

УДК 001.51:122

Системодинамика техносферы: как измерить технический прогресс

Аноприенко А.Я.

Донецкий национальный технический университет
anoprien@gmail.com

Аноприенко А.Я. «Системодинамика техносферы: как измерить технический прогресс». Системодинамика техносферы может рассматриваться как сочетание периодических и экспоненциальных закономерностей роста. Основой периодической составляющей может служить модифицированная концепция волн Кондратьева. Суть модификации при этом заключается в привязке волн к 50-летним периодическим колебаниям с переменной амплитудой в пределах 500-летних периодов. Анализ большого объема реальных исторических данных подтверждает целесообразность и достаточную продуктивность такой модели как минимум при рассмотрении развития техносферы на протяжении последнего тысячелетия. Экспоненциальную составляющую предложено количественно оценивать на базе универсального показателя скорости роста S . При этом в качестве базовой шкалы предлагается использовать ту же шкалу, которая используется для описания различных закономерностей роста ноотехносферы. Это позволяет наглядно сравнивать интенсивность процессов развития в различных областях техники с интенсивностью прогресса в компьютерных технологиях, где в настоящее время наблюдаются самые высокие и устойчивые темпы роста.

Ключевые слова: системодинамика, техносфера, периодические процессы развития, экспоненциальный рост, закономерности развития технических систем, скорость технического прогресса, обобщенный закон Мура

Введение

Данная публикация может рассматриваться как непосредственное продолжение работы [1] по системодинамике ноотехносферы, а также как дальнейшее развитие и обобщение результатов, представленных в работах [2 – 16].

Как показано в работе [1], ноотехносфера, т.е. «разумная» составляющая техносферы, формируемая множеством взаимосвязанных компьютерных систем и размещенных на них информационных ресурсов, характеризуется беспрецедентными темпами роста (преимущественно экспоненциального). В последнее время популярными стали сравнения типа «если бы авиационные (и/или автомобильные, и/или космические) технологии развивались бы такими же темпами, как компьютерные, то...», которые демонстрируют колоссальную разницу в темпах роста компьютерных технологий по сравнению с более традиционными областями техники. Естественно, что в случае необходимости конкретной оценки темпов роста и их прогнозирования, необходимы существенно более точные данные о темпах развития, которые позволили бы с достаточной степенью точности сравнивать, оценивать и прогнозировать прогресс в различных отраслях техники. При этом представленные в работе [1] данные и зависимости, касающиеся в первую очередь компьютерных технологий, целесообразно рассматривать в качестве основы

для сравнительного анализа ввиду их достаточной детальности, изученности и особого их значения, так как они характеризуют наиболее интенсивно развивающуюся на сегодня отрасль техники.

Другими словами, обобщая закон Мура применительно не только к компьютерными технологиями, но и ко всем отраслям техники и технологий, необходимо получить максимально общее и универсальное средство оценки технического прогресса во всех его проявлениях, что и является целью данной статьи.

Техносфера и ноосфера

Понятия техносфера и ноосфера сформировались на протяжении XX века благодаря преимущественно трудам А.Е. Ферсмана [16 – 17] и В.И. Вернадского [18 – 20]. Термином «техноценоз» академик А.Е. Ферсман еще в начале в 20-х годов XX столетия обозначил среду обитания, которую формирует человек, используя разум и пользуясь искусственными орудиями труда [16]. В дальнейшем, к началу 30-х годов, в рамках исследований по геохимии техногенеза, который он определял как совокупность химических и технических процессов, производимых деятельностью человека, им были получены некоторые сравнительные оценки технического прогресса, выраженные в росте ежегодного потребления различных полезных ископаемых за столетний период (с

1800 года по 1900 год). Он, в частности, отмечает, что объем добычи многих металлов вырос с чисел с тремя нулями до чисел с 6-ю нулями (в тоннах), т.е. в тысячу раз за столетие. Проанализировав рост ежегодного потребления различных металлов за 100-летний период, А.Е. Ферсман выделил 4 варианта роста: максимальный (в 200 – 1000 раз – алюминий, медь и др.), быстрый (в среднем в 50 – 60 раз – железо, никель и др.), медленный (в среднем в 15 – 40 раз – свинец и др.) и задержанный (с темпами роста менее чем на порядок за 100 лет – золото и др.) [17, с. 717].

