

УДК 681.3

МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аноприенко А.Я.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

Кафедра компьютерной инженерии

anoprien@gmail.com

На основе анализа данных списка Top500 суперкомпьютерных систем за 20 лет его существования и целого ряда других источников может быть выявлен целый ряд закономерностей развития компьютерных систем, которые более адекватно и всесторонне позволяют отслеживать и прогнозировать реальную эволюцию средств и методов компьютеринга вообще и компьютерного моделирования в частности. Естественно, что при этом, учитывая чрезвычайное многообразие различных данных и довольно частую их противоречивость, речь может идти лишь о разного рода моделях эволюции, отражающих основные качественные и количественные закономерности роста с приемлемой и разумной степенью точности.

*Посвящается памяти
Юрия Валентиновича Ладыженского,
замечательного ученого, преподавателя и человека*

В истории компьютерного моделирования известен уникальный случай, когда результаты моделирования оказали решающее влияние на глобальные политические и экономические процессы. Произошло это в 1983 году, когда по инициативе известного американского астронома Карла Сагана были опубликованы сценарии возможной ядерной войны, сопровождаемой обменом ядерными ударами мощностью в тысячи мегатонн. При этом была высказана гипотеза о «ядерной ночи», наступающей после масштабных пожаров и окутывания планеты пеленой сажи, и о «ядерной зиме», которая неизбежно после этого наступит, так как поверхность планеты станет недоступной для солнечного света и начнет быстро остывать [1].

В этом же году данная гипотеза была проверена коллективом ученых под руководством Н.Н. Моисеева в ВЦ Академии наук СССР, располагавшим системой глобальных моделей, реализованной усилиями Александрова В.В. и Стенчикова Г.Л.

на одной из наиболее мощных ЭВМ того времени БЭСМ-6 [2]. Сделанные расчеты полностью подтвердили справедливость гипотезы К. Сагана. А уже в октябре 1983 года в Вашингтоне состоялась научная конференция, посвященная оценке последствий возможной ядерной войны, на которой с докладами выступили К. Саган и В.В. Александров, изложившие результаты моделирования: американская сторона – для первого месяца после обмена ядерными ударами, советская – для всего последующего года. Главный вывод заключался в том, что в результате ядерной войны произойдут такие качественные изменения биосфера, которые исключат возможность жизни на Земле человека [3]. Этот факт произвел на политические круги настолько сильное впечатление, что положил начало процессу ядерного разоружения и практически полному отказу от приемлемых ранее противостоящими сторонами (СССР и США) сценариев ядерных конфликтов. Опасность глобальной ядерной войны в итоге начала резко снижаться, что в определенной степени привело к инициированию перестроичных процессов в Советском Союзе и ускорению процессов глобализации на рубеже тысячелетий в результате отказа СССР от дальнейшего противостояния с Западом.

При этом следует отметить, что такое масштабное и, фактически, судьбоносное моделирование было реализовано на компьютерах с производительностью порядка всего одного миллиона операций в секунду (ровно 1 MFlops для БЭСМ-6) и весьма ограниченной памятью (192 Кбайта в БЭСМ-6). Сегодня мобильные устройства имеют уже на порядки лучшие характеристики и используются в основном для существенно более прозаических целей. Тем не менее, следует констатировать, что **интенсивное развитие компьютерных систем и технологий создает стремительно расширяющееся поле возможностей для развития средств и методов компьютерного моделирования.**

Для того, чтобы адекватно оценивать насколько расширяются и растут эти возможности, необходимо учитывать основные закономерности роста современных компьютерных систем. Однако здесь, как правило, приходится ограничиваться совсем немногими общепризнанными эмпирически закономерностями, связанными преимущественно с так называемым законом Мура.

Гордон Мур, один из основателей корпорации Интел, в 1965 году впервые высказал предположение, что интенсивное развитие цифровой микроэлектроники позволит ежегодно удваивать количество активных элементов на кристалле [4]. Однако, уже в 1975 году ему пришлось сделать существенное уточнение: в долговременной перспективе удвоение сложности интегральных схем возможно лишь каждые 2 года (рис. 1) [5], что в дальнейшем полностью подтвердилось (рис. 2, 3). Соответственно, сегодня можно говорить как минимум о 2-х вариантах закона Мура (словосочетание

«закон Мура» используется с 1970 года), которые можно обозначить в соответствии с годом их появления как «закон Мура 1965» и «закон Мура 1975». Эти 2 варианта формулировки данного закона фактически определили наиболее оптимистичную и наиболее пессимистичную оценки роста соответственно.

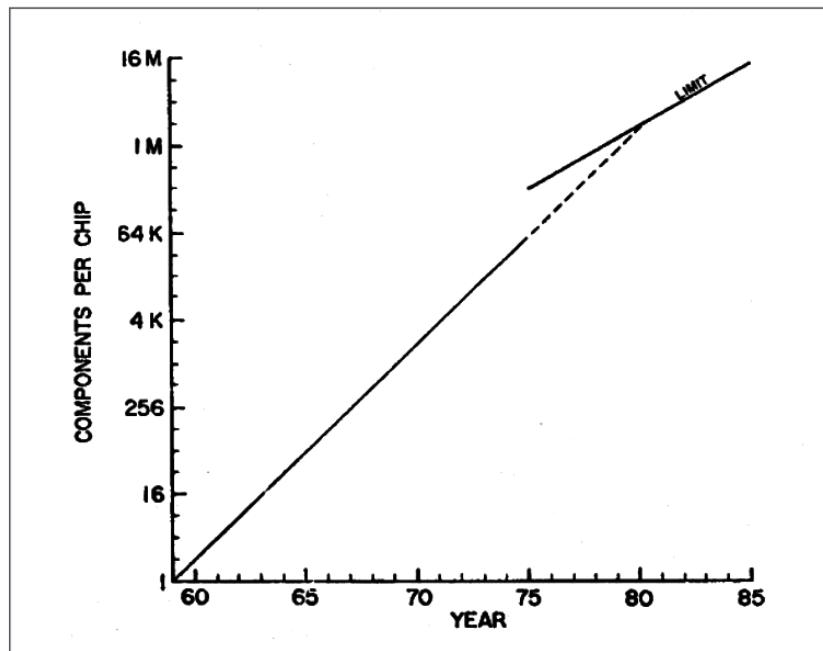


Рисунок 1 – Этим рисунком завершается доклад Гордона Мура 1975 года [1], в котором фактически декларируется, что **десятилетие начального оптимизма «закона Мура 1965»** (ежегодное удвоение [1]) закончилось и начинается **период реалистичного «закона Мура 1975»** (удвоение каждые 2 года)

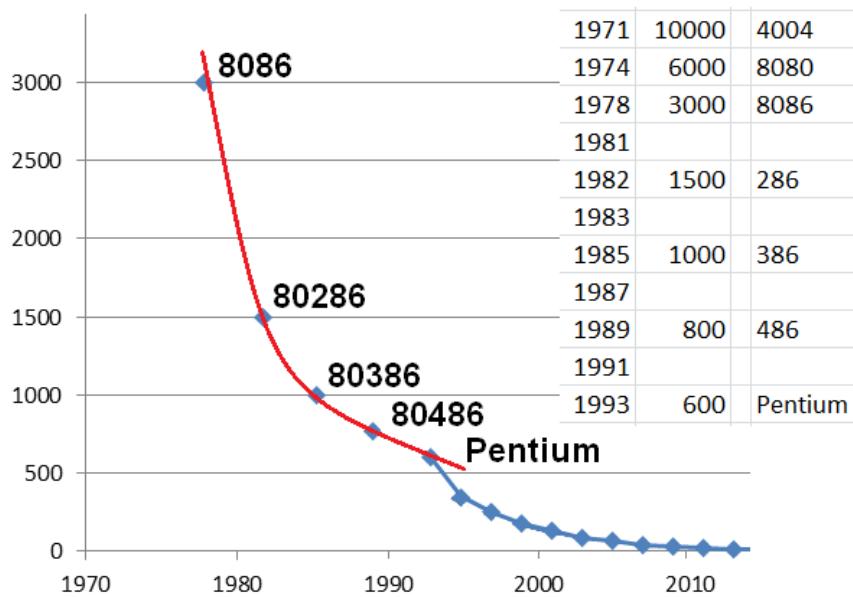


Рисунок 2 – Становление «закона Мура 1975»: уменьшение проектных норм микропроцессоров фирмы Интел в среднем в 1,5 раза каждые 4 года в 1971-1993 гг.

