информации, позволяющей дать заключение о таких космических явлениях, как тёмная материя и чёрные дыры"³⁷.

Одним из примеров практической реализации указанного направления работ является грант Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL / Berkeley Lab) на сумму 31 млн долл. на постройку и эксплуатацию современного испытательного стенда для квантовых технологий (Advanced Quantum Testbed, AQT). Предполагается использование последнего для изучения сверхпроводящих квантовых процессоров и оценки путей их применения в научных исследованиях. Планируется сотрудничество с Лабораторией Линкольна в Массачусетском технологическом институте (MIT-Lincoln Laboratory, MIT-LL)³⁸ для отработки различных архитектур квантовых процессоров³⁹.

Американские законодатели, министерства и ведомства полны энтузиазма касательно перспектив разработки и использования квантовых технологий, хотя специалисты очень осторожны в своих прогнозах относительно создания квантовых компьютеров⁴⁰.

В целом аналитическая компания Hyperion Research прогнозирует, что общемировые расходы на суперкомпьютеры удвоятся с 4,8 млрд долл. в 2017 г. до 9,5 млрд в 2022 г.⁴¹

О КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ

Предполагается, что создание квантового компьютера повлечёт за собой самые серьёзные последствия не только для американской отрасли высокопроизводительных вычислений, но и для существующих систем

³⁷ *Russell J.* Quantum Rolls – DOE Dishes \$218M; NSF Awards \$31M; US Releases "Strategic Overview" // HPCwire. 2018. 24 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/24/quantum-rolls-doe-dishes-218m-nsf-awards-31m-u-s-releases-strategic-overview/> (дата обращения: 11.02.2019).

³⁸ Лаборатория создана в 1951 г. в качестве научно-исследовательского центра, работающего в интересах Министерства обороны по направлениям, важным для национальной безопасности, и финансируемого федеральным правительством, в структуре Массачусетского технологического института (MIT). См. подробнее: About MIT Lincoln Laboratory // Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://www.ll.mit.edu/about> (дата обращения: 11.02.2019).

³⁹ *Russell J.* Quantum Rolls – DOE Dishes \$218M...

⁴⁰ См., напр.: *Russell J.* Hyperion Tackles Elusive Quantum Computing Landscape // HPCwire. 2018. 13 March. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/03/13/hyperion-tackles-elusive-quantum-computing-landscape/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁴¹ *Russell J.* HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions.

шифрования. Американские военные и представители разведсообщества периодически делают шокирующие обывателя заявления о том, как квантовый компьютер, с одной стороны, угрожает безопасности США (если впервые появится у противников), а с другой – сможет их защитить (если появится у американцев), взломав системы шифрования. Всё это, согласно декларациям и заголовкам, должно произойти если не завтра, то не позднее чем послезавтра. Реальность, как часто бывает в таких случаях, довольно сильно отличается от заявлений. Об этом свидетельствуют отчёты специалистов, подготовленные по заказу американских государственных структур.

По оценкам, приведённым в докладе Национального совета по науке и технологиям США (National Science And Technology Council) в 2016 г., наиболее вероятно, что квантовые технологии в первую очередь дадут результат при создании датчиков и в метрологии, затем при разработке оборудования для организации защищённых каналов связи и в моделировании. Вычислительная техника стоит в этом списке на последнем месте⁴².

Исследования, воспевающие возможность увеличения скорости ЭВМ за счёт создания квантовых компьютеров и применения их в широком спектре задач, названы спекулятивными, поскольку в настоящее время квантовый компьютер продолжает оставаться исключительно научной задачей. Разработка универсального квантового компьютера – долгосрочный труд. Для полной реализации потенциального преимущества от квантовых компьютеров требуется ещё длительная работа над алгоритмами, языками программирования и компиляторами⁴³. Предел возможностей и ограничения квантовых компьютеров до конца не ясны и остаются предметом изучения⁴⁴.

Федеральные агентства США активно ведут и поддерживают разработки в области квантовой информатики и связанных с ней сферах уже два десятилетия, с момента появления этого направления. Финансирование из федерального бюджета фундаментальных и прикладных исследований в этой области выросло с порядка 200 млн долл. в год в 2016 г.⁴⁵ до 250 млн в 2018 г.⁴⁶

⁴² Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities. A Joint Report of the Committee on Science and Committee on Homeland and National Security of the National Science and Technology Council // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. 2016. July. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁴³ "Компилятор (compiler) – машинная программа, используемая для компиляции, а также программа или техническое средство, выполняющие компиляцию. Транслятор, выполняющий преобразование программы, составленной на исходном языке, в объектный модуль, также называют компилятором. Большинство компиляторов переводят программу с высокоуровневого языка программирования в машинный код, который может быть выполнен компьютером, то есть в набор инструкций для центрального процессора". См.: Компилятор (компьютеры и интернет) // Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия. URL: [https://megabook.ru/article/Компилятор%20\(компьютеры%20и%20интернет\)](https://megabook.ru/article/Компилятор%20(компьютеры%20и%20интернет)) (дата обращения: 18.02.2019).

⁴⁴ Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities.

⁴⁵ Ibid.

⁴⁶ Cho A. After years of avoidance, Department of Energy joins quest to develop quantum computers // Science. 2018. 10 January. URL: <https://www.sciencemag.org/news/2018/01/after-years-avoidance-department-energy-joins-quest-develop-quantum-computers> (дата обращения: 11.02.2019).

Интересы Пентагона в этой сфере сосредоточены на решении прикладных задач (точная навигация, точное время, защищённые сети передачи данных). Так, с 2011 по 2015 фин. г. в рамках Инициативы по поддержке междисциплинарных университетских исследований (Multi-disciplinary University Research Initiative, MURI) Министерство обороны обеспечило поддержку 12 проектов, связанных с квантовой информатикой. С 2016 г. Пентагон поддерживает программу, в рамках которой ведутся работы по созданию прототипа масштабируемой квантовой сети и квантовой памяти (Tri-Service Quantum Science and Engineering Program, QSEP). Помимо этого, сухопутные войска, ВВС и ВМС имеют собственные программы в этой сфере, в том числе относящиеся к применению квантовых технологий для проведения вычислений⁴⁷.

Американское разведсообщество в лице IARPA финансирует ряд программ, направленных на практическое использование квантовых технологий в области вычислений. Во-первых, это поиск путей преодоления ограничений современных многокубитных систем (в первую очередь возникновения ошибок из-за малого времени сохранения кубитом квантовой информации и взаимодействия с окружающей средой) путём создания логического кубита на основе нескольких несовершенных физических кубитов⁴⁸ (Logical Qubits Program⁴⁹). Во-вторых, использование квантовых эффектов для решения задач оптимизации (Quantum Enhanced Optimization Program⁵⁰). Продолжается финансирование исследований в сфере новых вычислительных методов (включая алгоритмы для квантовых систем), которые спецслужбы смогут применять для решения своих задач⁵¹.

⁴⁷ Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities.