Определение темпов роста потребления в совокупности с оценкой общих запасов полезных ископаемых позволило сформировать целый ряд прогнозов. Например, был определен первый предел роста, обусловленный исчерпанием разрабатываемых на начало 30-х годов месторождений (60 лет для железа, 75 лет для угля и других углеродов), и второй предел, определенный исходя из исчерпания всех запасов ископаемых, находящихся в верхнем доступном для добычи двухкилометровом слое земной коры (чуть более 400-т лет для железа и 200 лет для угля) [17, с. 733]. Следует отметить, что современные оценки предстоящих возможностей добычи полезных ископаемых несущественно отличаются от оценок полученных А.Е. Ферсманом. Фактически, это была одна из первых попыток оценить динамику того, что позднее назовут «техносферой» и сделать на этой основе некоторые прогнозы.

Учитель А.Е. Ферсмана академик В.И. Вернадский пошел еще дальше и к середине 40-х годов сформулировал концепцию постепенного перехода человечества в ходе научного и технического прогресса к стадии ноосферы – сферы Разума [18 – 20].

В настоящее время концепция развития цивилизации выглядит примерно следующим образом: с появлением жизни на Земле и ее распространением практически по всей земной поверхности миллиарды лет назад сформировалась биосфера, которая с появлением человека начала все интенсивней подвергаться освоению и воздействию с его стороны, что привело к формированию на протяжении последних тысячелетий техносферы. На протяжении последнего столетия по мере освоения электричества начала формироваться своего рода нервная система техносферы, процесс становления которой резко ускорился с середины XX века в связи с появлением компьютерных технологий. К рубежу тысячелетий фактически сформировался первый вариант технического воплощения концепции ноосферы и в виде современной инфраструктуры Интернет. Точнее, эту техническую

составляющую ноосферы, являющуюся одновременно нервной системой и «разумной» составляющей техносферы, целесообразно обозначить как ноотехносферу, системодинамика развития которой была рассмотрена в работе [1].

В целом весь процесс развития от формирования биосферы и до становления ноосферы представляется единым и подчиняющимся некоторым общим закономерностям. Это вполне согласуется с идеями универсального эволюционизма и, в частности, с гипотезой академика Моисеева Н.Н. о Суперсистеме, суть которой можно свести к утверждению, что вся Вселенная представляет собой некую единую развивающуюся взаимосвязанную систему [21 – 23], динамика развития которой определяется единой системой закономерностей. К этому склоняется все большее количество исследователей (см., например, работу [24]).

Интерпретируя системодинамику как науку о закономерностях процессов развития и изменения сложных систем во времени [25 – 28] и рассматривая техносферу как единую сложную систему, частью которой является ноотехносфера, определим некоторые из наиболее общих закономерностей, описывающих и/или определяющих системодинамику техносферы.

Периодическая составляющая

Если рассматривать столетние и более длительные интервалы времен, то в общем случае системодинамика техносферы определяется сочетанием периодических и экспоненциальных процессов развития.

Периодическая составляющая – это в первую очередь волны Кондратьева или К-волны [29 – 32], исследование которых применительно к циклам экономической конъюнктуры было начато Н.Д. Кондратьевым практически одновременно с исследованиями А.Е. Ферсмана по динамике техносферы.

В последующем было выявлено, что влияние К-волн носит существенно более универсальный характер, чем представлялось в начальный период исследований. При этом было высказано предположение, что именно волны Кондратьева являются одним из наиболее значимых факторов, определяющих динамику ноосферы, в связи с чем предложено рассматривать их как частный случай нооритмов, спецификой которых является привязка к фиксированной 50-летней периодичности самих волн и к 500-летнему периоду изменения их амплитуды [11 – 15].

Как показывает анализ большого массива исторических данных самого различного характера, именно такая достаточно простая

модель наиболее адекватно описывает динамику длинных волн применительно к самым различным областям человеческой деятельности, в том числе применительно к динамике технического прогресса.