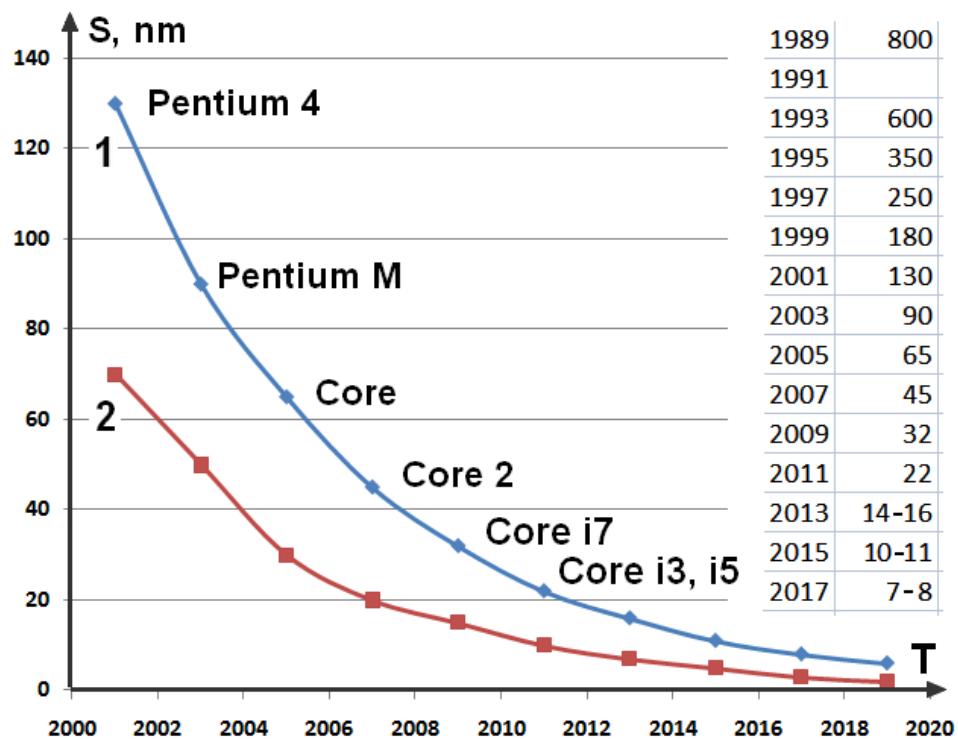


Рисунок 3 – «Закона Мура 1975» в действии: уменьшение проектных норм микропроцессоров фирмы Интел в среднем в 2 раза каждые 4 года (в 1,4 каждые 2 года) в 1993-2018 гг., что теоретически позволяет увеличивать количество активных элементов на той же площади кристалла в 2 раза каждые 2 года, но за счет увеличения размеров микропроцессоров обеспечивалось реальное увеличение количества транзисторов примерно в 2 раза каждые 1,5 года.

Часто цитируемый интервал в 18 месяцев самим Гордоном Муром не рассматривался и связан с прогнозом его коллеги Давида Хауса из Intel, сделавшего в 80-е годы предположение о том, что производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и быстродействия каждого из них. В последующем последовали уточнения, что, возможно, реальный период удвоения производительности составляет 20 месяцев. Однако, **наиболее популярными по-прежнему остаются весьма приближенные оценки удвоения каждые 1, 2 или 1,5 года.**

Накопленный к настоящему времени фактический материал позволяет существенно уточнить и обобщить эти оценки. Наиболее значимым источником при этом следует признать на сегодня список 500-т наиболее производительных суперкомпьютеров Top500 – проект, инициированный в 1993 году в университете Манхайма (Германия) и предполагающий публикацию дважды в год рейтинга и статистики по 500-м наиболее производительным суперкомпьютерам по результатам теста Linpack.

По результатам анализа динамики изменений в этом списке и сопоставления ее с данными из других источников ранее уже предпринимались попытки построения более общих моделей развития компьютерных систем [6-10] (рис. 4 и 5). В том числе были сформулированы предположения о том, что динамика развития суперкомпьютерных систем во многом определяет динамику развития всех классов компьютеров и на этой основе может быть построена своего рода периодическая система развития компьютерных систем.

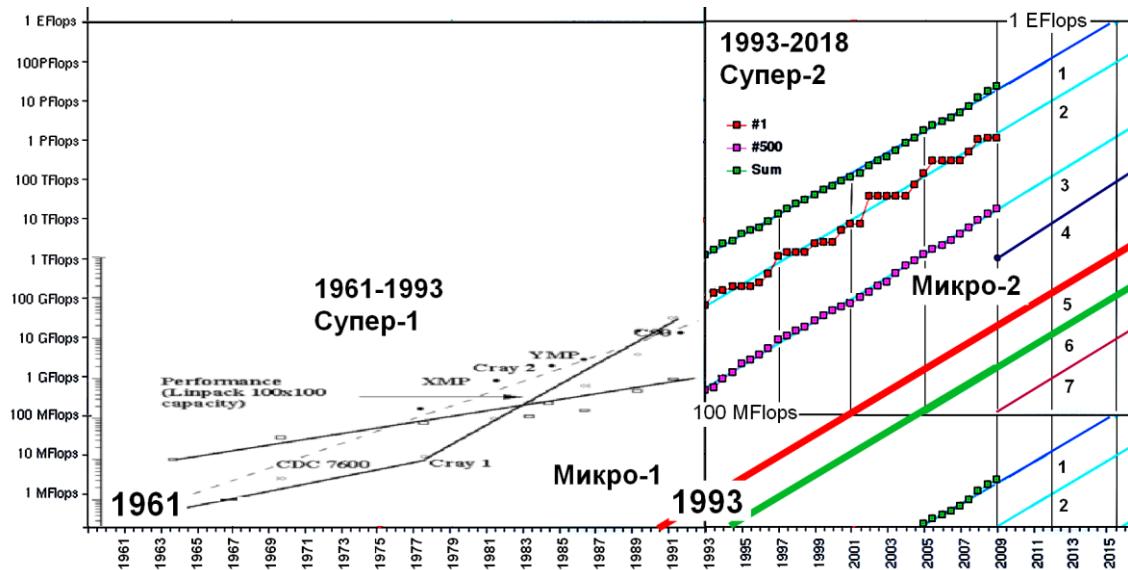


Рисунок 4 – Ноограмма, впервые представленная в работе [9], позволяющая экстраполировать тенденции списка Top500 (после 1993 года блок, условно названный «Супер-2») в прошлое как минимум до 1977 года, когда появился первый суперкомпьютер (Cray 1): рост производительности по списку Top500 совмещен и согласован с независимо полученными графиками роста производительности суперкомпьютеров в период с 1961 по 1993 год, что является наглядным подтверждением существования наблюдаемых в настоящее время закономерностей роста производительности с самого начала истории суперкомпьютерных технологий

Как показали последующие исследования, данная идея явила достаточно продуктивной. Но для ее полной реализации потребовалось существенное уточнение целого ряда параметров. Наиболее актуальным в этом контексте явилось уточнение коэффициентов роста производительности. Особенно с учетом того, что этот рост по данным списка Top500 демонстрирует удивительную стабильность на протяжении десятилетий, что позволяет делать достаточно уверенные прогнозы на ближайшее будущее (рис. 6).