⁴⁸ Кубит (также квантовый бит) – "наименьший элемент хранения информации в квантовом компьютере. Элементы классических компьютеров могут хранить только один бит: 1 или 0. Кубиты – это квантовые объекты, которые могут находиться в суперпозиции двух состояний, то есть кодировать одновременно и логическую единицу, и ноль. Это открывает новые возможности для обработки информации: компьютер из нескольких тысяч кубитов может производить вычисления со скоростью, недоступной современным суперкомпьютерам". См.: Кубит // Индикатор. URL: <https://indicator.ru/tags/kubit/> (дата обращения: 19.02.2019). "Современные кубиты крайне „непрочные“: они взаимодействуют с окружающим миром и теряют свою квантовую информацию очень быстро. С их помощью нельзя осуществлять даже самые простые квантовые вычисления. Для этого нужно сначала сделать то, что мы называем логическим кубитом, который может бесконечно долго поддерживать квантовую информацию путём коррекции ошибок. Для того чтобы сделать один логический кубит, необходимы десятки или даже сотни физических. В классических компьютерах тоже такое есть. Там постоянно происходят ошибки, и если их не корректировать, то информация будет пропадать мгновенно. Но поскольку там есть алгоритмы коррекции, то мы не видим ошибок. Мы видим, что информация хранится бесконечно долго. В квантовых вычислениях пока такой технологии нет, потому что качество физических кубитов недостаточно для реализации даже одного логического. Поэтому все разговоры о количестве кубитов надо воспринимать аккуратно". См. подробнее: Почему количество кубитов – ... а квантовая связь действует только на коротких дистанциях // Хабр. 2018. 21 января. URL: <https://habr.com/ru/company/smileexpo/blog/409835/> (дата обращения: 19.02.2019).

⁴⁹ Logical Qubits (LogiQ) Program // Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA). URL: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/logiq> (дата обращения: 11.02.2019).

⁵⁰ Quantum Enhanced Optimization (QEO) Program // Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA). URL: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/qeo> (дата обращения: 11.02.2019).

⁵¹ Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities.

В рамках проводимых работ IARPA создаёт широкую кооперацию. В июне 2017 г. Университет Южной Калифорнии (University of Southern California) был выбран головной организацией в консорциуме университетов и частных компаний, привлечённых к созданию 100-кубитных квантовых машин. Объём финансирования составил до 45 млн долл. В пятилетней исследовательской инициативе участвуют: Массачусетский технологический институт (MIT, США), включая Лабораторию Линкольна (MIT-LL), Калифорнийский технологический институт (Caltech, США), Гарвардский университет (Harvard, США), Калифорнийский университет в Беркли (UC Berkeley, США), Университетский колледж Лондона (University College London, Британия), Университет Уотерлу (University of Waterloo, Канада), Саарский университет (Saarland University, Германия), Токийский технологический институт (Tokyo Institute of Technology, Япония), а также американские компании Lockheed Martin и Northrop Grumman. Тестирование и оценку работ от имени правительства США будут проводить Исследовательский центр Эймса (NASA's Ames Research Center) и Техасский университет А&М (Texas A&M)⁵².

Работы в области квантовых машин ведут Министерство энергетики и Национальный институт стандартов и технологий, фокусирующийся на метрологии в сфере квантовых коммуникаций, вычислений и измерений⁵³.

В январе 2018 г. стало известно о запуске Министерством энергетики США проекта по разработке алгоритмов для квантовых машин, применимых для решения задач в химии, материаловедении, ядерной физике и физике элементарных частиц. Созданные средства предполагается направить в подведомственные национальные лаборатории⁵⁴.

Всё более мощными становятся машины, конструируемые представителями индустрии. В январе 2018 г. было объявлено, что исследователи из лаборатории компании Google начали тестировать 50-кубитный чип, который, по их мнению, позволит достичь так называемого квантового превосходства (quantum supremacy)⁵⁵. Однако ряд экспертов считает, что такие заявления могут дезинформировать общественность, создав впечатление, будто исследователи достигли конца пути в разработке применимого для решения практических задач квантового компьютера, в то время как на

⁵² *Blumenthal A.* USC to Lead IARPA Quantum Computing Project // USC Viterbi School of Engineering. 2017. 22 June. URL: <https://viterbischool.usc.edu/news/2017/06/usc-lead-iarpa-quantum-computing-project/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁵³ Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities.

⁵⁴ After years of avoidance, Department of Energy joins quest to develop quantum computers.

⁵⁵ Квантовое превосходство (quantum supremacy) – "состояние технологического развития, когда квантовые компьютеры будут способны решать задачи, которые не по зубам даже самым мощным классическим компьютерам. Одна из таких задач, не представляющая специального интереса для учёных, но очень важная для специалистов по криптографии – разложение чисел на множители. Её решение требует очень больших компьютерных мощностей и временных затрат, при этом проверку результата можно провести сравнительно легко и быстро (просто перемножив найденные числа). Именно сложность подбора множителей лежит в основе критериев определения надёжности почти всех современных методов шифрования". См. подробнее: Через неопределённость к квантовому превосходству: Заметки с конференции RSA // Kaspersky daily. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/> (дата обращения: 19.02.2019).

самом деле они находятся даже не в его начале. С такой оценкой согласны и в Министерстве энергетики⁵⁶.

В сентябре 2018 г. Департамент политики в области науки и технологий Белого дома (Office of Science and Technology Policy) представил свой план⁵⁷ по поддержке и развитию квантовых вычислений. Министерство энергетики намерено выделить около 218 млн долл. на 85 исследовательских проектов в нескольких университетах и национальных лабораториях. Посредством распределения двух-пятилетних грантов ведомство планирует разработать новое оборудование и ПО для квантовых вычислений, создать новые материалы (квантовые) и искать пути применения квантовых технологий. Национальный научный фонд объявил о планах направить до 31 млн долл. на финансирование 33 исследовательских проектов⁵⁸.

Однако раздаются голоса о недостаточности осуществляемого финансирования. В качестве примера приводятся ссылки на затраты одного из главных соперников США в этой сфере – Китая, который, по информации американской прессы, для проведения работ по изучению и разработке технологий квантовых вычислений создал специальную научную лабораторию стоимостью 10 млрд долл. Для сравнения журналистами приводится сумма планируемых затрат Пентагона на все исследования в области компьютерных наук в бюджете на 2019 фин. г., которая составляет 899 млн долл.⁵⁹

Вместе с тем выводы доклада⁶⁰ Национальных академий науки, инженерии и медицины (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, NASEM) довольно пессимистичны. Разработка квантовых компьютеров, способных взломать сегодняшние системы шифрования, требует не менее десяти лет. Хотя и признаётся, что появление таких машин создаёт серьёзную угрозу системам шифрования, обеспечивающим безопасность современных сетей связи и компьютерных систем⁶¹.

Создание квантового компьютера, способного использовать алгоритм Шора⁶² для поиска закрытого ключа сообщения, зашифрованного при

⁵⁶ After years of avoidance, Department of Energy joins quest to develop quantum computers.

⁵⁷ National Strategic Overview for Quantum Information Science. September 2018 // The White House. Official website. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).

⁵⁸ Corrigan J. White House Unveils Plan to Dominate Quantum Technology // Nextgov. 2018. 25 September. URL: <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2018/09/white-house-unveils-plan-dominate-quantum-technology/151542/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁵⁹ Breeden J. Future Quantum Computers Already Threatening Today's Data // Nextgov. 2018. 10 July. URL: <https://www.nextgov.com/ideas/2018/07/future-quantum-computers-already-threatening-todays-data/149547/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁶⁰ Quantum Computing: Progress and Prospects (2018): Consensus Study Report // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. URL: <https://www.nap.edu/read/25196/chapter/1> (дата обращения: 11.02.2019).

