

Захаров Анатолий Иванович

кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. SPIN-код: 7421-0234, AuthorID: 798392.

Электронный адрес: vka_kaf27_1@mil.ru

Anatoly I. Zakharov

Ph.D. of Technical Sciences, Full Professor, Associate Professor at the Department of mathematics and software, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg. SPIN-code: 7421-0234, AuthorID: 798392.

E-mail address: vka_kaf27_1@mil.ru

Брякалов Геннадий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Санкт-Петербург. SPIN-код: 7548-0940, AuthorID: 798908.

Электронный адрес: br36@mail.ru

Gennadiy A. Brykalov

Ph.D. of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of mathematics and software, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg. SPIN-code: 7548-0940, AuthorID: 798908.

E-mail address: br36@mail.ru

Борозенец Александр Геннадьевич

адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Санкт-Петербург.

Электронный адрес: vka_kaf27_1@mil.ru

Aleksandr G. Borozenets

Adjunct at the Department of mathematics and software, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg.

E-mail address: vka_kaf27_1@mil.ru

Злобин Сергей Евгеньевич

адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Санкт-Петербург.

Электронный адрес: vka_kaf27_1@mil.ru

Sergei E. Zlobin

Adjunct at the Department of mathematics and software, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg.

E-mail address: vka_kaf27_1@mil.ru

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

Аннотация. Статья посвящена анализу основных исторических этапов становления и перспектив развития средств отечественной вычислительной техники. Отмечена роль и заслуги ученых и конструкторов в создании первых и последующих образцов отечественных ЭВМ – от простейших до суперкомпьютеров. Кратко рассмотрены вопросы построения суперкомпьютеров экзафлопной производительности на аппаратно-программной платформе «Эльбрус». Материал статьи распространяется на широкий круг проблем и может быть полезен для специалистов, интересующихся вопросами истории создания средств вычислительной техники в плане ее практического применения.

Ключевые слова: вычислительная техника, компьютеры, суперкомпьютеры, информационные технологии.

Для цитирования: Захаров А.И., Брякалов Г.А., Борозенец А.Г., Злобин С.Е. Анализ основных этапов становления и развития отечественных суперкомпьютеров // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 1. С. 102 – 111. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.01.P.102

ANALYSIS OF THE MAIN STAGES OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF NATIONAL SUPERCOMPUTERS

Abstract. The article is devoted to the analysis of the main historical stages of formation and prospects of development of domestic computer technologies. The role as well as the merits of scientists and designers in creating the first and subsequent samples of domestic computers, ranging from the simplest to modern supercomputers, was noted. The article briefly addresses the issues of building exascale performance supercomputers on the hardware and software platform “Elbrus”, covers a wide range of problems and can be useful for specialists interested in the history of the creation of computer equipment in terms of its practical application.

Keywords: computing, computers, supercomputers, information technology.

For citation: Zakharov A.I., Bryakalov G.A., Borozenets A.G., Zlobin S.E. (2025) Analysis of the main stages of formation and development of national supercomputers. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 1. Pp. 102 – 111. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.01.P.102 (In Russian).

Введение

Первая электронная вычислительная машина ENIAC (Electronics Numerical Integrator and Computer) была создана в 1946 году в США сразу после окончания второй мировой войны. Она весила 27 тонн, потребляла 174 киловатта электроэнергии для своего функционирования, содержала в себе 17468 электронных ламп, работала со скоростью 5000 операций в секунду. В группу разработчиков этой ЭВМ входил один из выдающихся ученых XX века Джон фон Нейман, который сформулировал основные принципы построения и функционирования универсальных программируемых вычислительных машин.

Одновременно над проектами электронных вычислительных машин работали в Англии, где первая универсальная ЭВМ EDSAC появилась в 1949 году, а также в СССР, когда 4 декабря 1948 года двое ученых-изобретателей – Башир Рамеев и Исаак Брук – подали патент и зарегистрировали проект первой в СССР цифровой вычислительной машины, говоря современным языком, – компьютера.