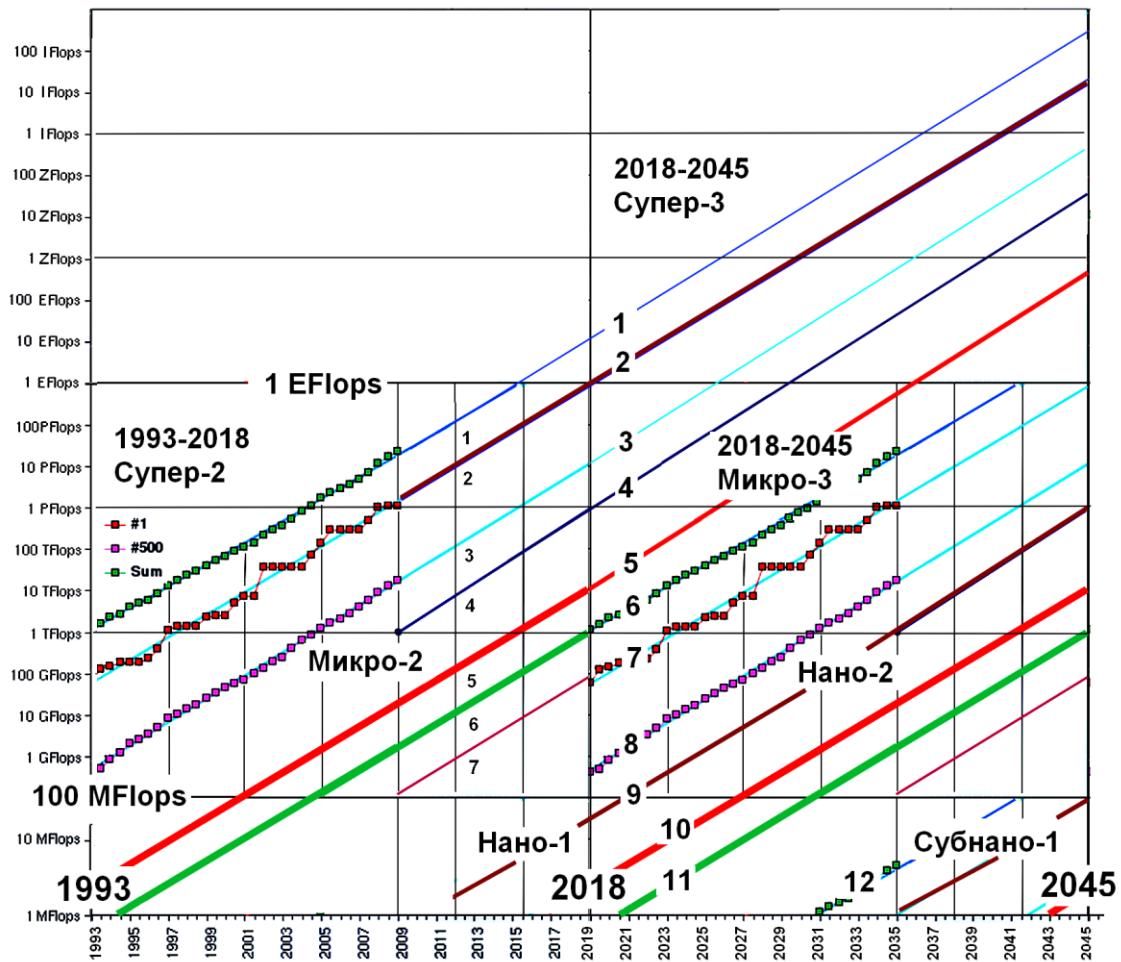


Рисунок 5 – Ноограмма [9], показывающая реальный и прогнозируемый рост производительности различных типов компьютерных систем с экстраполяцией существующих тенденций до 2045 года и прогнозом появления новых классов компьютеров:

1. Суммарная производительность всех суперкомпьютерных систем из списка Top500.
2. Производительность рекордных систем из списка Top500 (1 Ефлопс к 2018-2019 г.).
3. Производительность последней (500-й) системы в списке Top500.
4. Производительность «персональных суперкомпьютеров» на базе графических процессоров (стоимостью порядка 10-20 тыс \$).
5. Производительность «продвинутых» персональных компьютеров стоимостью порядка 1-2 тыс \$ (на 2010 год примерно соответствует производительности микропроцессоров Intel Core 2 Duo).
6. Усредненная производительность персональных компьютеров, находящихся в эксплуатации.
7. Усредненная производительность процессоров компактных мобильных устройств.
8. Суммарная производительность всех нанокомпьютерных систем из списка NanoTop500 (примерно с 2018 г.).
9. Производительность рекордных систем из списка NanoTop500 (100 Мфлопс примерно к 2020 г.).
10. Производительность последней (500-й) наносистемы в списке Top500.
11. Производительность серийных «персональных нанокомпьютеров».
12. Появление субнанокомпьютеров (2030-е годы).

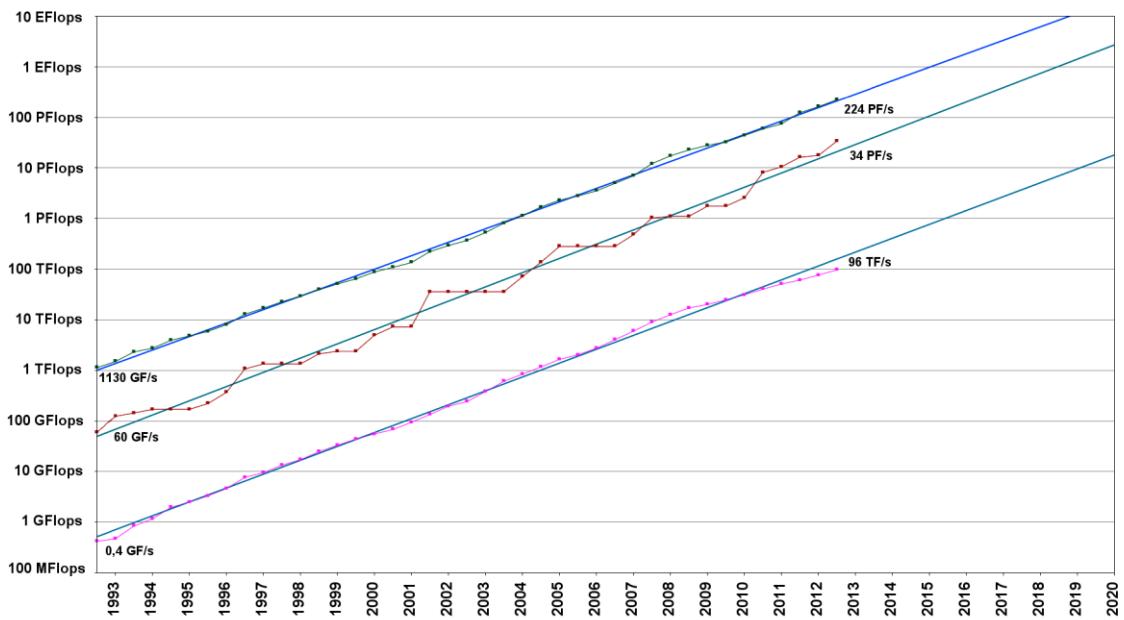


Рисунок 6 – Рост производительности суперкомпьютерных систем по данным списка Топ500 за 1993-2013 гг. с прогнозом до 2020 года: система 1 в списке – средний график, система 500 в списке – средний график, суммарная производительность всех 500-т систем списка – верхний график.

В результате анализа выявлено, что существенно более точной оценкой роста производительности являются не традиционные варианты закона Мура, а **гипотеза о 10-кратном росте производительности каждые 4 года**, предполагающая достаточно точную оценку ежегодного коэффициента роста (ЕКР): **1,77828**. Это примерно соответствует значению ЕКР $\sqrt{\pi} = 1,7725$ (таблица 1).

Таблица 1 – Закон Мура и реальные коэффициенты роста

Закономерность	Основной период (лет)	Коэффициент роста за основной период	Ежегодный коэффициент роста (ЕКР)
Закон Мура 1965	1	2	2
Закон Мура 1975	2	2	$\sqrt{2} = 1,4$
Современный «закон Мура»	1,5	2	1.5874
В 10 раз за 4 года	4	10	1,77828
В π раз за 2 года	2	π	$\sqrt{\pi} = 1,7725$

На рисунке 7 представлен график фактического и прогнозируемого изменения коэффициентов ежегодного роста производительности рекордных суперкомпьютерных систем, который примерно соответствует динамике изменений и для других классов систем.

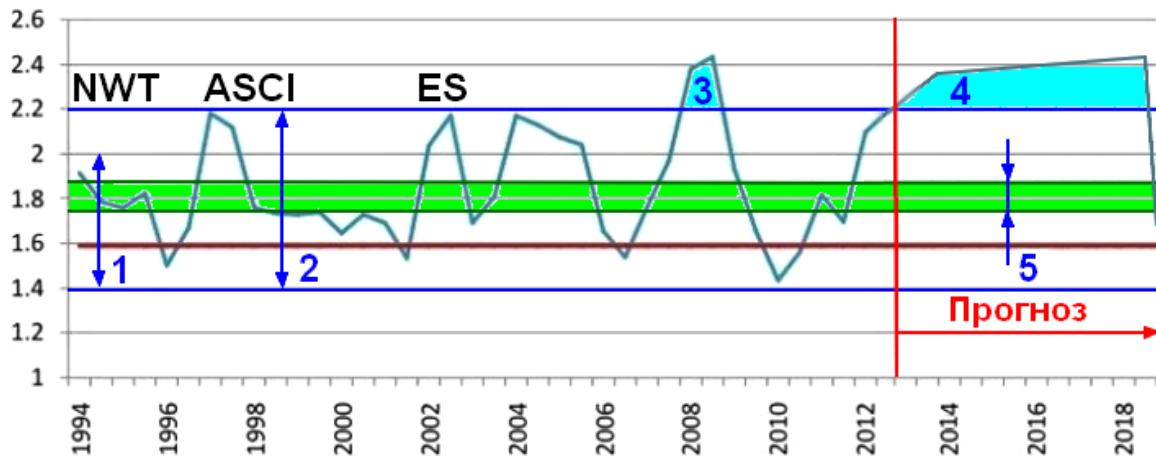


Рисунок 7 – График изменения коэффициентов ежегодного роста производительности рекордных суперкомпьютерных систем (по данным списка Top500): 1 – диапазон «коэффициентов Мура», 2 – основной диапазон изменения коэффициентов роста рекордных систем, 3 – аномальный всплеск, связанный с «петафлопсной гонкой», 4 – аномально высокие коэффициенты роста, обусловленные экзафлопсной гонкой (прогноз), 5 – диапазон усредненных коэффициентов роста, нижняя граница которого является наиболее приемлемым значением для построения обобщенных моделей эволюции компьютерных систем. Разработка систем моделирования являлась главным стимулятором роста рекордной производительности: NWT – Numerical Wind Tunnel (Цифровая аэродинамическая труба), ASCI - Accelerated Strategic Computing Initiative (с 2005 года Advanced Simulation and Computing Program), программа создания суперкомпьютерных систем для моделирования ядерных арсеналов, ES - Earth Simulator (Модель Земли).