На рисунке 1 представлена своеобразная модель периодической составляющей системодинамики техносферы в виде последовательности К-волн (K_1, \dots, K_6) с возрастающей амплитудой, что приводит на гребне 5-й волны (на рубеже тысячелетий в ходе информационно-компьютерной революции) к переходу техносферы на качественно новый уровень, определяемый формированием глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры. В соответствии с данной моделью в последующие столетия предполагается некоторое затухание амплитуды К-волн, а затем – новая «раскачка» для перехода на следующий качественный уровень.

Детальный анализ показывает, что наиболее простой из достаточно адекватных реальности моделей такого рода является модель, основанная на концепции нооритмов [11 – 15]. В соответствии с этой моделью период К-волн принимается точно соответствующим 50-ти годам, а период изменения их амплитуды составляет ровно 500 лет. Как показывает анализ многочисленных эмпирических данных для отдельно взятых периодов наблюдаются некоторые отклонения, но на больших промежутках времени, соизмеримых с продолжительностью всей истории цивилизации, такие округленные значения являются вполне приемлемыми и, как представляется, наиболее адекватными. Этот факт можно назвать парадоксом круглых чисел, который может быть поставлен в один ряд с парадоксом антропности [33] и может найти свое объяснение в контексте идей, ассоциируемых с космоантропным принципом [34].

Рассмотрим основные особенности данной модели применительно к 2-м столетиям эпохи индустриальных революций (рис. 1).

Во-первых, отметим, что в периоды положительных полуволн происходит интенсификация созидательных процессов, определяющих развитие техносферы. Эти периоды принято называть первой промышленной революцией (ПР1), второй промышленной революцией (ПР2), научно-технической революцией (НТР), информационно-компьютерной революцией (ИКР). Предстоящая 6-я К-волна будет, скорее всего, революцией нарастающей интеллектуализации окружающей среды (ноо-составляющая), развития «высоких» и «тонких» биотехнологий (био-составляющая) и тотального освоения наномасштабов (нано-составляющая).

В целом ее можно будет, по всей видимости, назвать НооБиоНано или НБН-революцией.

Во-вторых, всю эпоху революционных изменений в технике, начавшуюся на рубеже XVII и XIX столетий, можно рассматривать как смену различных поколений индустриальных по своей сути революций (ИР): 1.X – революции пара, 2.X – революции электричества и двигателей внутреннего сгорания, 3.X – информационно-компьютерные революции.

В-третьих, по мере нарастания амплитуды К-волн, количество и интенсивность экспоненциальных процессов роста различных составляющих техносферы также заметно возрастают.

В-четвертых, отрицательные полупериоды К-волн могут рассматриваться как переходные, когда развитие в целом не останавливается, но существенно замедляется на фоне значительного переосмысления происходящих процессов, сопровождаемого зачастую сменой парадигм, приоритетов и ценностей.

Следует отметить, что аналогичная динамика наблюдается и для предыдущей эпохи нарастания амплитуды К-волн – эпохи Возрождения (рис. 2). В истории этого периода в развитии цивилизации достаточно отчетливо прослеживаются первая и вторая волна Проторенессанса (ПР1 и ПР2 – соответственно В1.0 и В1.5), первая и вторая волна раннего Возрождения (РВ1 и РВ2 – соответственно В2.0 и В2.5), волна Высокого Возрождения (ВВ – В3.0) и волна Позднего Возрождения (ПВ).

В качестве символа первой волны Проторенессанса (ПР1) на рисунке 2 представлен кафедральный собор Флоренции Санта-Мария-дель-Фьоре, строительство которого началось в 1296 году. После завершения постройки в 1434 году он оставался самым большим в Европе (в нём может разместиться примерно 30 тысяч человек) вплоть до завершения строительства в XVII веке собора Святого Петра в Ватикане вместимостью около 60-ти тысяч человек. Санта-Мария-дель-Фьоре можно в определенной степени считать и символом всей эпохи Возрождения.