Термин «суперкомпьютер» был использован в начале 60-х годов, когда группа специалистов Иллинойского университета (США) под руководством доктора Дэниела Слотника (1931–1985), математика и компьютерного гения, предложила идею реализации первой в мире параллельной вычислительной системы. Проект, получивший название SOLOMON, базировался на принципе векторной обработки данных, который был сформулирован Джоном фон Нейманом еще в начале 50-х годов [1]. В общепринятый лексикон термин «суперкомпьютер» вошел благодаря распространенности компьютерных

систем Сеймура Крея [2], таких как Cray-1, Cray-2. Первый суперкомпьютер Крея, например CDC6600, созданный в 1963 году, имел только один центральный процессор, а следующий в истории суперкомпьютер – CDC8600 – проектировался для использования четырех процессоров с общей памятью. Однако CDC8600 так никогда и не был выпущен. Его разработка была прекращена в 1972 году, и лишь в 1983 году удалось создать работающий суперкомпьютер – CRAY X-MP, в котором использовалось два центральных процессора с общей памятью.

Развитие компьютерной техники в СССР и современной России

Эпоха развития наших вычислительных технологий началась с появления МЭСМ – Малой Электронной Счетной Машины – проекта, который был создан в 1948 году Сергеем Алексеевичем Лебедевым, великим ученым нашей современности, основоположником информационных технологий и вычислительной техники в СССР [3].

В 1951 году под руководством Б. Рамеева и И. Брука была сконструирована ЭВМ М-1, которая по вычислительной мощности уступала МЭСМ С.А. Лебедева¹. Однако машины уже второго поколения ЭВМ серии «М» – М-2 – стали самыми лучшими «компьютерами» в Советском Союзе по соотношению цены, качества и производительности [4].

В 1953 году коллективом под руководством академика С.А. Лебедева была разработана Большая Электронная Счетная Машина первого поколения БЭСМ-1, которая стала самой производительной ЭВМ в Европе. В 1958 году после очередной модернизации БЭСМ-1 в серийное производство была запущена БЭСМ-2 [3].

Первой массовой советской ЭВМ стала легендарная «Стрела», разработанная примерно в тот же период коллективом СКБ под руководством главного конструктора Ю.Я. Базилевского [5]. Создатели «Стрелы» в 1954 году получили государственные премии I, II и III степени, а Ю.Я. Базилевскому было присвоено почетное звание Героя Социалистического Труда. Чуть позже С.А. Лебедевым была представлена следующая разработка – ЭВМ М-20. Этот период производства и эксплуатации ранних ЭВМ в Советском Союзе продолжался 20–30 лет.

В ответ на создание в США суперкомпьютера Сеймура Крея CDC 6600 наша страна ответила разработкой в 1965 году под руководством академика С.А. Лебедева одной из лучших в мире электронных машин БЭСМ-6, которая вывела СССР на мировой уровень производительности и быстродействия ЭВМ [3]. Главной фигурой в этот период развития компьютерной техники снова стал академик С.А. Лебедев, проложивший путь для всех разработок компьютеров в Советском Союзе и России. Его именем назван Московский институт точной механики и вычислительной техники (далее – ИТМиВТ). Сегодня это Московский Центр Спарк Технологий (МЦСТ), в стенах которого Сергеем Алексеевичем была разработана самая производительная в СССР БЭСМ-6, которая по многим параметрам даже превосходила западные аналоги того времени [3].

БЭСМ-6 – это шедевр компьютеростроения, в котором было реализовано множество революционных решений. С 1968 года начался серийный выпуск БЭСМ-6 на заводе счетно-аналитических машин (САМ) в Москве. Производство шло вплоть до 1987 года, и за это время было выпущено 355 машин. Машина выпускалась более 17 лет и пережила три

¹ Ревич Ю. Они были первыми // Компьютерра. 2012. 02.12. URL: <https://old.computerra.ru/xterra/hoto/200670/> (дата обращения: 23.12.2024).

поколения вычислительной техники. Последний экземпляр легендарной машины до сих пор работает в Учебном центре Военно-морского флота под Санкт-Петербургом.

В литературных источниках нет информации о дате, когда БЭСМ-6 стали называть «суперкомпьютером». Но именно с этой машины в СССР началась эра высокопроизводительных вычислительных машин, которые неофициально получили такое название.