⁶¹ Konkel F. Quantum Computing That Can Crack Modern Encryption More Than a Decade Away // Nextgov. 2018. 5 December. URL: <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2018/12/quantum-computing-can-crack-modern-encryption-more-decade-away/153271/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁶² Алгоритм Питера Шора – "это квантовый алгоритм разложения чисел на простые множители, то есть факторизации". "Именно сложность подбора множителей лежит

помощи криптографического ключа стандарта RSA длиной 1024 бита⁶³, означает создание машины, которая имеет число кубитов более чем на пять порядков⁶⁴ большее и количество ошибок примерно на два порядка меньше, чем у современных изделий. Для создания указанной ЭВМ также необходимо формирование среды разработки ПО. Сейчас невозможно определить временные рамки, в которые будет создан большой квантовый компьютер с системой исправления ошибок (error-corrected). Но даже если и будет достигнут серьёзный прогресс, то нет гарантий, что все проблемы удастся преодолеть. Более того, в процессе исследований могут быть обнаружены новые препятствия, решение которых потребует новых технологий и методов. За время работ могут быть также получены новые результаты в области фундаментальных исследований, которые поменяют наши представления об устройстве квантового мира⁶⁵.

Учитывая уникальные характеристики и проблемы, связанные с использованием квантовых компьютеров, они вряд ли смогут напрямую заменить классические компьютеры, поскольку последние требуются для контроля за их работой и для производства вычислений, необходимых для

в основе критериев определения надёжности почти всех современных методов шифрования". "Это значит, что как только квантовый компьютер с достаточным количеством кубитов будет создан, вся современная криптография окажется под угрозой компрометации... поскольку любая информация, сокрытая с использованием этого подхода, может быть получена любым лицом, у кого имеется доступ к такому квантовому компьютеру". См. подробнее: Квантовый алгоритм Шора впервые отмасштабировали // N+1. 2016. 4 марта. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/03/04/scalable-Shor-algorithm>; Через неопределённость к квантовому превосходству: Заметки с конференции RSA // Kaspersky daily. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/>; Алгоритм Шора, его реализация на языке Haskell и результаты некоторых опытов // Записки программиста. 2014. 29 декабря. URL: <https://eax.me/shors-algorithm/> (дата обращения: 19.02.2019).

⁶³ "RSA (аббревиатура от фамилий Rivest, Shamir и Adleman) – криптографический алгоритм с открытым ключом... В основу... положена сложность задачи факторизации произведения двух больших простых чисел. Для шифрования используется операция возведения в степень по модулю большого числа. Для дешифрования (обратной операции) за разумное время необходимо уметь вычислять функцию Эйлера от данного большого числа, для чего необходимо знать разложение числа на простые множители. В криптографической системе с открытым ключом каждый участник располагает как открытым ключом (англ. public key), так и закрытым ключом (англ. private key). В криптографической системе RSA каждый ключ состоит из пары целых чисел. Каждый участник создаёт свой открытый и закрытый ключ самостоятельно. Закрытый ключ каждый из них держит в секрете, а открытые ключи можно сообщать кому угодно или даже публиковать их. Открытый и закрытый ключи каждого участника обмена сообщениями в криптосистеме RSA образуют „согласованную пару“ в том смысле, что они являются взаимно обратными... Предположим, что Боб хочет отправить Алисе информацию. Если они решат использовать RSA, Боб должен знать открытый ключ Алисы для того, чтобы зашифровать сообщение, а Алиса должна использовать свой закрытый ключ для расшифровки сообщения. Чтобы дать возможность Бобу отправлять ей зашифрованные сообщения, Алиса передаёт свой открытый ключ Бобу через надёжный, но не обязательно секретный маршрут. Закрытый ключ Алисы никогда никому не передается... В 2010 г. группе учёных из Швейцарии, Японии, Франции, Нидерландов, Германии и США удалось успешно вычислить данные, зашифрованные при помощи криптографического ключа стандарта RSA длиной 768 бит... По словам исследователей, после их работы в качестве надёжной системы шифрования можно рассматривать только RSA-ключи длиной 1024 бита и более. Причём от шифрования ключом длиной в 1024 бит стоит отказаться в ближайшие три-четыре года". См. подробнее: RSA // Викиконспекты. URL: <http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=RSA> (дата обращения: 19.02.2019).

⁶⁴ Более чем в 100 тыс. раз.

⁶⁵ Quantum Computing: Progress and Prospects (2018).

коррекции квантовых ошибок. Таким образом, в настоящее время квантовые компьютеры разрабатываются как устройства для решения специфических задач и как дополнение к классическим процессорам⁶⁶.

По мнению американских специалистов, такие прикладные задачи, как факторизация чисел (разложение на простые множители)⁶⁷ или поиск в базе данных, потребуют, по всей видимости, тысяч или более связанных кубитов⁶⁸. Поэтому даже само беспокойство по поводу потенциала квантовых вычислений для взлома текущих криптографических алгоритмов преждевременно⁶⁹.

В настоящее время по меньшей мере три компании – IBM, D-Wave Systems и Rigetti Computing – запустили веб-платформы, обеспечивающие пользователям доступ к квантовым процессорам и к необходимым для работы с ними инструментам и инструкциям. Положительным моментом для отрасли здесь является то, что это может дать старт зарождению сообщества разработчиков, занимающихся квантовыми приложениями и алгоритмами. Специалисты ожидают, что и другие "квантовые пионеры" (Microsoft, Google и Intel) последуют их примеру, создав собственные веб-платформы, дающие доступ к "квантовым песочницам"⁷⁰.

Резюмируя, можно констатировать, что большинство специалистов сходятся во мнении, что квантовые вычисления обладают очень высоким потенциалом. Возможно, даже меняют "правила игры" для решения некоторых классов задач. Но они всё ещё далеки от того, чтобы стать применимыми на практике⁷¹.

Промежуточные результаты Национальной стратегической вычислительной инициативы

В ноябре 2018 г. была опубликована 52-я редакция рейтинга самых производительных суперкомпьютеров "Топ-500". Заголовок сообщал, что

⁶⁶ Quantum Computing: Progress and Prospects (2018).

⁶⁷ Предположение о том, что для больших чисел задача факторизации является вычислительно сложной, лежит в основе широко используемых криптографических алгоритмов, например RSA.

⁶⁸ Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science, and Computing February 25, 2016 / U.S. Department of Energy; Office of Science // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁶⁹ Russell J. Robust Quantum Computers Still a Decade Away, Says Nat'l Academies Report // HPCwire. 2018. 5 December. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/12/05/robust-quantum-computers-still-a-decade-away-says-natl-academies-report/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁷⁰ "Песочница" в ИТ – "термин произошёл не от детской песочницы... а от той, что пользуются пожарные. Это бак с песком, где можно безопасно работать с легковоспламеняющимися предметами либо бросать туда что-то уже горящее без боязни подпалить что-нибудь ещё. Отражая аналогию данного технического сооружения на программную (программную. – *Прим. авт.*) составляющую, можно определить программную песочницу как „изолированную среду исполнения с контролируемыми правами“. См. подробнее: Антивирусные песочницы. Введение // Хабр. 2010. 5 октября. URL: <https://habr.com/ru/post/105581/> (дата обращения: 19.02.2019). См.: Russell J. HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions.

⁷¹ Russell J. Quantum Rolls – DOE Dishes \$218M; NSF Awards \$31M; US Releases "Strategic Overview".

Китай увеличивает своё присутствие в данном списке, но США доминируют по общей производительности.