Символом второй волны Проторенессанса (ПР2) стало в первую очередь распространение в Европе огнестрельного оружия, в корне изменившего методы ведения войны и положившего начало столетиям артиллерийской гонки вооружений. Считается, что начало этому было положено в 1346 году в ходе Столетней войны в битве при Креси, где немецкий монах и алхимик Бертольд Шварц, которому позднее приписали изобретение пороха, руководил первой полевой батареей артиллерии английской армии, состоящей из трех орудий. К

1350 г. огнестрельное оружие распространилось во всех странах Европы.

Одними из главных символов раннего Возрождения (РВ) вполне могут быть бумага и книгопечатание. Бумага стала относительно легкодоступной в Европе около 1400 года, в результате чего получили широкое распространение небольшие гравюры на религиозные темы и игральные карты, напечатанные на бумаге. Логичным продолжением этого процесса стало создание Иоганном Гутенбергом в середине 1440-х годов способа книгопечатания подвижными литерами, оказавшего колоссальное влияние не только на европейскую культуру, но и на всемирную историю.

Самым ярким символом Высокого Возрождения (ВВ) безусловно является Леонардо да Винчи с его многочисленными изобретениями и произведениями. С этой же волной связано и начало эпохи великих географических открытий, отсчет которой принято вести с 1492 года в связи с обнаружением экспедицией Христофора Колумба американского континента.

В целом следует отметить, что подобная периодическая динамика прослеживается и для других периодов истории цивилизации, что частично рассмотрено в работе [15].

Экспоненциальная составляющая

Как будет показано далее, экспоненциальные процессы развития техники и технологий имели место на самых различных этапах развития цивилизации. Наиболее ярко и интенсивно они проявились в ходе информационно-компьютерной революции (ИКР), что детально рассмотрено в работе [1]. В предыдущие периоды количество наблюдаемых процессов такого рода было существенно меньше. При этом интенсивность экспоненциального роста также была намного ниже. Другими словами, скорость технического прогресса заметно нарастает в процессе развития цивилизации, что особенно заметно в положительные полупериоды К-волн.

В работе [1] для обеспечения количественной оценки темпов экспоненциального роста было предложено обобщение закона Мура, предполагающее 6 вариантов роста. С учетом разнообразия процессов технического прогресса на протяжении всей истории цивилизации целесообразно на базе реализованного в работе [1] подхода получить дальнейшее обобщение закона Мура, позволяющее описывать весь спектр возможной динамики экспоненциальных процессов развития.

Для этого, во-первых, кроме базового периода роста в 20 лет, характерного для ИКР, следует рассматривать и более длительные базовые периоды, отличающиеся на один и более десятичных порядков от наиболее короткого базового периода (табл. 1).

Во-вторых, будем предполагать, что основной оценкой скорости технического прогресса во всех случаях будет количество десятичных порядков, на которое возрастает (или в некоторых случаях уменьшается) значение того или иного показателя в ходе развития техники и технологий. При этом соответствующую скорость роста целесообразно обозначить через S (начальный символ англоязычного слова speed, означающего скорость). Такое обозначение представляется целесообразным также и потому, что большинство процессов развития в технике могут быть описаны различными S -образными кривыми [35], начальная часть которых (примерно первая половина или несколько более) представляет из себя экспоненциальную или квазиэкспоненциальную кривую).

Для различных скоростей экспоненциального роста обозначение в целом будет иметь вид SK , где K – это численное обозначение скорости роста, равное количеству десятичных порядков роста за базовый период. Это, естественно, отнюдь не предполагает, что соответствующий процесс роста будет длиться на протяжении всего базового периода. Чаще всего рост носит экспоненциальный характер на протяжении всего нескольких десятилетий. Но, как показывает практика, для сравнительного анализа привязка к базовым периодам является достаточно удобной и эффективной.

При рассмотрении технического прогресса можно ограничиться максимальным базовым периодом в 2 тысячи лет, т.к. за пределами данного периода процессы технического развития либо вообще плохо прослеживаются, либо просто недостаточно документированы для более-менее достоверных количественных оценок. В этом случае в обозначении K будет использоваться 3 десятичных знака. Нули справа в обозначении K в большинстве случаев могут отбрасываться.