Одно время существовало мнение, что архитектура БЭСМ-6 в какой-то степени воспроизводила архитектуру систем CDC-1604 и CDC-6600 Сеймура Крэя, а также английской ЭВМ Atlas [2]. И хотя БЭСМ-6 имела некоторые общие конструктивные особенности с британской и американской машинами, она не являлась их близкой копией. Прямое сравнение спецификаций БЭСМ-6 и CDC-1604 не позволило выявить каких-либо ощутимых сходств в архитектуре машин.

В 1973 году под руководством академика В.А. Мельникова была разработана «аппаратура сопряжения к БЭСМ-6» – модульная система АС-6, позволяющая объединять БЭСМ-6, ЦП АС-6, общие модули памяти, несколько специализированных периферийных машин (ПМ-6) и их периферию в единый комплекс [6].

С 1977 по 1987 гг. АС-6 выпускалась на Московском заводе счетно-аналитических машин (САМ). В 1982 году за разработку АС-6 была присуждена Государственная премия СССР, лауреатами которой стали В.А. Мельников и другие сотрудники ИТМиВТ [7]. Во время совместного полета космических кораблей «Союз» и «Аполлон» эта система использовалась для расчета данных траектории полета [6].

Дальнейшим развитием машин БЭСМ-6 является разработка суперкомпьютеров серии «Эльбрус» под руководством академика В.С. Бурцева [7]. В 1980 году был создан первый отечественный многопроцессорный суперкомпьютер «Эльбрус-1», включающий в свой состав 10 процессоров, а в 1985 году – суперкомпьютер «Эльбрус-2» [8]. До недавнего времени «Эльбрус-2» использовались в отечественных комплексах противоракетной обороны (далее – ПРО). Большинство советских суперкомпьютеров были разработаны и созданы в ИТМиВТ.

Другой разработкой советского периода стал суперкомпьютер ПС-2000, разработанный в Институте проблем управления (ИПУ) Академии наук СССР (Москва) и в Научно-исследовательском институте управляющих вычислительных машин – НИИ УВМ (Северодонецк). Эта работа была выполнена в 1980 году под руководством профессора И.В. Прангшвили [9]. Максимальная конфигурация системы ПС-2000 состояла из пяти стоек, содержащих 64 процессора общей производительностью 1.0 Гигафлопс. Основными сферами применения суперкомпьютера ПС-2000 были геофизика, сейсморазведка, а также он использовался в Центре управления космическими полетами в составе телеметрического вычислительного комплекса ЦУП-М. Суперкомпьютер ПС-2000 выпускался с 1981 по 1988 гг. на Северодонецком приборостроительном заводе [9].

Распад Советского Союза привел к тому, что в течение 10 лет работы в области создания новых суперкомпьютерных систем в стране практически не велась.

Возрождение отечественного суперкомпьютеростроения началось в начале нового века. В 2001 году под руководством академика В.К. Левина в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН был создан и установлен суперкомпьютер МВС 1000М [10]. Это был первый отечественный суперкомпьютер, перешагнувший символический гигафлопсный рубеж (триллион операций с плавающей запятой в секунду). Программные и ап-

паратные средства МВС 1000М позволяют решать одну задачу с использованием всего вычислительного ресурса.

В начале 2000-х годов стартовала совместная российско-белорусская программа по разработке семейства суперкомпьютеров СКИФ – СуперКомпьютерная Инициатива Феникс. За четыре года два десятка российских и белорусских научных центров, конструкторских бюро, НИИ, вузов и предприятий создали шестнадцать опытных образцов суперкомпьютеров, из которых два на тот момент вошли в мировой рейтинг TOP-500. В тот же период появилась традиция присваивать суперкомпьютерам имена выдающихся ученых России.

В рамках этой программы в 2008 году компанией «Т-платформа» был создан самый мощный на тот момент в России, СНГ и Восточной Европе суперкомпьютер МГУ «Чебышев» [11], который занял 36-е место в мировом рейтинге суперкомпьютеров TOP-500.

Пиковая производительность суперкомпьютера МГУ «Чебышев», построенного на базе 1250 четырехъядерных процессоров Intel® Xeon® E5472, составила 60 Терафлопс. Вычислительный комплекс МГУ «Чебышев» был установлен в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ имени М.В. Ломоносова – НИВЦ МГУ – и использовался для решения различных фундаментальных и прикладных научных задач.