При этом усредненные оценки достаточно точно соответствуют рассмотренным коэффициентам роста, что в целом позволяет сформировать своеобразную периодическую систему основных закономерностей роста производительности различных классов (рис. 8). **Основой для построения такой системы является 4-летний период**, который характеризуется ростом производительности для различных классов систем примерно на порядок. За период с 1993 по 2020 год таких классов может быть выделено 10, которые

целесообразно обозначить номером N начиная с класса наиболее производительных систем. В зависимости от значения N существенно меняются не только показатели производительности, но также и порядок стоимости (P) и объем производства (V) компьютерных систем соответствующего класса (рис. 9). Кроме этого могут быть выделены 3 класса своего рода надсистем, обозначенных буквами латинского алфавита (рис. 8). Производительность надсистем носит потенциальный характер и может быть получена лишь в случае их эффективного сетевого объединения в единый ресурс на базе GRID-технологий (наиболее характерных в случае интеграции суперкомпьютерных ресурсов [11, 12]) или облачных технологий, интегрирующих ресурсы существенно более широкого класса компьютерных систем.

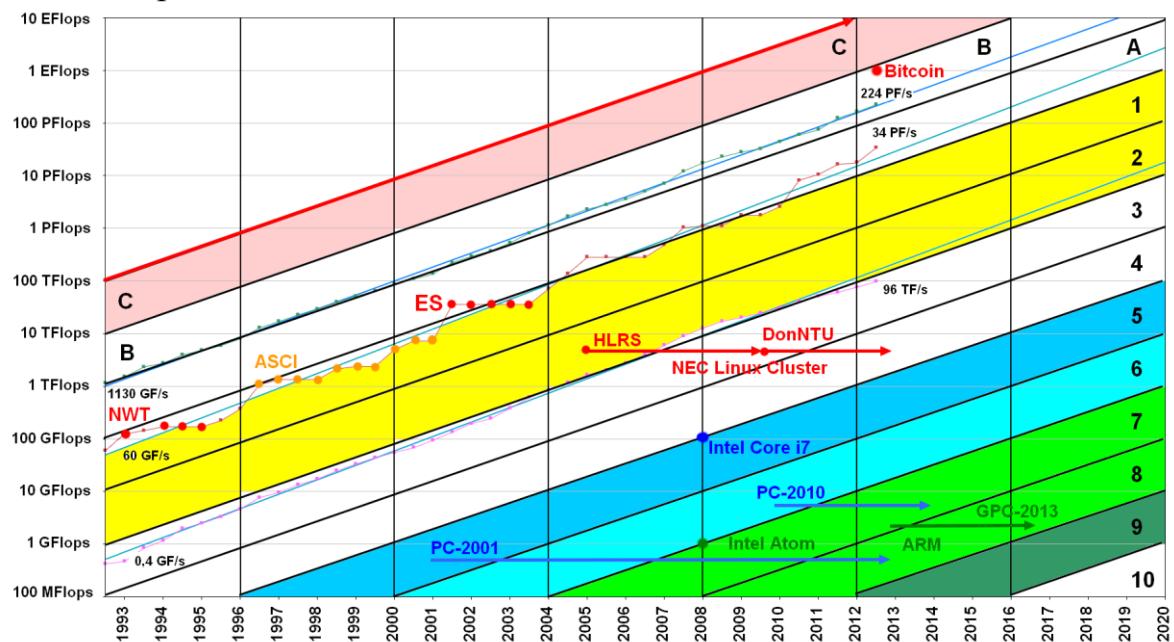


Рисунок 8 – Периодическая система основных закономерностей роста производительности различных классов (представленных их номерами N) компьютерных систем в период с 1993 по 2018 гг.: 1 – Top50 суперкомпьютерных систем, 2 – Top500 суперкомпьютерных систем, 3 и 4 – серверные системы различных классов производительности (соответственно High-end и Low-end), 5 и 6 – персональные стационарные системы различных классов производительности, 7 и 8 – мобильные системы различных классов производительности, 9 и 10 – ультрамобильные системы различных классов производительности. А – суммарная производительность Top500 суперкомпьютерных систем (класс GRID-систем), В – суммарная производительность всех компьютерных систем с широкополосным подключением к Интернет (класс облачных систем), С – суммарная производительность всех подключенных к Интернет компьютерных систем.

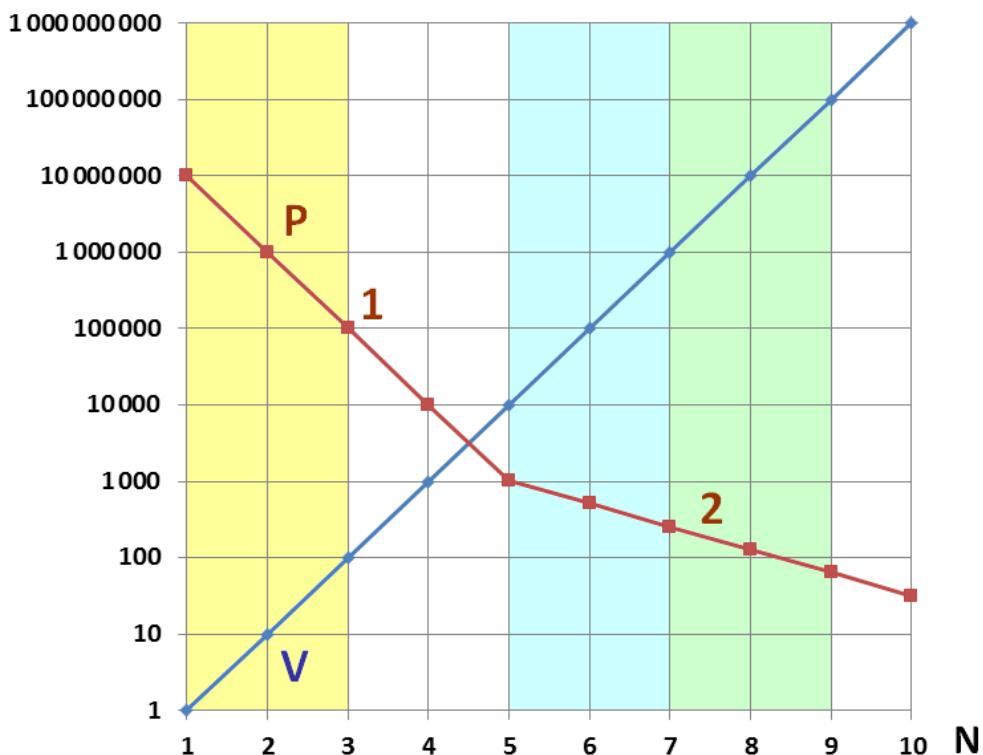


Рисунок 9 – Класс системы (N) примерно определяет объем производства систем данного класса (V) и их стоимость (P). Стоимостный график (шкала в данном случае может рассматриваться как долларовая) содержит 2 характерных участка: 1 – быстрое изменение стоимости для относительно малотиражных систем; 2 – относительно медленное изменение стоимости для массовых систем.

Ярким примером эффективной интеграции вычислительных ресурсов различных классов является запущенная в 2009 году система Bitcoin – пиринговая электронная платёжная система, использующая одноимённые единицы для учёта. Сеть полностью децентрализована, не имеет центрального администратора или какого-либо его аналога. Базовым элементом этой платёжной системы является программный клиент с открытым исходным кодом. С помощью сетевого протокола прикладного уровня запущенные на множестве компьютеров клиенты соединяются между собой в одноранговую сеть. В середине мая 2013 года мощность сети превысила 1 эксафлопс, превысив в 6,35 раза суммарную мощность всех суперкомпьютеров из рейтинга Top500.

Как показал проведенный анализ, закономерности роста производительности тесно связаны и с другими закономерностями, определяющими развитие компьютерных систем и их компонентов (рис. 10-18).