Первые две позиции по производительности, продемонстрированной на тестах Linpack, заняли новые американские системы Summit (с результатом 143,5 Пфлоп/с) и Sierra (94,6 Пфлоп/с), установленные в 2018 г. в двух национальных лабораториях Министерства энергетики – Окриджской и Ливерморской соответственно. Китайские Sunway TaihuLight и Tianhe-2A заняли третью и четвертую строчки с результатами 93 Пфлоп/с и 61 Пфлоп/с⁷² (рис. 3, 4, 5; порядковые номера перед названиями некоторых систем на графиках указывают на их позицию в редакции рейтинга от ноября 2018 г.). При этом такой результат достигнут американской системой Summit с количеством ядер, в 4,4 раза меньшим, чем у Sunway TaihuLight (2,4 млн шт. против 10,6 млн шт.) и максимальным энергопотреблением, меньшим в 1,6 раза (9,8 МВт против 15,4 МВт).

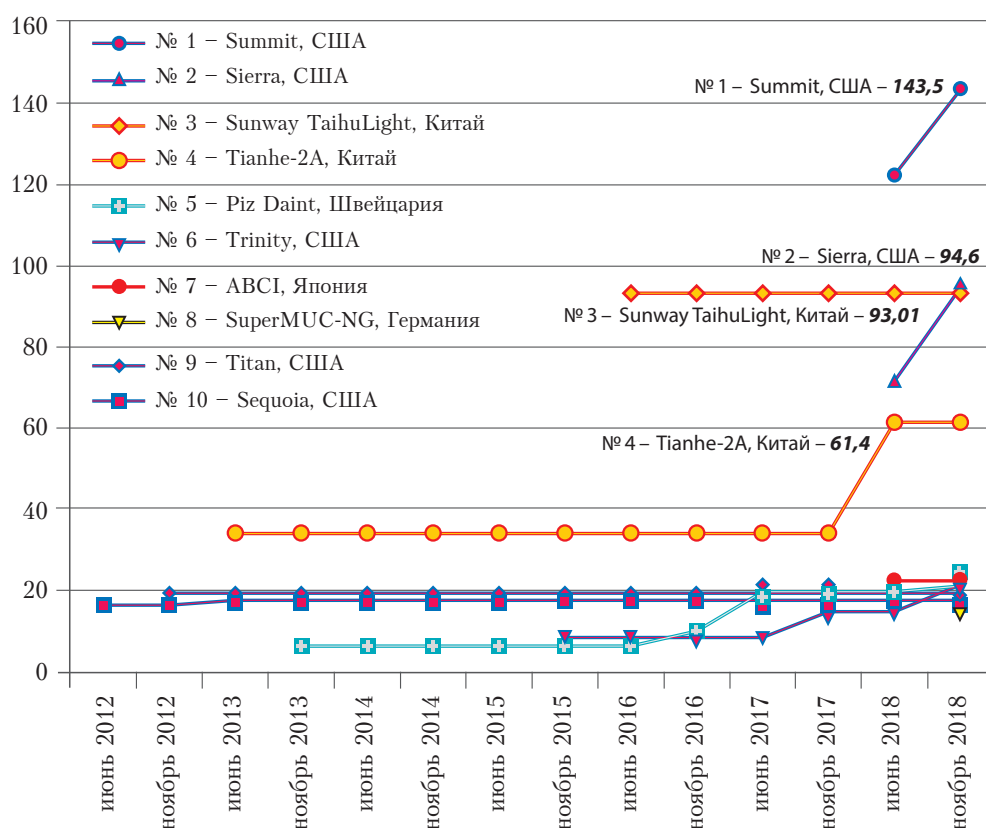


Рис. 3. Производительность суперЭВМ, вошедших в первую десятку рейтинга "Топ-500" в ноябре 2018 г. (тест Linpack), Пфлп/с

Источник: составлено автором на основе данных рейтинга "Топ-500". См.: TOP500 Lists. URL: <https://www.top500.org/lists/top500/> (дата обращения 11.02.2019)

⁷² TOP500. November 2018 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2018/11/> (дата обращения: 11.02.2019).

Если сравнивать Sunway TaihuLight с системой Sierra, то при очень близких показателях производительности у американской системы количество ядер в 6,8 раза меньше (1,6 млн шт. против 10,6 млн шт.), а энергопотребление меньше в 2,1 раза (7,4 МВт против 15,4 МВт). Причём в рейтинге от июня 2018 г. производительность системы Sierra была ниже, чем у Sunway TaihuLight (71,6 Пфлоп/с против тех же 93 Пфлоп/с), но при том же количестве ядер, что и в ноябрьской редакции рейтинга (1,6 млн шт.). То есть американские специалисты подняли производительность Sierra более чем на 30 % без увеличения числа ядер (к сожалению, нет возможности сравнить энергопотребление системы до и после, так как данные об этом в июньской редакции рейтинга не представлены).

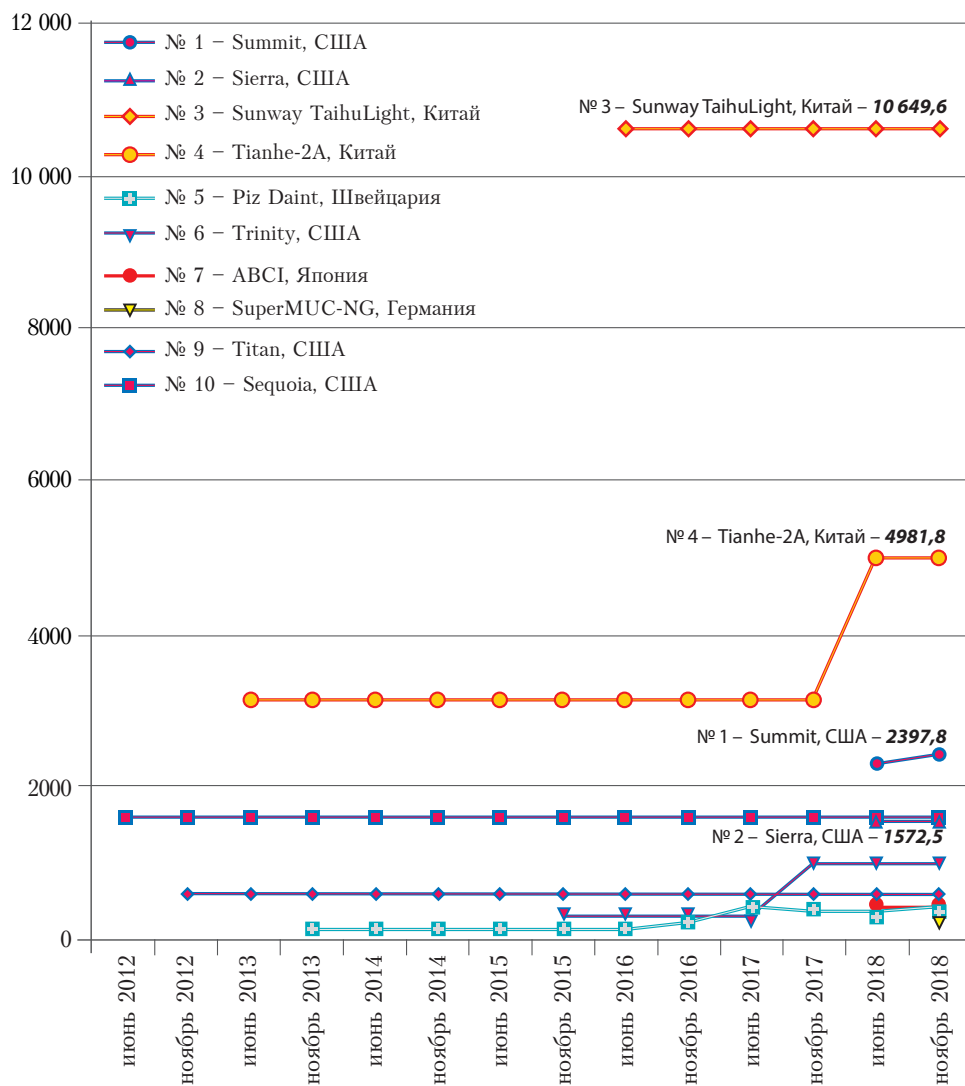


Рис. 4. Количество ядер в суперЭВМ, вошедших в первую десятку рейтинга "Топ-500" в ноябре 2018 г., тыс. шт.