В ноябре 2009 года состоялась презентация нового мощного отечественного суперкомпьютера «Ломоносов», его пиковая производительность составляла 510 Тф². Это был первый гибридный суперкомпьютер такого класса в России и Восточной Европе. В 2012 году пиковая производительность суперкомпьютера «Ломоносов-2» была повышена до 1,7 петафлопс (Пф), и до настоящего времени суперкомпьютер занимает ведущее место среди всех суперкомпьютеров, работающих на территории России.

Роль и место России в истории системы TOP-500

Ганс Мейер (Hans Meuer), немецкий ученый в области вычислительной техники, в 1983 году начал вести рейтинг суперкомпьютеров по всему миру, ранжируя их по пиковой производительности, а с 1986 года по результатам суперкомпьютерного семинара в Манхейме (ФРГ) публикует статистику суперкомпьютерного рынка. Первоначально данные статистики с 1986 по 1992 гг. предоставлялись в основном производителями. Для обеспечения новой статистической информацией в 1993 году было решено собирать и поддерживать список 500 наиболее мощных компьютерных систем³. С июня 1993 года список публикуется дважды в год с помощью экспертов по высокопроизводительным компьютерам. В списке TOP-500 места присваиваются согласно производительности систем, определяемой по тесту LINPACK.

К сожалению, наша страна отстает не только в плане развития суперкомпьютерной техники, но и в плане обеспеченности ею. На начальный момент в России был только один мощный компьютер – SuperDome/HyperPlex фирмы Хьюлетт-Паккард с 72 процессорами производительностью 109,1 Гф – 365-е место. Пользователем этой системы был Сбербанк России.

² Короткова Т. Суперкомпьютер «Ломоносов» моделирует развитие России в следующие 50 лет // CNews. 2011. 31.03. URL: https://www.cnews.ru/news/line/superkompyuter_lomonosov_modeliruet?ysclid=m899k6mzla55414416 (дата обращения: 23.12.2024).

³ Introduction and Objectives // Top 500. The List. URL: <https://www.top500.org/project/introduction/> (дата обращения: 23.12.2024).

Рекордное число российских суперкомпьютеров было представлено в редакции TOP-500 за июнь 2011 года, когда в него вошли 12 отечественных систем. Далее последовал спад: в рейтинге за ноябрь 2011-го осталось всего 5 российских систем. Следующий подъем был зарегистрирован в ноябре 2014-го, когда от России в список вошли девять систем: тогда «Ломоносов-2» занял 22-ю строчку мирового списка, при этом по количеству систем Россия делила 7–10-е места⁴.

С 2014 года число российских суперкомпьютеров в мировом TOP-500 составляло от трех до пяти систем, пока по результатам июня 2019 года не снизилось всего до двух систем – самый низкий рейтинг страны с ноября 2006 года⁵.

Сегодня в TOP-500 входят также некоторые зарубежные системы, созданные российскими компаниями.

По суммарной производительности в последнем рейтинге суперкомпьютеров Россия заняла 8-е место в мире, по суммарной пиковой производительности – 9-е, и по количеству суперкомпьютеров Россия также вышла на 9-е место в мире. У нас одинаковое количество систем с Южной Кореей. Сегодня в России работает семь суперкомпьютеров – на четыре больше, чем годом ранее. Три новые машины были созданы компанией «Яндекс».

Суперкомпьютер «Червоненкис» показал производительность 21,53 Пф. Производительность «Галушкина» составила 16,02 Пф, а «Ляпунова» – 12,81 Пф. Вычислительные узлы систем «Червоненкис» и «Галушкин» были созданы сотрудниками «Яндекса».

Как отмечалось выше, новые суперкомпьютеры «Яндекса» названы в честь советских и российских ученых, которые внесли большой вклад в компьютерную науку. Системы построены на базе процессоров AMD EPYC, а также графических ускорителей Nvidia A100 и используются для обучения нейросетевых моделей с миллиардами параметров.