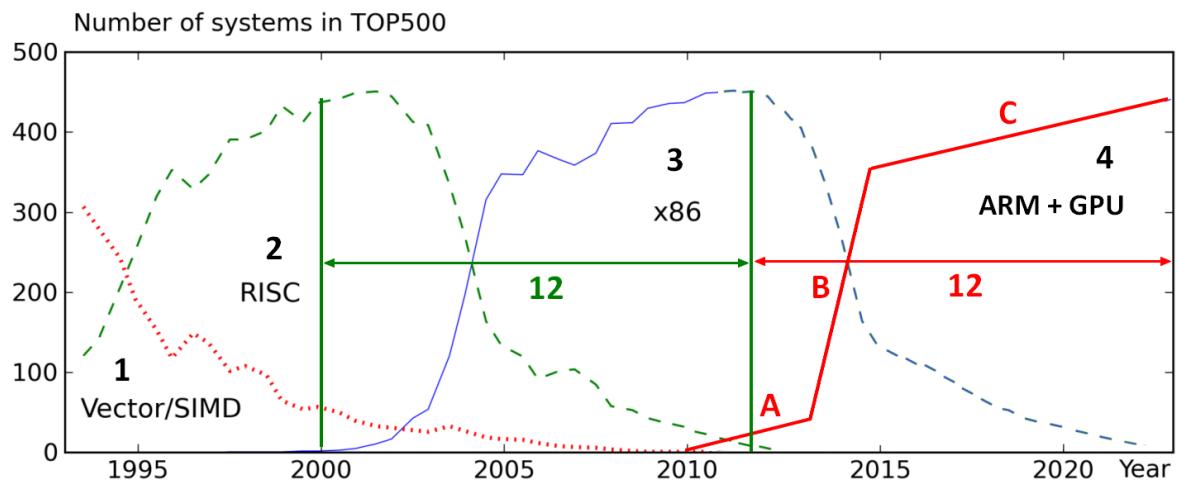


Рисунок 10 – Анализ списка Топ500 позволяет выявить закономерность волнообразной **смены преобладающих базовых архитектур с периодом примерно в 12 лет** (графики за период 1993-2013 гг. построены по данным Топ500). Линеаризация такой волны позволяет выделить 3 характерных участка: А – начальный рост (период формирования концептуальных основ новой архитектуры), В – основной рост (общее признание новой концепции и быстрое вытеснение систем предыдущей архитектуры), С – остаточный рост (период уверенного преобладания новой архитектуры).

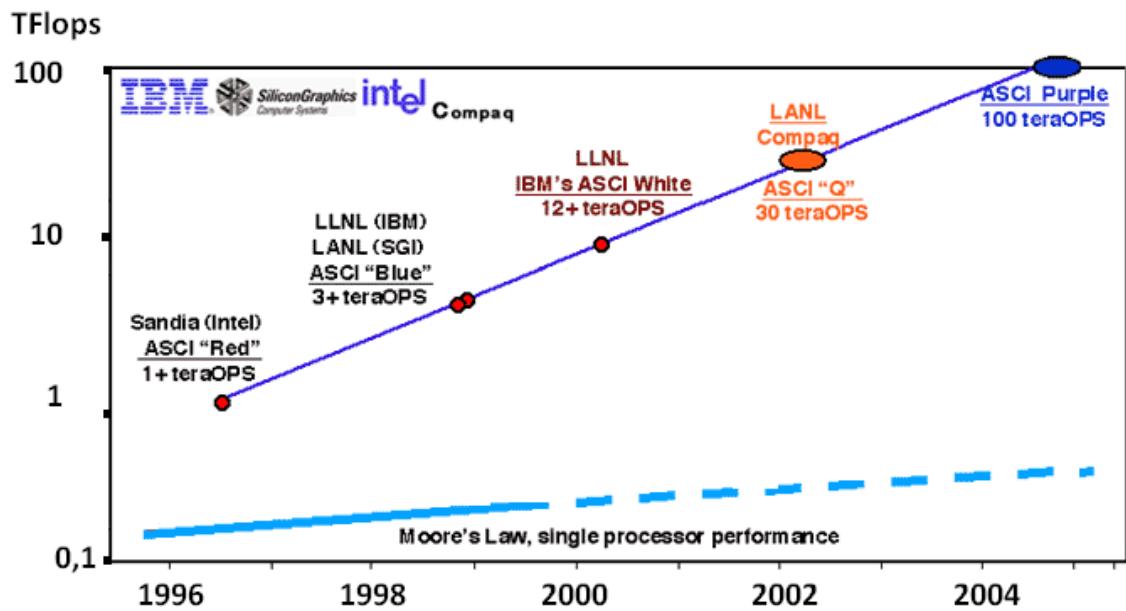


Рисунок 11 – Рост производительности «на порядок каждые 4 года» на рубеже тысячелетий обеспечивался компьютерами семейства ASCI, большинство которых (кроме ASCI Red) строилось на базе все более мощных RISC-процессоров (порядка 10-ти тысяч в каждой системе), что более чем на десятилетие определило базовую архитектуру основных суперкомпьютерных систем (по данным работы [13])

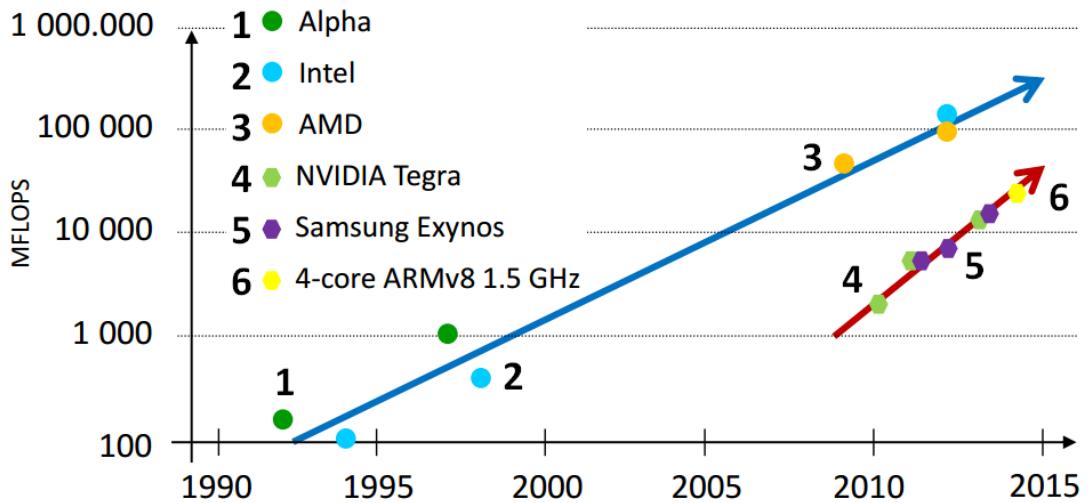


Рисунок 12 – Более чем через десятилетие история стремительной смены архитектур суперкомпьютерных систем повторяется, но уже на базе процессоров типа ARM и GPU, количество которых уже начинает исчисляться миллионами (по данным работы [14])

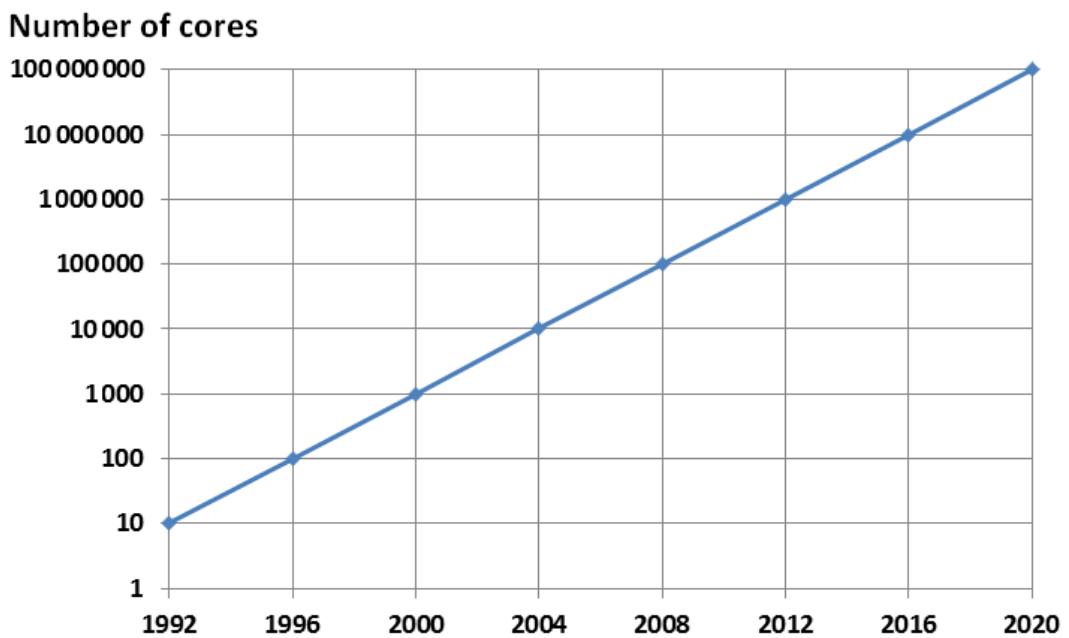


Рисунок 13 – Усредненное количество ядер в наиболее производительных суперкомпьютерных системах (для периода 1993-2013 по данным списка Top500): **рост в тысячу раз каждые 12 лет или в 1,77828 раз ежегодно** (при этом в рекордных системах количество процессоров может в отдельных случаях на 1-2 порядка превышать среднее: например уже в 1996 году в системе ASCI Red использовалось 9216 процессоров Intel Pentium Pro, но в последней рекордной системе этого ряда ASC Purple в 2005 году использовались 12544 RISC-микропроцессоров POWER5, что полностью вписывается в общую закономерность)