Источник: составлено автором на основе данных рейтинга "Топ-500". См.: TOP500. Lists. URL: <https://www.top500.org/lists/top500/> (дата обращения: 11.02.2019)

При сравнении указанных китайских систем между собой картина будет ещё интереснее. По производительности Sunway TaihuLight обходит Tianhe-2A в 1,5 раза, но для этого ей потребовалось большее в 2,1 раза количество ядер (10,6 млн шт. против 4,98 млн шт.), хотя энергопотребление существенно больше у Tianhe-2A – 18,5 МВт.

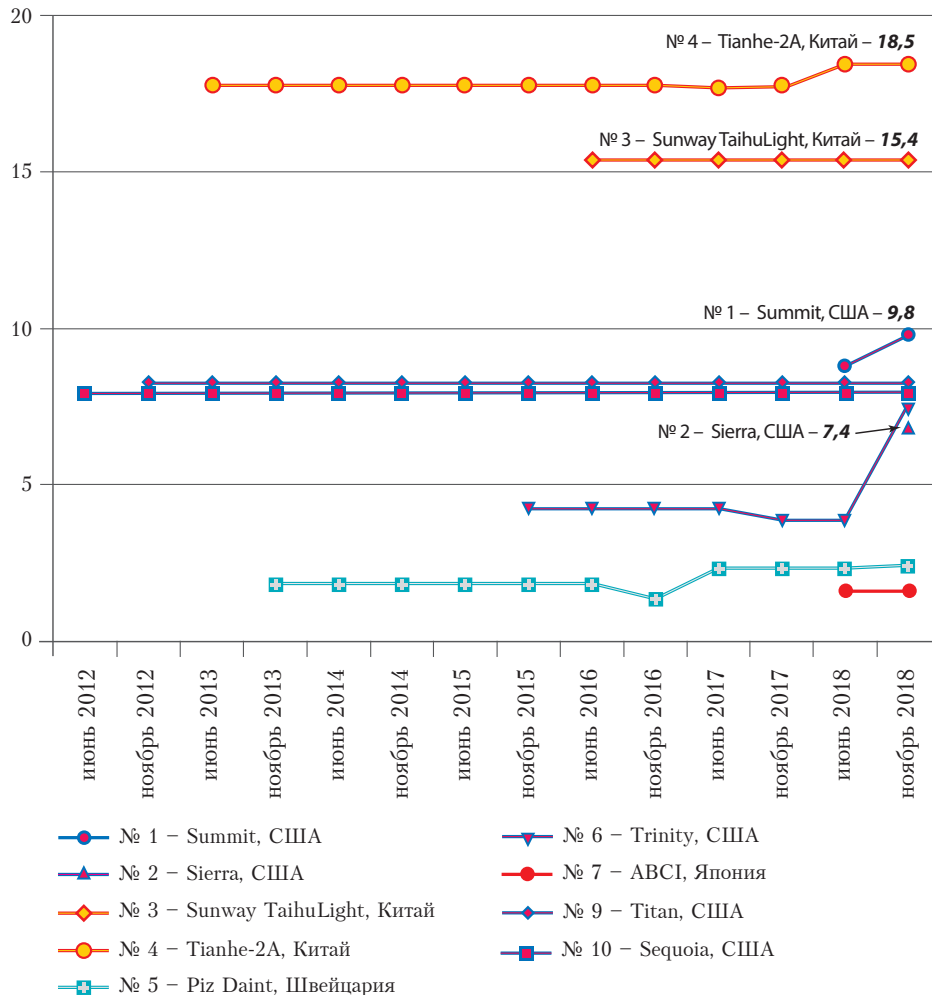


Рис. 5. Мощность суперЭВМ, вошедших в первую десятку рейтинга "Топ-500" в ноябре 2018 г., МВт

Примечание: данные по энергопотреблению для системы SuperMUC-NG (Германия) в отчёте рейтинга отсутствуют

Источник: составлено автором на основе данных рейтинга "Топ-500". См.: TOP500. Lists. URL: <https://www.top500.org/lists/top500/> (дата обращения 11.02.2019)

Надо отдать должное китайским специалистам. Энергопотребление новой Sunway TaihuLight всё-таки меньше, чем у Tianhe-2A, при большей производительности. Кроме того, китайские специалисты к 2018 г. повысили производительность последней в 1,8 раза по сравнению с показателями системы в 2017 г. (с 33,9 до 61 Пфлоп/с) при увеличении числа ядер

в 1,6 раза (с 3,12 млн до 4,98 млн шт.) и росте электрической мощности всего в 1,04 раза (с 17,8 до 18,5 МВт). Причём, даже по признанию американских специалистов, Sunway TaihuLight уже не является исключительно "рекордной машиной", призванной только демонстрировать максимальный результат в тестах Linpack (как это было с Tianhe-2A): система пригодна для решения практических научных задач.

Тем не менее паника в США по поводу утраты лидирующих позиций пока всё же представляется несколько преждевременной. Относительно практической применимости американской системы Summit стоит сказать, что её используют для выполнения расчётов в энергетике, материаловедении и в сфере искусственного интеллекта⁷³.

Китайские специалисты стараются догнать и перегнать американцев по всем формальным показателям. Так, профильный ресурс HPCwire отметил в своём обзоре списка "Топ-500", что "Китай теперь претендует на наличие 229 систем (45,8 % от общего числа), в то время как доля США упала до самого низкого за всю историю рейтинга – 108 систем (21,6 %)". Однако "эта большая разница в количестве систем компенсируется тем, что США имеют две лучшие системы и, как правило, работают с более мощными системами"⁷⁴.

Надо отметить, что пока лишь две системы, представленные в рейтинге "Топ-500" по состоянию на ноябрь 2018 г., преодолели планку 20 Пфлоп/с – швейцарская Piz Daint (21,2 Пфлоп/с) и американская Trinity (20,1 Пфлоп/с). Все остальные находятся ниже этого предела, который, в свою очередь, в 7 раз ниже, чем у № 1 – американской Summit (143,5 Пфлоп/с).

Несколько слов о лукавстве цифр рейтинга "Топ-500" и в целом цифр, заявляемых создателями систем. Так, Стив Скотт (Steve Scott), первый вице-президент и главный технический директор компании – разработчика систем высокопроизводительных вычислений Cray, заявил следующее: "Я думаю, что по мере развития систем их производительность в тестах High-Performance Linpack (HPL) становится всё более и более не связанной с реальной производительностью на реальных задачах. Характеристики памяти, пропускная способность подсистем передачи данных и ряд других вещей имеют гораздо большее значение. Имеют значение и особенности архитектуры". "Единственная вещь, которую делают тесты Linpack, заключается в том, что они позволяют получать финансирование от политиков", но "если цель в том, чтобы решать практические задачи", это не про Linpack⁷⁵.