В TOP-500 появился и новый суперкомпьютер Сбербанка «Кристофари Нео» с реальной мощностью в 11,95 Пф. Суперкомпьютеры «Ломоносов-2», расположенный в МГУ, и «МТС Гром», принадлежащий МТС, занимают 241-е и 294-е места соответственно с пиковой производительностью 2,478 и 2,258 Пф.

Проблемы развития и расширения экзафлопсного периода

Компьютерный мир отходит от предыдущего терафлопсного периода, уверенно чувствует себя в петафлопсном периоде и неотвратно движется к созданию экзафлопсной вычислительной эры [12]. Цели, замыслы и планы создания экзасистем были озвучены в 2010 году в программе UHP агентства DARPA и с тех пор многократно повторяются и развиваются [13; 14].

Для развития и создания компьютерных систем экзафлопсной производительности в отдельных странах был разработан ряд госпрограмм, например:

- национальная суперкомпьютерная инициатива (США NSCI)⁶;
- национальные программы в Японии, Китае, Индии и Европе [15; 16].

⁴ November 2014 // Top 500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/top500/2014/11/> (дата обращения: 23.12.2024).

⁵ June 2019 // Top 500. The List. URL: <https://www.top500.org/lists/top500/2019/06/> (дата обращения: 23.12.2024).

⁶ FACT SHEET: National Strategic Computing Initiative // The White House. President Barack Obama. URL: https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/nsци_fact_sheet.pdf (дата обращения: 15.01.2025).

В России по планам развития аппаратно-программной платформы «Эльбрус» есть возможность создать в 2025 году отечественную суперЭВМ, которая по реальной производительности будет сравнима с экзасистемами. В качестве базового элемента рассматривается универсальный микропроцессор «Эльбрус-16СВ». Реализуемая в нем версия архитектуры «Эльбрус» предполагает следующие технологические нововведения [17]:

- система на одном кристалле, включающая контроллеры периферийных устройств;
- аппаратная поддержка виртуализации;
- масштабируемая векторизация до 48 флопс за такт;
- рост производительности ядра.

Характеристики микропроцессора «Эльбрус-16СВ» на текущий период приведены в Таблице.

Таблица

Характеристики микропроцессора «Эльбрус-16СВ»

Параметры	«Эльбрус-16СВ»
Микроархитектура	«Эльбрус» v6
Тактовая частота, ГГц	2,0
Пиковая производительность, Гф	1500/750
Число ядер	16
Объем кэша, МБ	Более 32
Количество каналов памяти	Более 4
Пропускная способность памяти, ГБ/с	Более 100
Многопроцессорность	До 4
Технологический процесс, нм	16
Потребляемая мощность, Вт	100
Соотношение производительность/мощность, Гф/Вт	7,5

Источник: [18].

Если говорить о потенциале микропроцессоров линии «Эльбрус», то он значительно выше. Рост однопоточной производительности планируется за счет увеличения числа операций, выполняемых за такт, в том числе и векторных, а также за счет оптимизирующего компилятора и библиотек, повышения тактовой частоты и увеличения числа ядер. Все упомянутое позволяет на базе разработанных микропроцессоров «Эльбрус» планировать создание ЭВМ петафлопсной производительности [12].

Современные суперЭВМ базируются на микропроцессорах типа «Эльбрус-16СВ». Первый инженерный образец ВК «Эльбрус-16СВ» был представлен в октябре 2020 года на выставке «Микроэлектроника-2020» [17].

Стопетафлопсный суперкомпьютер на микропроцессорах «Эльбрус-16СВ» сможет на реальных задачах показывать производительность, которая сравнима с суперЭВМ эксафлопсного диапазона, построенными с использованием графических и векторных микропроцессоров. При этом показатели энергоэффективности, программируемости и надежности будут обеспечиваться на высоком уровне в силу тех качеств, которые присущи архитектуре «Эльбрус» [17].

Заключение

Дальнейший вклад в рост производительности суперЭВМ внесет многоядерность, а реальные планы по освоению пиковой экзафлопсной производительности связаны с появлением в 2025 году 32-ядерного микропроцессора «Эльбрус».