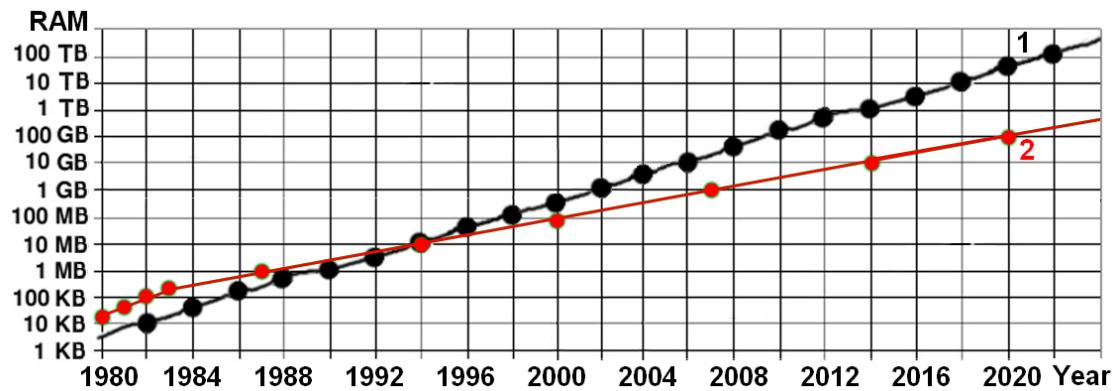


Рисунок 14 – Объем оперативной памяти (RAM) в персональных компьютерах в соответствии с распространенной гипотезой 2000-го года также должен был увеличиваться в 10 раз каждые 4 года (график 1) [15], но реально до 1983 года он рос практически в строгом соответствии с «законом Мура 1965», а после этого – в соответствии с **«законом Мура 1975»** (т.е. удвоение каждые 2 года), что позволяет прогнозировать преодоление рубежа в 100 Гбайт примерно в 2020 году.

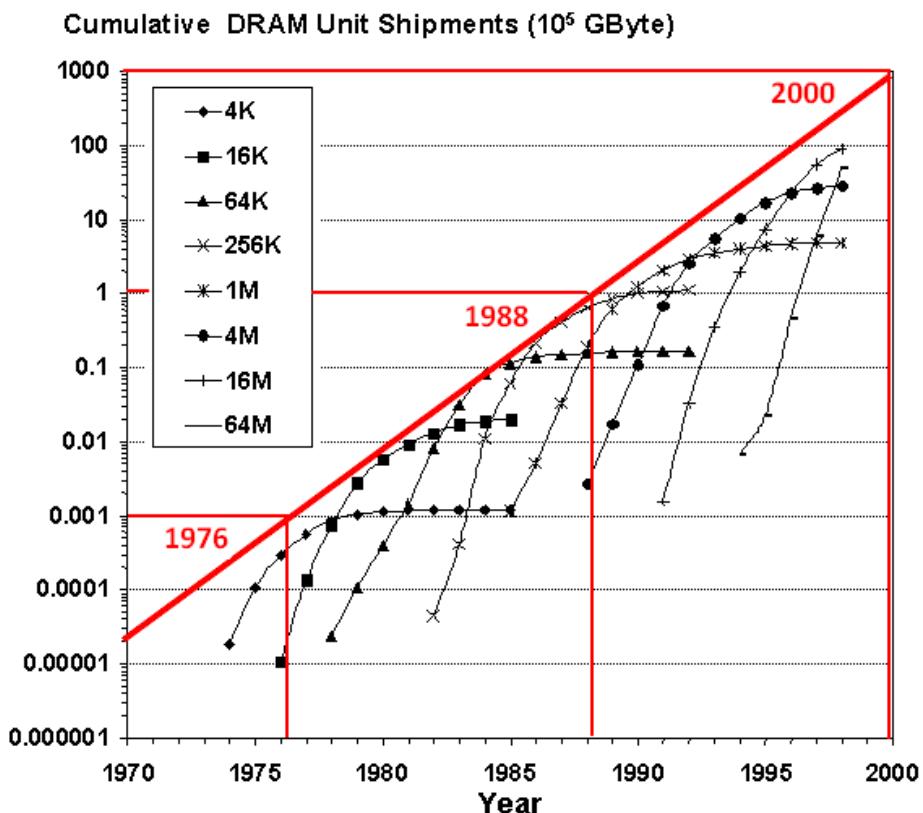


Рисунок 15 – Глобальное производство микросхем оперативной памяти (RAM) основных типов реально увеличивается в **тысячу раз каждые 12 лет или в среднем в 1,77828 раз ежегодно**

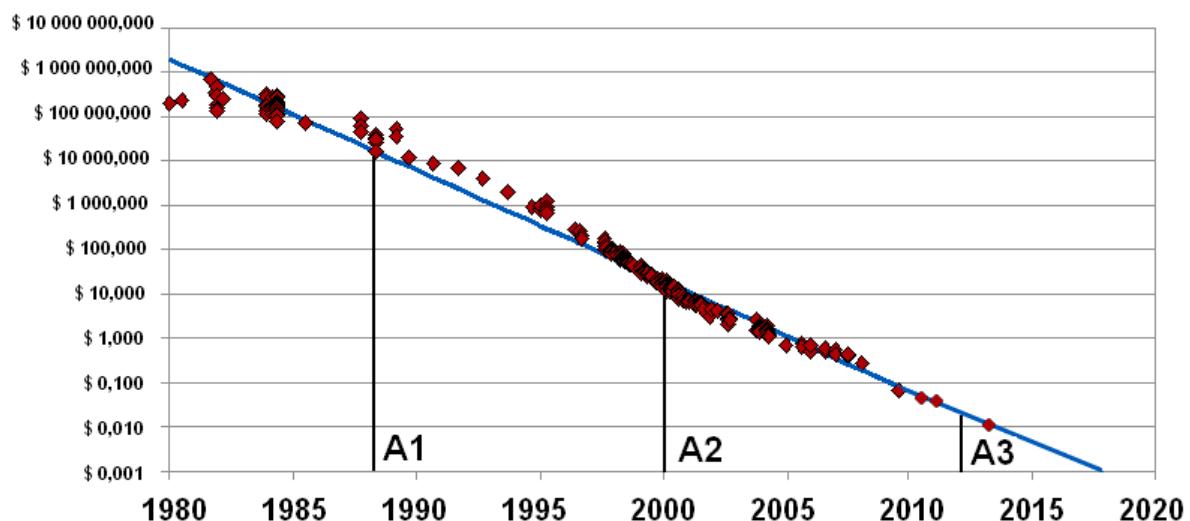


Рисунок 16 – Уменьшение стоимости хранения гигабайта информации на внешних носителях (на жестких дисках) 1982- 2020 гг.: **в тысячу раз каждые 12 лет** (см. интервалы A1-A2 и A2-A3) или на порядок каждые 4 года или в 1,77828 раз ежегодно