"Гонка вооружений" в области суперкомпьютеров сейчас процветает в основном благодаря глобальной гонке за эксафлопом и усилиям по созданию крупных вычислительных инфраструктур, способных повысить возможности алгоритмов искусственного интеллекта. Примерами последнего

⁷³ ORNL launches Summit supercomputer // Exascale Computing Project. 2018. 8 June. URL: <https://www.exascaleproject.org/ornl-launches-summit-supercomputer/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁷⁴ Russell J. HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions.

⁷⁵ Trader T. HPC Under the Covers: Linpack, Exascale & the Top500 // HPCwire. 2018. 28 June. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/06/28/hpc-under-the-covers-linpack-exascale-the-top500/> (дата обращения: 11.02.2019).

являются новейшая японская система ABCI (AI Bridging Cloud Infrastructure)⁷⁶ или система Питсбургского суперкомпьютерного центра (Pittsburgh Supercomputing Center's Bridges system), проходящая модернизацию для дальнейшей работы в области ИИ⁷⁷. По оценкам специалистов, в будущем одним из требований к большим суперЭВМ, вероятно, будет возможность их применения в области машинного обучения.

Следует отметить, что в рейтинге "Топ-500" указывается не только производительность систем по результатам тестов, но и теоретический максимум производительности, рассчитанный создателями. Например, по данным Окриджской национальной лаборатории, теоретически Summit способен выдавать до 200 Пфлоп/с против 143 Пфлоп/с, продемонстрированных в тестах.

Недавно появилась новая внесистемная единица измерения быстродействия суперЭВМ – эксаоп/с (exaop/s), равная 10^{18} операций *разной степени точности* в секунду. Её не следует путать с Эфлоп/с (exaflop/s) – единицей, обозначающей 10^{18} операций *с плавающей запятой* в секунду. Связь эксаоп/с с реальной жизнью вызывает не меньше вопросов, чем результаты тестов Linpack. Действительная причина её появления может заключаться как в необходимости демонстрации "триумфа американской научно-технической мысли" в условиях, когда эксафлоп/с по-прежнему не достигнут, но надо отчитываться за полученные под его достижение средства, так и в необходимости подогрева интереса к теме для облегчения получения финансирования от политического руководства. Поэтому заявляется, что та же система Summit при решении определённых научных задач способна достичь производительности 3,3 эксаоп/с. А при использовании этой суперЭВМ для машинного обучения алгоритма распознавания экстремальных погодных условий на климатических картах высокого разрешения исследователи, по их словам, достигли пиковой производительности в 1,13 эксаоп/с и устойчивой производительности в 0,999 эксаоп/с. Алгоритм глубокого обучения, использованный в системе Summit, объявлен создателями самым быстрым из тех, о которых сообщалось на сегодняшний день, что принесло им место в списке финалистов премии Гордона Белла в 2018 г.⁷⁸

* *
*

С момента подписания Б. Обамой указа о запуске Национальной стратегической вычислительной инициативы прошло более четырёх лет, но говорить об осуществлении её целей пока довольно сложно. Хотя американские эксперты отмечают, что сроки достижения эксафлопа уже сдвинулись

⁷⁶ Russell J. HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions.

⁷⁷ NSF Awards \$1.8M to Expand PSC Bridges' Deep Learning Capabilities // HPCwire. 2018. 26 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/26/nsf-awards-1-8m-to-expand-psc-bridges-deep-learning-capabilities/> (дата обращения: 11.02.2019).

⁷⁸ Summit Supercomputer Breaks Exaop Barrier on Neural Net Trained to Recognize Extreme Weather Patterns // InsideHPC. URL: <https://insidehpc.com/2018/10/summit-supercomputer-breaks-exaop-barrier-neural-net-trained-recognize-extreme-weather-patterns/> (дата обращения: 11.02.2019).

вправо: в 2008 г. специалисты рассчитывали создать такую систему к 2015 г., чуть позже прогноз скорректировали до 2018 г., сегодня же в качестве ориентировочных называют 2021–2023 гг.⁷⁹ Однако подобные корректировки сроков в таких масштабных проектах не являются редкостью и во многом обусловлены сложностью решения поставленных задач.

Работы по этой тематике пользуются серьёзной поддержкой высшего военно-политического руководства США и обеих палат конгресса. Финансирование стабильно высокое. Такая ситуация сложилась при Б. Обаме и сохраняется при Д. Трампе, ведь, по словам участников данных работ, контроль над вычислительной техникой во многих смыслах означает контроль над информацией.

Среди ведомств, отвечающих за достижение целей, ключевую роль играют Министерство обороны (причём в лице не только DARPA, но и научных организаций отдельных видов вооружённых сил), Министерство энергетики (поскольку обладает опытными специалистами и соответствующей инфраструктурой), разведсообщество (а именно IARPA). Это подтверждает важность тематики для "обеспечения интересов национальной безопасности США".

Красной нитью через слова представителей задействованных министерств и ведомств проходит мысль о том, что без участия государства в качестве объединяющей и направляющей силы, обеспечивающей к тому же серьёзное финансирование, американская ИТ-индустрия не смогла бы достичь целей, поставленных перед ней инициативой Б. Обамы. Причина кроется в настолько больших масштабах задач и высоких затратах на их решение, что они выходят за рамки возможностей отдельно взятых частных компаний. Подтверждается тезис о том, что развитие фундаментальной науки невозможно без заказа и финансирования таких работ государством. Соединённые Штаты выделяют на них значительные средства, которые направляются как на совершенствование уже используемых технологий, так и на разработку технологий, основанных на кардинально иных принципах.

Среди последних самую существенную государственную поддержку имеют работы в области создания квантового компьютера. Конгресс выделил на 2019–2023 фин. гг. почти 1,3 млрд долл. Однако, несмотря на ажиотаж в прессе и среди политиков, специалисты пока скептически относятся к возможности конструирования в ближайшее десятилетие квантового компьютера, пригодного для решения задач в интересах национальной безопасности или угрожающего им (главным образом речь идёт об угрозе надёжности распространённых сегодня алгоритмов шифрования).

Параллельно ведётся деятельность по подготовке специалистов, затрагивающая широкий спектр вопросов – от улучшения школьного образования по техническим дисциплинам до способов удержания иностранных студентов, прошедших обучение в США. Вопрос подготовки специалистов является одним из центральных, поскольку "кадры, овладевшие техникой, решают всё".

⁷⁹ Gibson S. Revisiting the 2008 Exascale Computing Study at SC18 // HPCwire. 2018. 29 November. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/11/29/revisiting-the-2008-exascale-computing-study-at-sc18/> (дата обращения: 11.02.2019).

Политическим руководством США изначально подчёркивалось, что достижение эксафлопа и создание принципиально новых компьютерных архитектур и принципов осуществления вычислений не должны быть рекордом ради рекорда. Необходимо продвижение вперёд науки и техники (в первую очередь, конечно, американской). Для этого требуется разработка новых технологий, материалов, оборудования. Поэтому Стратегическая вычислительная инициатива не рассматривалась как изолированная программа. Её развитие с самого начала должно было происходить в тесной взаимосвязи с другими высокотехнологичными инициативами администрации Б. Обамы. Например, президентская инициатива изучения мозга оценивалась не только как возможная сфера применения новых суперЭВМ, разработанных в рамках Стратегической вычислительной инициативы, но и как источник знаний о строении и принципах работы человеческого мозга с целью их применения при разработке новых видов вычислительной техники и сохранения американского лидерства в сфере высокопроизводительных вычислений.