Практика создания современных суперкомпьютеров на экзафлопсной основе не дает точного и однозначного ответа о путях их дальнейшего развития. Существуют экспертные мнения, что в ближайшее десятилетие будет наблюдаться миграция архитектуры микропроцессоров в сторону гетерогенных структур, в которых универсальные займут лишь небольшой процент площади кристалла, а всё остальное будет отдано ускорителям.

Оценки, сделанные разработчиками аппаратно-программной платформы «Эльбрус», доказывают возможность использования универсальных микропроцессоров с архитектурой широкого командного слова для построения в будущем суперкомпьютеров экзафлопсной производительности. Микропроцессоры «Эльбрус» имеют большой потенциал для наращивания производительности путем совершенствования оптимизирующего компилятора и математических библиотек, а также за счет повышения тактовой частоты.

Литература

1. *Schneck P.B.* Dedication. Daniel L. Slotnick, 1931 to 1985 // *The Journal of Supercomputing*. 1987. Vol. 1. No. 1. P. 5–6. DOI: 10.1007/BF00138601
2. *Charles J.M.* The Supermen: The Story of Seymour Cray and the Technical Wizards Behind the Supercomputer. Wiley, 1997. 232 p. ISBN 978-0-471-04885-5.
3. *Смолевицкая М.Э.* Пионер отечественного компьютеростроения Сергей Алексеевич Лебедев (1902–1974) // Проблемы культурного наследия в области инженерной деятельности : Сборник статей. Вып. 4 / Сост. Т.Ф. Зеленер. М., 2003. С. 64–89. ISBN 5-8032-0047-6.
4. *Брук И.С.* Быстродействующая ЭВМ «М-2». М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 228 с.
5. *Бусленко Н.П., Бусленко В.Н.* Беседы о поколениях ЭВМ. М. : Молодая гвардия, 1977. 238 с.
6. *Митропольский Ю.И.* БЭСМ-6, АС-6 и их влияние на развитие отечественной вычислительной техники // Информационные технологии и вычислительные системы. 2002. № 3. С. 49–58.
7. *Бурцев В.С.* Принципы построения многопроцессорных вычислительных комплексов «Эльбрус». М. : ИТМ и ВТ им. С.А. Лебедева АН СССР, 1977. 53 с.
8. *Ким А.К., Перекатов В.И., Ермаков С.Г.* Микропроцессоры и вычислительные комплексы «Эльбрус». СПб. : Питер, 2013. 272 с. ISBN 5459016975.
9. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Многопроцессорный компьютер ПС-2000 (опыт создания и пути развития). М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. 86 с. ISBN 978-5-91450-101-0. EDN TMSXTN.
10. *Левин В.К.* Российский суперкомпьютер – есть 1 Тфlops // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2002. № 1. С. 6–9. EDN UMMTZV.
11. *Прудников В.Е.* Пафнутий Львович Чебышев, 1821–1894. Л. : Наука, 1976. 282 с.
12. *Ким А.К., Перекатов В.И., Фельдман В.М.* Центры обработки данных на базе серверов «Эльбрус» // *Вопросы радиоэлектроники*. 2017. № 3. С. 6–12. EDN YFYKBF.
13. *Эйсымонт А.К.* DARPA UNPC – дорога к экзафлопсам // *Открытые системы*. СУБД. 2010. № 9. С. 12. EDN SEQCXL.

14. Dongarra J. Report on the Sunway Taihu Light System. University of Tennessee Department of Electrical Engineering and Computer Science Tech. Report UT-EECS-16-742. June 20, 2016. URL: <https://www.netlib.org/utk/people/JackDongarra/PAPERS/sunway-report-2016-old.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).
15. Волков Д. Стратегические ИТ: китайский сюрприз №863 // Открытые системы. СУБД. 2010. № 3. С. 32–37. EDN SEZVGF.
16. Кузьминский М. Китайский процессорно-суперкомпьютерный путь // Открытые системы. СУБД. 2017. № 1. С. 30–32. EDN YHOEPZ.
17. Ким А.К., Перекатов В.И., Фельдман В.М. На пути к российской экзасистеме: планы разработчиков аппаратно-программной платформы «Эльбрус» по созданию суперкомпьютера экзафлопсной производительности // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 6–13. EDN YNHQGH.