В общем случае будем считать, что n – количество десятичных знаков (цифр), составляющих K . Тогда K показывает **на сколько десятичных порядков** вырастет соответствующее значение рассматриваемого параметра роста за $2 \cdot 10^n$ лет.

Символом S без цифровых коэффициентов будем обозначать переменную, принимающую значение K . Для того, чтобы значение S было корректным для различных n для определения

его целесообразно использовать следующую формулу:

$$S = 10 \cdot 0, K.$$

Это, например, означает что для $S1 S=1$, для $S05 S=0,5$, для $S225 S=2,25$.

Минимальной единицей времени при расчетах будем считать один год, так в пределах года даже в случае самых быстрых темпов технического прогресса существенных изменений либо не наблюдается, либо они лежат в пределах возможных отклонений. Тогда для вычисления экспоненциально растущих значений P_i для любого i -го года ($i > 0$) при известном начальном значении P_0 может использоваться зависимость, аналогичная той, которая была приведена в работе [1] для обобщенного закона Мура:

$$P_i = P_0 \cdot 2^{S \cdot (Y_i - Y_0) / 6}, \quad (1)$$

где
 Y_0 – начальный год действия соответствующей закономерности;

Y_i – текущий год действия соответствующей закономерности;

Использование такой формы зависимости, описывающей закономерности роста, позволяет обеспечить совместимость системы обозначений, используемой в работе [1], с обозначениями, описанными выше. При этом для шести вариантов закономерностей обобщенного закона Мура от $L1$ до $L6$ будем использовать, соответственно, обозначения от $S1$ до $S6$.

В таблице 1 приведены ежегодные коэффициенты роста sK для различных значений K , выраженных как X , $0X$ и $00X$ для 3-х вариантов базовых периодов.

В общем случае при произвольных значениях K таблица 1 может использоваться для определения значения K в соответствии со следующим алгоритмом:

Шаг 1: Определяем, за какой период Y (в годах) происходит рост в Z раз.

Шаг 2: Извлекаем корень степени Y из Z .

Шаг 3: В таблице 1 в колонке «20 лет» находим ближайшее значение, не превышающее полученное на шаге 2. Соответствующий номер строки X будет первым десятичным знаком значения K . В случае полного совпадения значений на данном шаге алгоритм завершается.

Шаг 4: Определяем, во сколько раз значение, полученное на шаге 2 отличается от значения, определенного на шаге 3.

Шаг 5: В таблице 1 в колонке «200 лет» находим ближайшее значение, не превышающее полученное на шаге 4. Соответствующий номер строки X будет вторым десятичным знаком значения K . В случае полного совпадения значений на данном шаге алгоритм завершается.

Шаг 6: Определяем, во сколько раз значение, полученное на шаге 4 отличается от значения, определенного на шаге 5.

Шаг 7: В таблице 1 в колонке «2000 лет» находим значение, ближайшее к полученному на шаге 6. Соответствующий номер строки X будет третьим десятичным знаком значения K . На этом алгоритм завершается.

Естественно, что альтернативой значениям S могут быть просто коэффициенты ежегодного роста, но они не дают достаточно наглядного представления о реальных многолетних темпах технического прогресса.

Примеры из разных эпох

Следует отметить, что уже в эпоху Возрождения имели место отдельные процессы, темпы которых были соизмеримы с медленными вариантами обобщенного закона Мура. Например, инициированная Генрихом Мореплавателем морская экспансия Португалии на протяжении почти всего XV века проходила с интенсивностью $S1$ (рис. 1) и привела в конечном итоге к тому, что впоследствии было названо Эпохой Великих Географических Открытий [36].

Менее интенсивным (на порядок), но существенно более длительным (фактически с VI века н.э.) был процесс распространения книг в Европе [37], который в целом развивался со средней скоростью $S01$ (рис. 4). Но в XIII веке темпы роста заметно замедлились ($S005$) из-за нарастания кризиса рукописного размножения книг, для существенного ускорения которого все имеющиеся возможности были уже исчерпаны. Преодолеть данный кризис удалось только в XV веке путем интенсивного распространения книгопечатания. При этом темпы роста на протяжении второй половины XV века и первой половины XVI века были примерно в 2 раза выше средних за тысячелетие. С XVII века интенсивность роста опять вернулась к среднему значению $S01$.