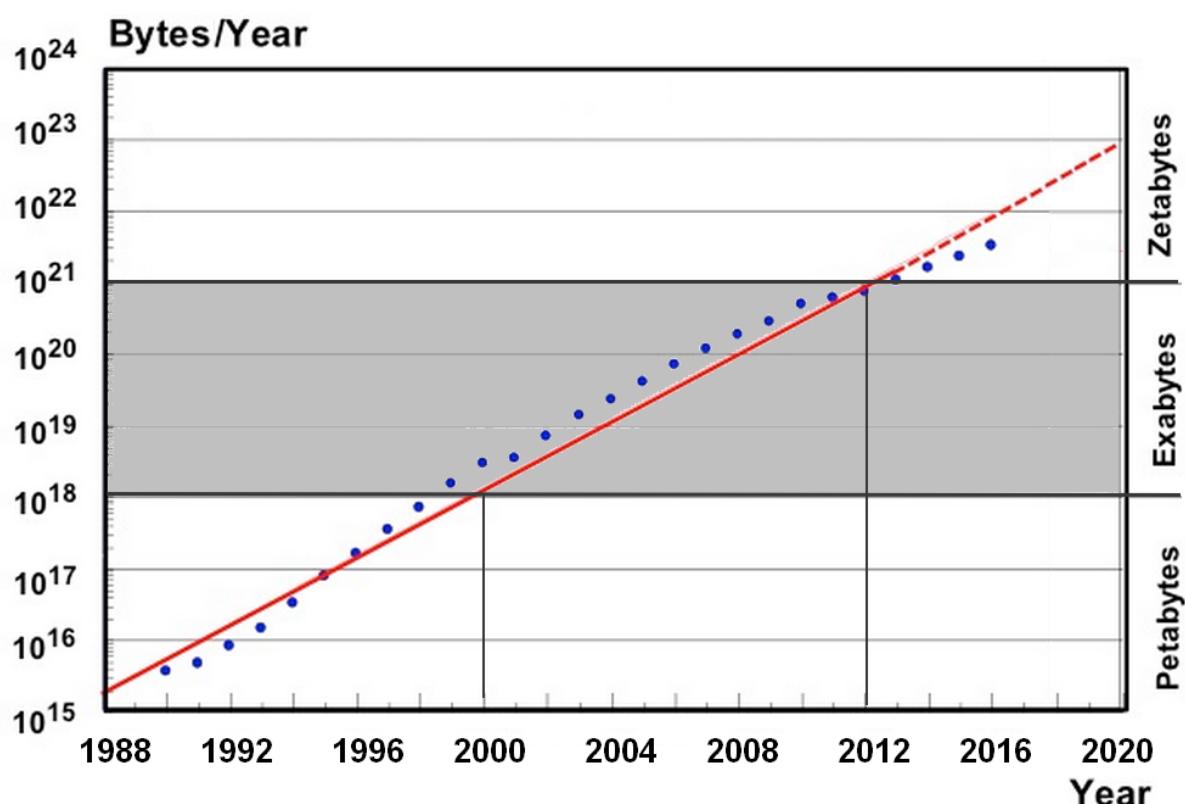


Рисунок 17 – Глобальное ежегодное производство накопителей на жестких дисках, выраженное в виде их суммарной емкости в 1988-2020 гг.: **рост в тысячу раз каждые 12 лет или в 1,77828 раз ежегодно**. После 2012 года суммарная емкость ежегодного производства жестких дисков начинает снижаться за счет перераспределения в пользу SSD-накопителей, но суммарная емкость накопителей этих 2-х видов продолжает сохранять прежние тенденции роста.

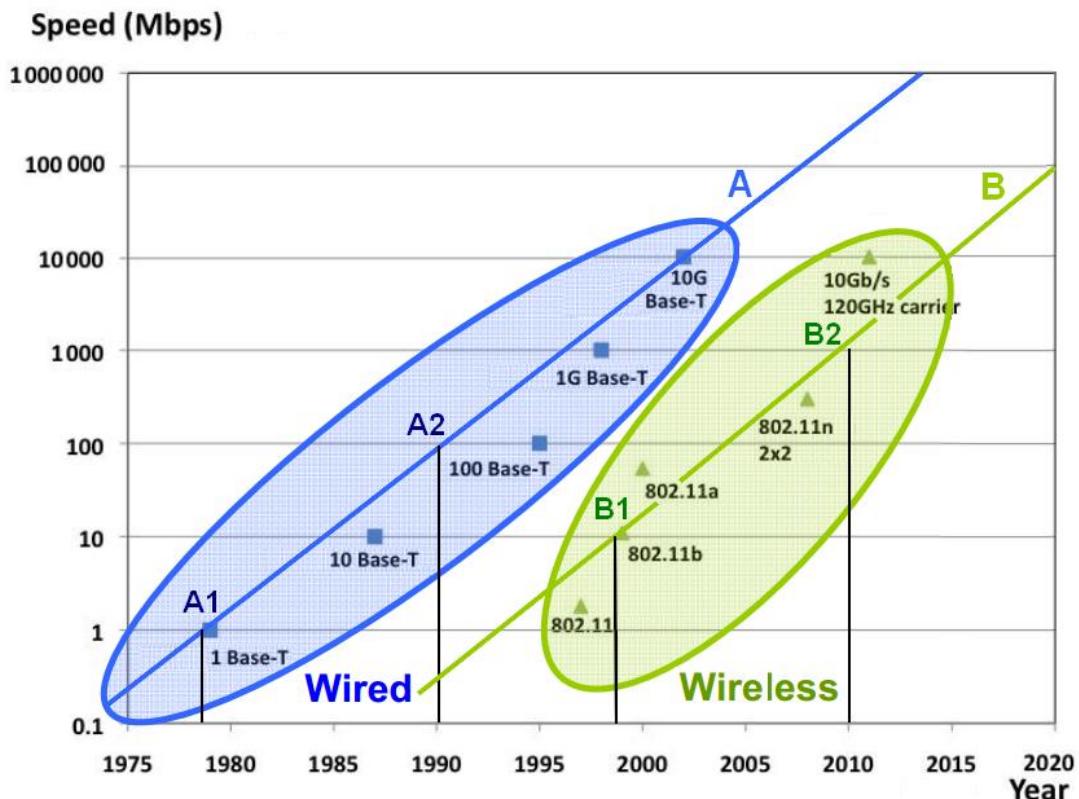


Рисунок 18 – Периодическая система роста производительности проводных (wired) и беспроводных (wireless) систем компьютерной связи: **рост на 2 порядка за 12 лет** (см. периоды A1-A2 и B1-B2) с отставанием по производительности беспроводных сетей от проводных примерно на 12-15 лет.

При этом чрезвычайно важной является тенденция все более тесной интеграции вычислительных ресурсов, что наиболее ярко выражено в динамике роста пропускной способности компьютерной сетевой инфраструктуры (рис. 18). В перспективе речь идет о формировании **единой глобальной информационно-вычислительной сети** – своего рода нервной системы современной цивилизации. С этими процессами может быть ассоциировано становление ноосферы с присущими ей динамическими закономерностями [16-19] и развитие компьютерных моделей нервной системы и мозга (рис. 19).

Есть также основания также предполагать, что интенсивное развитие нанотехнологий позволит экстраполировать и закон Мура, и выявленные закономерности по меньшей мере до 60-х годов XXI века (рис. 20). Кроме того, не исключено, что закономерности развития компьютерных систем являются частным случаем более общих закономерностей развития различных других процессов во Вселенной, в частности, эволюции жизни и генома как ее основы [22-25].

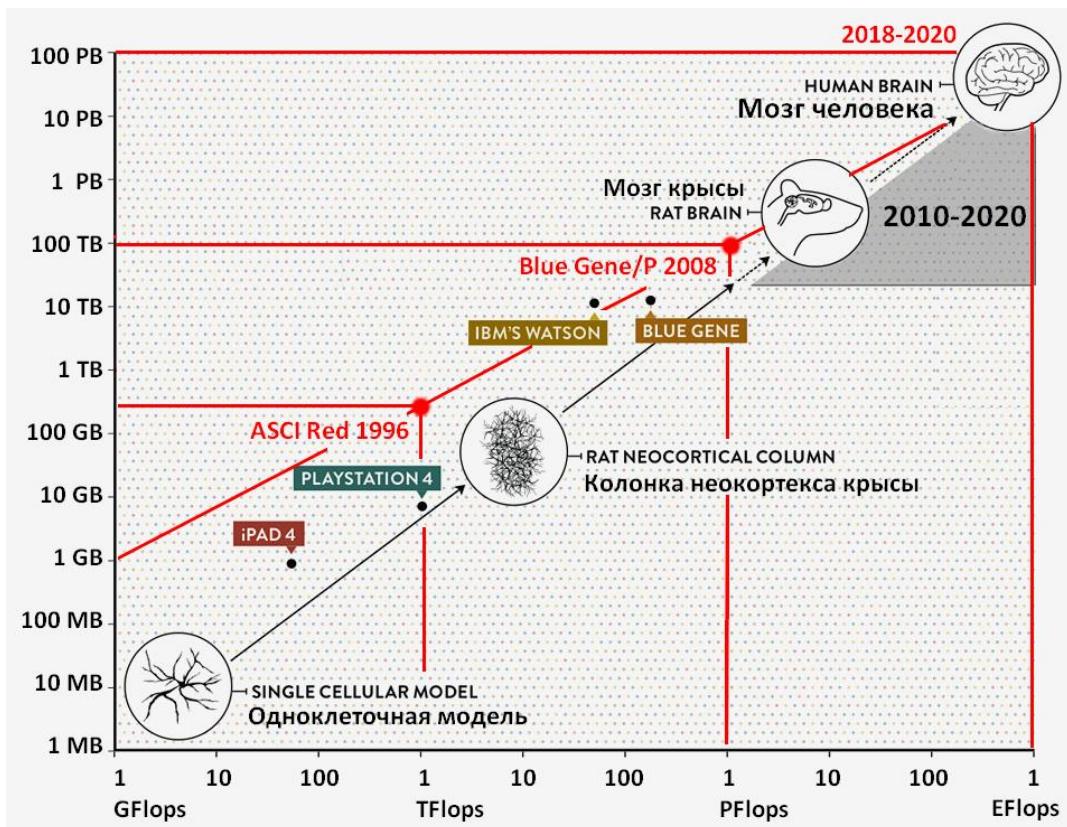


Рисунок 19 – Динамика роста характеристик суперкомпьютерных систем и развития компьютерных моделей мозга (по данным [20])