References

1. Schneck P.B. (1987) Dedication. Daniel L. Slotnick, 1931 to 1985. *The Journal of Supercomputing*. Vol. 1. No. 1. Pp. 5–6. DOI: 10.1007/BF00138601
2. Charles J.M. (1997) *The Supermen: The Story of Seymour Cray and the Technical Wizards Behind the Supercomputer*. Wiley. 232 p. ISBN 978-0-471-04885-5.
3. Smolevitskaya M.E. (2003) Pioneer of Russian Computer Engineering Sergei Alekseevich Lebedev (1902–1974). In: Zelener T.F. (Ed) *Problemy kul'turnogo naslediya v oblasti inzhenernoi deyatel'nosti* [Problems of Cultural Heritage in the Field of Engineering Activity] : Collection of Articles. Issue 4. Moscow. Pp. 64–89. ISBN 5-8032-0047-6. (In Russian).
4. Brook I.S. (1957) *Bystrodeistvuyushchaya EVM "M-2"* [High-speed computer "M-2"]. Moscow : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. 228 p. (In Russian).
5. Buslenko N.P., Buslenko V.N. (1977) *Besedy o pokoleniyakh EVM* [Conversations about generations of computers]. Moscow : Molodaya Gvardiya Publ. 240 p. (In Russian).
6. Mitropolsky Yu.I. (2002) BESM-6, AS-6 and their influence on the development of domestic computing technology. *Journal of Information technologies and computing systems*. No. 3. Pp. 49–58. (In Russian).
7. Burtsev V.S. (1977) *Printsipy postroeniya mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh kompleksov "Elbrus"* [Principles of construction of multiprocessor computing complexes "Elbrus"]. Moscow : Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering Publ. 53 p. (In Russian).
8. Kim A.K., Perekatov V.I., Ermakov S.G. (2013) *Printsipy postroeniya mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh kompleksov "Elbrus"* [Microprocessors and computing complexes "Elbrus"]. St. Petersburg : Piter Publ. 272 p. ISBN 5459016975. (In Russian).
9. Zatuliveter Yu.S., Fishchenko E.A. (2012) *Mnogoprotsessornyi komp'yuter PS-2000 (opyt sozdaniya i puti razvitiya)* [Multiprocessor computer PS-2000 (experience of creation and development paths)]. Scientific publication. Moscow : V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ. 86 p. ISBN 978-5-91450-101-0. (In Russian).
10. Levin K. (2002) Russian supercomputer – there is 1 Tflops. *Electronics: Science, Technology, Business*. No. 1. Pp. 6–9. (In Russian).
11. Prudnikov V.E. (1976) *Pafnutiy Lvovich Chebyshev, 1821– 1894*. Leningrad : Nauka Publ. 282 p. (In Russian).
12. Kim A.K., Perekatov V.I., Feldman V.M. (2017) Data centers based on "Elbrus" servers. *Questions of Radio Electronics*. No. 3. Pp. 6–12. (In Russian).

13. Eysymont L.K. (2010) DARPAUHPС – the road to exaflops. *Open Systems. DBMS*. No. 9. Pp. 5–6. (In Russian).
14. Dongarra J. (2016) *Report on the Sunway Taihu Light System*. University of Tennessee Department of Electrical Engineering and Computer Science Tech. Report UT-EECS-16-742. URL: <https://www.netlib.org/utk/people/JackDongarra/PAPERS/sunway-report-2016-old.pdf> (accessed 15.01.2025).
15. Volkov D. (2010) Strategic IT: Chinese surprise No. 863. *Open Systems. DBMS*. No. 3. Pp. 32–37. (In Russian).
16. Kuzminsky M. (2017) The Chinese processor-supercomputer path. *Open systems. DBMS*. No. 1. Pp. 30–32. (In Russian).
17. Kim A.K., Perekatov V.I., Feldman V.M. (2018) On the way to the Russian exasystem: Plans of the Elbrus hardware-software platform developers on creation of an exaflops performance supercomputer. *Questions of Radio Electronics*. No. 2. Pp. 6–13. (In Russian).

Поступила в редакцию: 29.01.2025

Received: 29.01.2025

Поступила после рецензирования: 19.02.2025

Revised: 19.02.2025

Принята к публикации: 03.03.2025

Accepted: 03.03.2025