Угроза перехвата лидерства Китаем воспринимается американской стороной практически как катастрофа. Однако здесь стоит отметить следующее. Китайские специалисты, очевидно, добились больших успехов в создании не только суперЭВМ, но и целой отрасли – от разработки элементной базы, включая процессоры и их архитектуры, до постройки самих систем. В то же время самая современная на сегодняшний день машина (американская Summit) ясно показала, что лидерство США пока сохраняется по всем параметрам – от производительности системы до количества ядер процессоров и общего энергопотребления. Более того, модернизация второй системы (Sierra) как раз до таких параметров, чтобы обойти китайские разработки, выглядит как показательная акция – две лучшие американские машины обошли по производительности две лучшие китайские системы при меньшем числе ядер процессоров и энергопотреблении.

Вместе с тем даже сами американские специалисты говорят о том, что цифры производительности рейтинга "Топ-500" довольно лукавы. Причина состоит в том, что используемые при его составлении тесты производительности Linpack не отражают реальных возможностей систем, предназначенных для решения новых типов задач – обработки больших данных, машинного обучения и т.п. Похожая ситуация складывается и в области квантовых компьютеров – число кубитов само по себе пока не столь важно, как, например, уровень ошибок при вычислениях.

В целом необходимо отметить, что, почувствовав необходимость развития такой высокотехнологичной отрасли, как высокопроизводительные вычисления, требующей новаций не только в прикладных технологиях, но и в фундаментальной науке, руководство США не стало уповать на сознательность частного бизнеса и запустило соответствующую государственную программу, осуществляя контроль, управление и финансирование работ. В результате уже сейчас выстроена система, которая даже в самом худшем для США случае – при провале в достижении заявленных

целей – позволит значительно продвинуть вперед задействованные отрасли науки и техники.

Ключевые слова: *США – высокопроизводительные вычисления – суперкомпьютеры – суперЭВМ – квантовые компьютеры – государственная политика США в области развития науки и техники – Китай.*

Keywords: *the USA – high performance computing – supercomputers – giant-scale computers – quantum computers – the U.S. public policy in the area of science and technology development – China.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритм Шора, его реализация на языке Haskell и результаты некоторых опытов // Записки программиста. 2014. 29 декабря. URL: <https://eax.me/shors-algorithm/> (дата обращения: 19.02.2019).
2. Антивирусные песочницы. Введение // Хабр. 2010. 5 октября. URL: <https://habr.com/ru/post/105581/> (дата обращения: 19.02.2019).
3. *Виловатых А.В.* Искусственный интеллект как фактор военной политики будущего // Проблемы национальной стратегии. 2019. № 1 (52). С. 177–192. URL: <https://riss.ru/bookstore/journal/2019-g/problemy-natsionalnoj-strategii-1-52/> (дата обращения: 18.06.2019).
4. Квантовый алгоритм Шора впервые отмасштабировали // N+1. 2016. 4 марта. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/03/04/scalable-Shor-algorithm> (дата обращения: 19.02.2019).
5. Компилятор (компьютеры и интернет) // Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия. URL: [https://megabook.ru/article/Компилятор%20\(компьютеры%20и%20интернет\)](https://megabook.ru/article/Компилятор%20(компьютеры%20и%20интернет)) (дата обращения: 18.02.2019).
6. Кубит // Индикатор. URL: <https://indicator.ru/tags/kubit/> (дата обращения: 19.02.2019).
7. Просто о сложном: Высокопроизводительные вычисления для инженерных и научно-исследовательских задач // Хабр. 2014. 20 октября. URL: <https://habr.com/ru/post/240899/> (дата обращения: 18.02.2019).
8. Через неопределённость к квантовому превосходству: Заметки с конференции RSA // Kaspersky daily. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/> (дата обращения: 19.02.2019).
9. *Чижев Д.А.* Анализ тенденций и перспективных направлений развития супер-ЭВМ // Проблемы национальной стратегии. 2017. № 6 (45). С. 145–161. URL: <https://riss.ru/bookstore/journal/2017-2/6-45/> (дата обращения: 18.06.2019).
10. About MIT Lincoln Laboratory // Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://www.ll.mit.edu/about> (дата обращения: 11.02.2019).
11. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities. A Joint Report of the Committee on Science and Committee on Homeland and National Security of the National Science and Technology Council // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. 2016. July. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).
12. *Blumenthal A.* USC to Lead IARPA Quantum Computing Project // USC Viterbi School of Engineering. 2017. 22 June. URL: <https://viterbischool.usc.edu/news/2017/06/usc-lead-iarpa-quantum-computing-project/> (дата обращения: 11.02.2019).

13. *Breeden J.* Future Quantum Computers Already Threatening Today's Data // Nextgov. 2018. 10 July. URL: <https://www.nextgov.com/ideas/2018/07/future-quantum-computers-already-threatening-todays-data/149547/> (дата обращения: 11.02.2019).
14. *Cho A.* After years of avoidance, Department of Energy joins quest to develop quantum computers // Science. 2018. 10 January. URL: <https://www.sciencemag.org/news/2018/01/after-years-avoidance-department-energy-joins-quest-develop-quantum-computers> (дата обращения: 11.02.2019).
15. *Corrigan J.* White House Unveils Plan to Dominate Quantum Technology // Nextgov. 2018. 25 September. URL: <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2018/09/white-house-unveils-plan-dominate-quantum-technology/151542/> (дата обращения: 11.02.2019).
16. *Denning P.J.* Exponential Laws of Computing Growth // Communications of the ACM. 2017. January. Vol. 60. No. 1. URL: <https://cacm.acm.org/magazines/2017/1/211094-exponential-laws-of-computing-growth/abstract> (дата обращения: 11.02.2019).
17. Department of Energy Awards Six Research Contracts Totaling \$258 Million to Accelerate U.S. Supercomputing Technology // U.S. Department of Energy. 2017. 15 June. URL: <https://www.energy.gov/articles/departement-energy-awards-six-research-contracts-to-taling-258-million-accelerate-us> (дата обращения: 11.02.2019).
18. ECP announces new co-design center to focus on exascale machine learning technologies // Exascale Computing Project. 2018. 20 July. URL: <https://www.exascaleproject.org/ecp-announces-new-co-design-center-to-focus-on-exascale-machine-learning-technologies/> (дата обращения: 11.02.2019).
19. FAQ: Квантовые технологии // ПостНаука. 2014. 28 апреля. URL: <https://postnauka.ru/faq/24983> (дата обращения: 18.02.2019).
20. *Gibson S.* Revisiting the 2008 Exascale Computing Study at SC18 // HPCwire. 2018. 29 November. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/11/29/revisiting-the-2008-exa-scale-computing-study-at-sc18/> (дата обращения: 11.02.2019).
21. H.R.353 – Weather Research and Forecasting Innovation Act of 2017 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 102. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/353/text> (дата обращения: 11.02.2019).
22. H.R.589 – Department of Energy Research and Innovation Act // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/589> (дата обращения: 11.02.2019).
23. H.R.1540 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2012 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/112th-congress/house-bill/1540/text> (дата обращения: 11.02.2019).
24. H.R.1892 – Bipartisan Budget Act of 2018 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/1892/text> (дата обращения: 11.02.2019).
25. H.R.2647 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2010 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/111th-congress/house-bill/2647/text> (дата обращения: 11.02.2019).
26. H.R.2810 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2018 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/2810/text> (дата обращения: 11.02.2019).
27. H.R.3304 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2014 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/113th-congress/house-bill/3304/text> (дата обращения: 11.02.2019).
28. H.R.3979 – Carl Levin and Howard P. "Buck" McKeon National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2015 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/113th-congress/house-bill/3979/text> (дата обращения: 11.02.2019).
29. H.R.4310 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2013 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/112th-congress/house-bill/4310/text> (дата обращения: 11.02.2019).