После второй мировой войны началась научно-техническая революция (НТР), сопровождаемая тем, что впоследствии назвали информационным взрывом. В ходе этого процесса скорость роста публикаций вышла на уровень $S04$ (рис. 5).

Со скоростью $S02$ с 1850 года растет ежегодное глобальное потребление первичной энергии (рис. 6). Соотношение используемых источников энергии при этом существенно меняется со временем, но общая скорость роста остается примерно постоянной.

Как показано на рис. 7, в таком же темпе $S02$ в эпоху индустриальных революций росли и максимально достижимые скорости (на базе различных видов транспорта) [40].

XIX век может с полным основанием считаться веком пара, особенно, вторая его половина. В разных сферах применения при этом глобальный рост суммарной мощности паровых двигателей происходил довольно неравномерно (рис. 8 [41]): при общей скорости роста $S06$ существенно более быстрым был процесс распространения паровых двигателей на флоте ($S08$) и заметно более медленным на железной дороге ($S04$) и в производственной сфере ($S03$).

Вторая половина XIX века явилась также эпохой интенсивного распространения железнодорожного транспорта. Рост протяженности железных дорог в мире в целом происходил в этот период со скоростью $S04$ (рис. 9). Но в отдельно взятых странах эти темпы были намного выше. Так, например, в США периодом наиболее интенсивного роста (со скоростью $S4!$) стало десятилетие с 1830 по 1840 год. Далее, в период положительной полуволны $K2$, рост происходил со скоростью $S1$ и оставался стабильным на протяжении 20-ти лет. В последующие несколько десятилетий темпы развития железнодорожного транспорта в США стали еще более низкими, но по-прежнему оставались на уровне выше среднемировых ($S05$).

В XX веке максимальные темпы роста в демонстрировала авиация, с прогрессом которой чаще всего сравнивали прогресс в перехвативших инициативу к концу XX века компьютерных технологиях. Сравнения такого рода целесообразно рассмотреть несколько детальнее.

Закон Мура и развитие авиации

Первые сравнения темпов развития компьютерных систем со скоростью развития в других отраслях техники начали появляться еще в 70-е годы XX века: «Ни одно человеческое изобретение не демонстрировало такую скорость развития. В последующие годы писатели будут искать аналогии. Одно популярное сравнение в 1970-х пришло из автомобильной индустрии: дескать, если бы Детройт придерживался Закона Мура, автомобили бы ездили со скоростью 500 миль в час и расходовали бы галлон топлива на 200 миль... и – это стоило бы 1,50 доллара» [43, с. 107].

В 1983 году одна из первых статей о персональных компьютерах начиналась уже сравнением темпов авиационного и компьютерного прогресса: «Если бы за последние 25 лет авиационная промышленность развивалась столь же стремительно, как и вычислительная техника, то Боинг-767 можно было бы приобрести сегодня за 500 долл. и облететь на нем земной шар за 20 мин, израсходовав при этом 19 л горючего» [44].

В 1998 году по-прежнему актуальным было аналогичное сравнение, но с весьма существенной корректировкой по расходу горючего: «Специалисты в области компьютерных технологий любят иногда в шутку сравнивать темпы компьютерного развития с тем, что происходит в других областях науки и техники. При этом получается, например, что если бы авиация развивалась такими же темпами, то сегодня любой желающий мог бы в обеденный перерыв совершить кругосветное путешествие на персональном самолете, потратив при этом не более наперстка горючего» [45].

В 2007 году на Intel Developer Forum один из руководителей фирмы Интел озвучил следующее сравнение: «Если бы авиация развивалась такими же темпами, как и индустрия микропроцессоров, то современный аналог «Боинга-747», выпущенного в том же году, что и процессор Intel 4004, сегодня должен был бы брать на борт 118 миллионов человек и производить их посадку и высадку (всех 118 миллионов!) всего за 12 миллисекунд. А производительность «Боинга» в целом должна была вырасти в 200 тысяч раз!» [46].