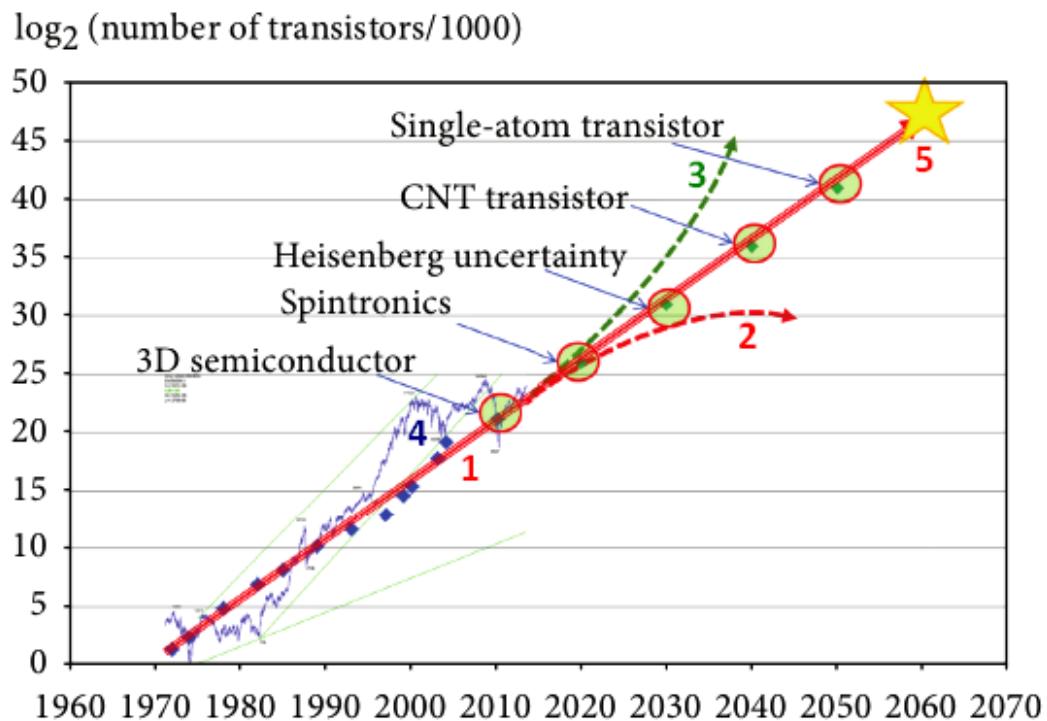


Рисунок 20 – Перспективы развития нанотехнологий позволяют экстраполировать закон Мура вплоть до 2060-х годов с перспективой реализации систем на одноатомных транзисторах примерно к 2050 году [21],

Log10 размера генома (количество пар нуклеотидов)

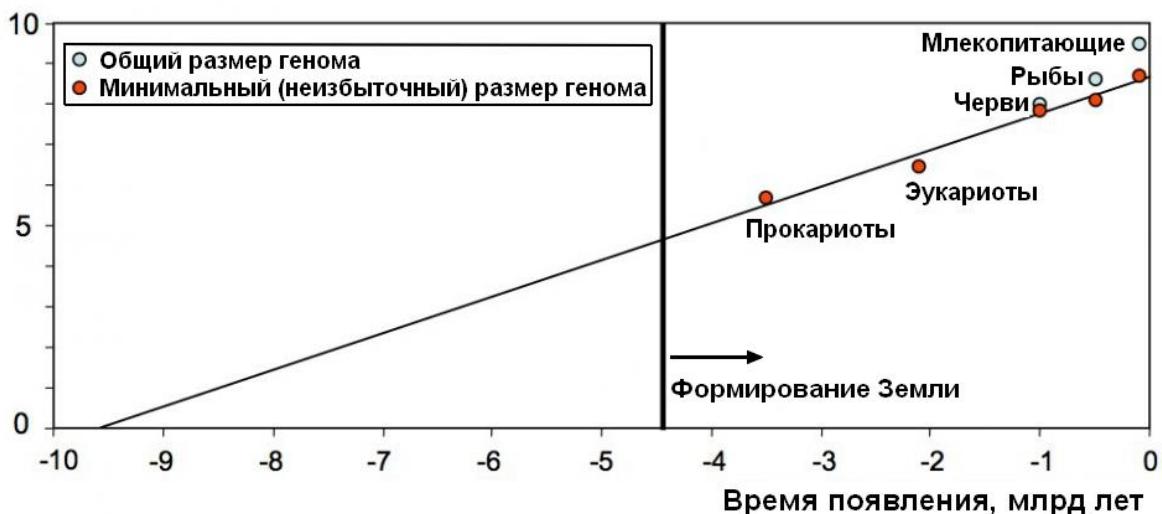


Рисунок 21 – Современная реконструкция эволюции сложности генома позволяет предположить возможность обобщения законов развития компьютерных систем вплоть до масштабов эволюции жизни во Вселенной [25]

Список литературы

1. Turco, R. P., Toon O. B., Ackerman T. P., Pollack J. B., and Sagan C. Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions / Science, 1983. N 222, p. 1283-1292.
2. Александров В.В., Архипов П.Л., Пархоменко В.П., Стенников Г.Л. Глобальная модель системы океан-атмосфера и исследование ее чувствительности к изменению концентрации CO₂. // Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 5. – С. 451-458.
3. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука. - 1985. - 272 с.
4. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. P. 114–117.
5. Moore G. E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol.21, 1975. P. 11–13.
6. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии в прошлом, настоящем и будущем // Материалы V международной научно-технической конференции «Информатика и компьютерные технологии» – 24-26 ноября 2009 г., Донецк, ДонНТУ, 2009. С.15-26.
7. Аноприенко А.Я. Вызовы времени и постбинарный компьютеринг // Информатика и компьютерные технологии / Материалы VI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 23-25 ноября 2010 г. Т. 1. Донецк, ДонНТУ. – 2010. С. 13-31.
8. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // Материалы II всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные управляющие системы и

- компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011)» – 12-13 апреля 2011 г., Донецк, ДонНТУ, 2011. Т.1. С. 7-22.
9. Аноприенко А.Я. Ноографика и ноомоделирование // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 5-8 октября 2011 года, Донецк, ДонНТУ, 2011. С. 321-324.
 10. Аноприенко А.Я., Иваница С.В. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции. — Донецк, ДонНТУ, УНИТЕХ, 2011. — 248 с.
 11. Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Grid-системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 452 с.
 12. На шляху до європейського грід. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 392 с.
 13. Larzelere A.R. The History of the Accelerated Strategic Computing Initiative (ASCI). Lawrence Livermore National Laboratory. 2009. – 216 p.
 14. Tafani D. The Mont-Blanc Project. Leibniz Supercomputing Centre. 2013. 23 p.
 15. Buttazzo G. Can a Machine Ever Become Self-aware? / Artificial Humans. – Los Angeles: Goethe Institute, May 2000, P. 45-49.
 16. Аноприенко А.Я. Нооритмы: модели синхронизации человека и космоса. – Донецк: УНИТЕХ, 2007. – 372 с.
 17. Аноприенко А.Я. Цивилизация, ноосфера и нооритмы // «Ноосфера и цивилизация». Научный журнал. Выпуск 7 (10). – Донецк, 2009, с. 62-69.
 18. Аноприенко А.Я. Нооритмы и время в информационную эпоху // «Время в зеркале науки». Специальный выпуск сборника научных трудов «Гуманитарные студии». Часть 1. – К.: Центр учебной литературы, 2010. С. 291-305.
 19. Аноприенко А.Я. Нооритмы: комплексная эмпирическая модель ноосферной динамики // Международный междисциплинарный симпозиум «Нанотехнология и ноосферология в контексте системного кризиса цивилизации». Сборник тезисов докладов. Симферополь – Ялта, 4-10 января, 2011 г. С. 30-32.
 20. Keats J. The \$1.3B Quest to Build a Supercomputer Replica of a Human Brain, <http://www.wired.com/wiredscience/2013/05/neurologist-markam-human-brain/all/>
 21. Wu J., Shen Y., Kitt Reinhardt K., Szu H., Dong B. A Nanotechnology Enhancement to Moore's Law / Applied Computational Intelligence and Soft Computing, Volume 2013, Article ID 426962. 13 p.
 22. Sharov A.A. Genome increase as a clock for the origin and evolution of life / Biology Direct. Published 12 June 2006. – 10 p.
 23. Долгоносов Б.М. Доминирующий тип памяти определяет тип цивилизации и динамику ее роста // История и математика. – М.: URSS, 2010. 12 с.
 24. Марков А.В., Анисимов В.А., Коротаев А.В. Взаимосвязь размера генома и сложности организма в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим // Палеонтологический журнал. №4, 2010. Стр. 3–14.
 25. Sharov A.A., Gordon R. Life Before Earth / Cornell University Library's online archives arXiv.org. Submitted on 28 Mar 2013. <http://arxiv.org/pdf/1304.3381v1.pdf>
-

Как правильно ссылаться на данный доклад:

Аноприенко А.Я. Модели эволюции компьютерных систем и средств компьютерного моделирования // Материалы пятой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 24-27 сентября 2013 года, Донецк, ДонНТУ, 2013. С. 403-423.