30. H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/5515/text> (дата обращения: 11.02.2019).

31. H.R.6523 – Ike Skelton National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2011 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. URL: <https://www.congress.gov/bill/111th-congress/house-bill/6523/text> (дата обращения: 11.02.2019).

32. *Konkel F.* Quantum Computing That Can Crack Modern Encryption More Than a Decade Away // Nextgov. 2018. 5 December. URL: <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2018/12/quantum-computing-can-crack-modern-encryption-more-decade-away/153271/> (дата обращения: 11.02.2019).

33. *Larzelere A.R.* Summertime in Washington: Some Unexpected Advanced Computing News // HPCwire. 2018. 8 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/08/summertime-in-washington-some-unexpected-advanced-computing-news/> (дата обращения: 11.02.2019).

34. *Leopold G.* DARPA Effort Pushes Beyond Moore's Law // HPCwire. 2018. 24 July. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/07/24/darpa-effort-pushes-beyond-moores-law/> (дата обращения: 11.02.2019).

35. Logical Qubits (LogiQ) Program // Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA). URL: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/logiq> (дата обращения: 11.02.2019).

36. M-18-22 Memorandum for the heads of executive departments and agencies // The White House. Official website. 2018. 31 July. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/07/M-18-22.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).

37. National Strategic Computing Initiative (NSCI) Strategic Plan: Report prepared by The National Strategic Computing Initiative Executive Council, July 2016 // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).

38. National Strategic Overview for Quantum Information Science. September 2018 // The White House. Official website. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).

39. NSF Awards \$1.8M to Expand PSC Bridges' Deep Learning Capabilities // HPCwire. 2018. 26 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/26/nsf-awards-1-8m-to-expand-psc-bridges-deep-learning-capabilities/> (дата обращения: 11.02.2019).

40. NSF Ramps Quantum Investment, Tabs up to \$25M for Q-AMASE-i Foundry Program // HPCwire. 2018. 23 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/23/nsf-ramps-quantum-investment-tabs-up-to-25m-for-q-amase-i-foundry-program/> (дата обращения: 11.02.2019).

41. ORNL launches Summit supercomputer // Exascale Computing Project. 2018. 8 June. URL: <https://www.exascaleproject.org/ornl-launches-summit-supercomputer/> (дата обращения: 11.02.2019).

42. Panel "National Strategic Computing Initiative Update". November 15, 2016 // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/f/fe/SC16_Panel_NSCI_update.pdf (дата обращения: 11.02.2019).

43. Quantum Computing: Progress and Prospects (2018): Consensus Study Report // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. URL: <https://www.nap.edu/read/25196/chapter/1> (дата обращения: 11.02.2019).

44. Quantum Enhanced Optimization (QEO) Program // Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA). URL: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/qeo> (дата обращения: 11.02.2019).

45. Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science, and Computing February 25, 2016 / U.S. Department of Energy; Office of Science // Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program. URL: <https://www.nitrd.gov/nsci/> (дата обращения: 11.02.2019).

46. *Russell J.* House Passes \$1.275B National Quantum Initiative // HPCwire. 2018. 17 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/17/house-passes-1-275b-national-quantum-initiative/> (дата обращения: 11.02.2019).
47. *Russell J.* HPC Reflections and (Mostly Hopeful) Predictions // HPCwire. 2018. 19 December. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/12/19/hpc-reflections-and-mostly-hopeful-predictions/> (дата обращения: 11.02.2019).
48. *Russell J.* Hyperion Tackles Elusive Quantum Computing Landscape // HPCwire. 2018. 13 March. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/03/13/hyperion-tackles-elusive-quantum-computing-landscape/> (дата обращения: 11.02.2019).
49. *Russell J.* Quantum Rolls – DOE Dishes \$218M; NSF Awards \$31M; US Releases "Strategic Overview" // HPCwire. 2018. 24 September. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/09/24/quantum-rolls-doe-dishes-218m-nsf-awards-31m-u-s-releases-strategic-overview/> (дата обращения: 11.02.2019).
50. *Russell J.* Robust Quantum Computers Still a Decade Away, Says Nat'l Academies Report // HPCwire. 2018. 5 December. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/12/05/robust-quantum-computers-still-a-decade-away-says-natl-academies-report/> (дата обращения: 11.02.2019).
51. Secretary of energy Rick Perry announces \$1.8 billion initiative for new supercomputers // Exascale Computing Project. 2018. 9 April. URL: <https://www.exascaleproject.org/secretary-energy-rick-perry-announces-1-8-billion-initiative-new-supercomputers/> (дата обращения: 11.02.2019).
52. Summit Supercomputer Breaks Exaop Barrier on Neural Net Trained to Recognize Extreme Weather Patterns // InsideHPC. URL: <https://insidehpc.com/2018/10/summit-supercomputer-breaks-exaop-barrier-neural-net-trained-recognize-extreme-weather-patterns/> (дата обращения: 11.02.2019).
53. S.1356 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2016 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/senate-bill/1356/text> (дата обращения: 11.02.2019).
54. S.2943 – National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2017 // Congress.gov. The official website for U.S. Federal Legislative Information. Sec. 4201. URL: <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/senate-bill/2943/text> (дата обращения: 11.02.2019).
55. The Linpack benchmark // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/project/linpack/> (дата обращения: 22.02.2019).
56. The US again has the World's Most Powerful Supercomputer // WIRED. 2018. 6 August. URL: <https://www.wired.com/story/the-us-again-has-worlds-most-powerful-supercomputer/> (дата обращения: 11.02.2019).
57. TOP500. June 2009 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2009/06> (дата обращения: 11.02.2019).
58. TOP500. June 2010 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2010/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
59. TOP500. June 2011 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2011/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
60. TOP500. June 2012 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2012/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
61. TOP500. June 2013 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2013/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
62. TOP500. June 2014 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2014/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
63. TOP500. June 2015 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2015/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
64. TOP500. June 2016 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2016/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
65. TOP500. June 2017 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2017/06/> (дата обращения: 11.02.2019).

66. TOP500. June 2018 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2018/06/> (дата обращения: 11.02.2019).
67. TOP500. November 2009 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2009/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
68. TOP500. November 2010 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2010/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
69. TOP500. November 2011 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2011/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
70. TOP500. November 2012 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2012/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
71. TOP500. November 2013 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2013/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
72. TOP500. November 2014 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2014/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
73. TOP500. November 2015 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2015/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
74. TOP500. November 2016 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2016/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
75. TOP500. November 2017 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2017/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
76. TOP500. November 2018 // TOP500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/2018/11/> (дата обращения: 11.02.2019).
77. *Trader T.* HPC Under the Covers: Linpack, Exascale & the Top500 // HPCwire. 2018. 28 June. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/06/28/hpc-under-the-covers-linpack-exascale-the-top500/> (дата обращения: 11.02.2019).
78. *Trader T.* NSF Invests \$15 Million in Quantum STAQ // HPCwire. 2018. 7 August. URL: <https://www.hpcwire.com/2018/08/07/nsf-invests-15-million-quantum-staq/> (дата обращения: 11.02.2019).