Спустя десятилетие сравнения от Интел стали еще более впечатляющими: «Если бы эффективность автомобильного топлива увеличивалась такими же темпами, то **на одной заправке можно было бы ездить всю жизнь без какой-либо дозаправки...** А перелет из Новой Зеландии в Нью-Йорк завершался бы **за время, которое требуется для того, чтобы застегнуть ремень безопасности в самолете...**» [47].

В наше время в дополнение к автомобильным и авиационным аналогиям появились и космические. Так, например, полет на Луну в 1969 году стоил \$25 млрд. и занял 3 дня. Если бы его цена и длительность снижались со скоростью закона Мура, то сейчас стоимость программы была бы сопоставима со стоимостью небольшого частного самолета, а само путешествие заняло бы всего 1 минуту [47].

В компьютерных технологиях темпы роста, определяемые обобщенным законом Мура, лежат в диапазоне от $S1$ до $S6$ [1]. В период НТР и предшествующие ей десятилетия производительность транспортной авиации росла в темпах, соизмеримых с медленными вариантами закона Мура ($S11$, $S12$ на рис. 10). Рост скоростей в авиации был заметно более медленным: $S057$ – для боевой авиации, $S043$ – для транспортной авиации (рис. 11). Взлетный вес самолетов рос в довольно высоком темпе $S13$ до начала 1940-х годов, но затем резко замедлился до $S025$ (рис. 12). Одной из причин этого стали не только условия военного

времени, но и фундаментальные ограничения поршневых авиационных двигателей, которые также оказали существенное влияние на замедление роста. Переход на реактивные двигатели обеспечил возможность дальнейшего устойчивого прогресса, но уже в новом замедленном режиме.

Аналогичные явления наблюдаются и в других областях техники. Например, интенсивный экспоненциальный рост (со скоростью S3) частоты синхронизации микропроцессоров резко замедлился (до S03) к 2005 году в связи с фундаментальными ограничениями, связанными с недостаточными возможностями теплоотвода по мере нарастания плотности энергии в микропроцессорах (рис. 13) [1].

Еще ряд характерных примеров

Далее рассматриваются характерные примеры количественной оценки технического прогресса в некоторых других областях.

Процесс расширения применения искусственных источников света, начатый на гребне волны K2 в середине XX века, сопровождался (и стимулировался!) ростом их световой эффективности со средней скоростью S05 (рис. 14). При этом на гребне волны K3 на рубеже XIX и XX столетий наблюдалось кратковременное ускорение развития вплоть до S10. Однако в целом по итогам волны K4 повышение световой эффективности искусственных источников света происходило со средней скоростью S05.

Часы, как один из первых автоматов для практически целей, к началу волны K1 в конце XVII века уже развивались в направлении повышения их точности со скоростью S024 (рис. 15, слева). Такие темпы роста точности сохранились фактически до XX века включительно.

К началу волны K3 в конце XIX века благодаря усилиям целого ряда изобретателей, самыми известными из которых являются Александр Белл и Томас Эдисон, началось широкое распространение телефонной связи. Рост числа телефонов (рис. 15, справа) при общей скорости роста S066 на протяжении столетия имеет относительно короткий период резкого ускорения S2 на рубеже XIX и XX столетий с последующим резким замедлением во второй половине XX века в связи с приближением ситуации насыщения: количество телефонных аппаратов стало приближаться к численности населения. В настоящее время развитие мобильной связи обеспечило на некоторый период дальнейший рост числа телефонов.

К концу XX века кроме голосовой связи стала активно развиваться цифровая связь, что нашло свое отражение, в частности, в росте пропускной способности кабельных модемов со скоростью S35 (рис. 16). Несколько более высокими темпами (S40) росла в этот период пропускная способность волоконно-оптических линий связи (рис. 17).

Интенсивный рост цифровых технологий, начиная со второй половины XX века [1], стал возможен на основе быстрого развития промышленности полупроводников. Одними из главных индикаторов этого развития стали такие показатели, как размеры кремниевых пластин для производства интегральных микросхем (рост со скоростью S05 – рис. 18) и размеры транзисторов (сокращение со скоростью S15 – рис. 18 на врезке слева вверху). Впечатляющим результатом этого развития стал стремительный рост глобального производства транзисторов в соответствии с закономерностью S3 (рис. 19): к настоящему времени в расчете на каждого живущего в мире человека ежесекундно (!) производятся миллиарды транзисторов!

Наиболее высокие темпы роста (S5) в современной техносфере на протяжении почти 3-х десятилетий, т.е. фактически всего периода информационно-компьютерной революции, наблюдаются в сфере роста производительности компьютерных систем различных классов (рис. 20). Не исключено, что в последующие несколько десятилетий будет наблюдаться некоторое снижение темпов роста и в данной сфере. Но главное заключается в том, что создан прецедент чрезвычайно высоких темпов роста на протяжении довольно продолжительного периода. Следует также отметить, что стремительное улучшение характеристик компьютерной техники и расширение масштабов ее использования создали основные предпосылки для качественного скачка в современной техносфере (и цивилизации в целом) на гребне волны K5 (рис. 1) в начале нового тысячелетия.

Заключение

Таким образом, системодинамика техносферы может рассматриваться как сочетание периодических (на основе волн Кондратьева) и экспоненциальных закономерностей роста. Экспоненциальную составляющую предложено количественно оценивать на базе универсального показателя скорости роста S, что позволяет наглядно сравнивать интенсивность процессов развития в различных областях техники с интенсивностью прогресса в компьютерных технологиях.

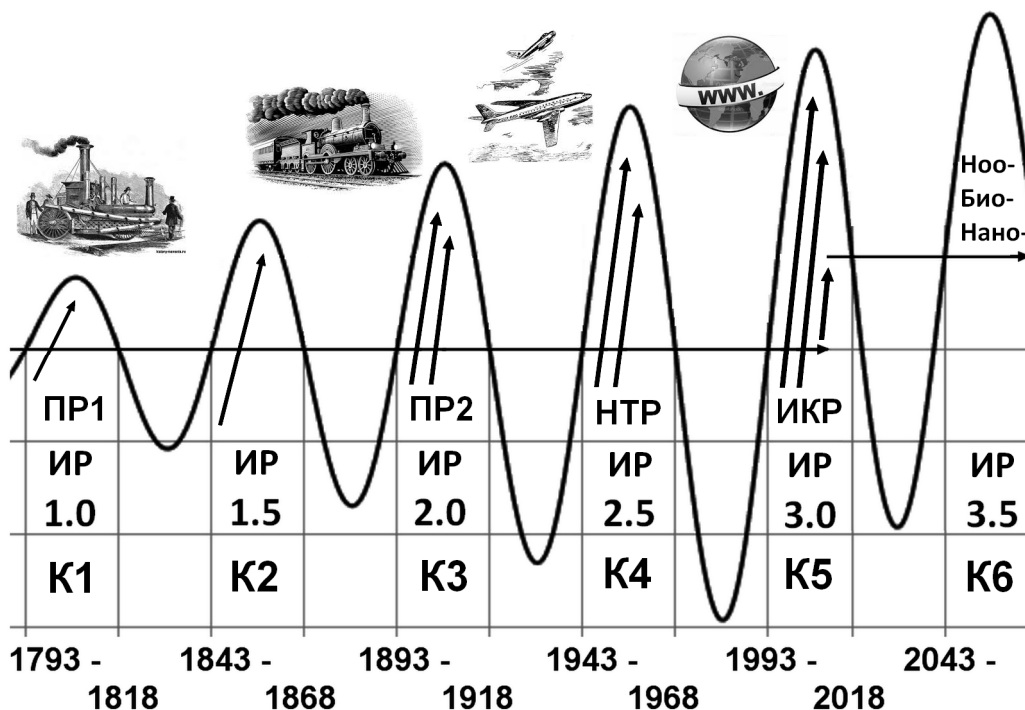


Рисунок 1. – Эпоха индустриальных революций (ИР): концептуальное представление системодинамики техносферы как последовательности К-волн (К1, ..., К6) с возрастающей амплитудой – своеобразной «раскачкой», обеспечивающей качественный скачок на гребне 5-й волны

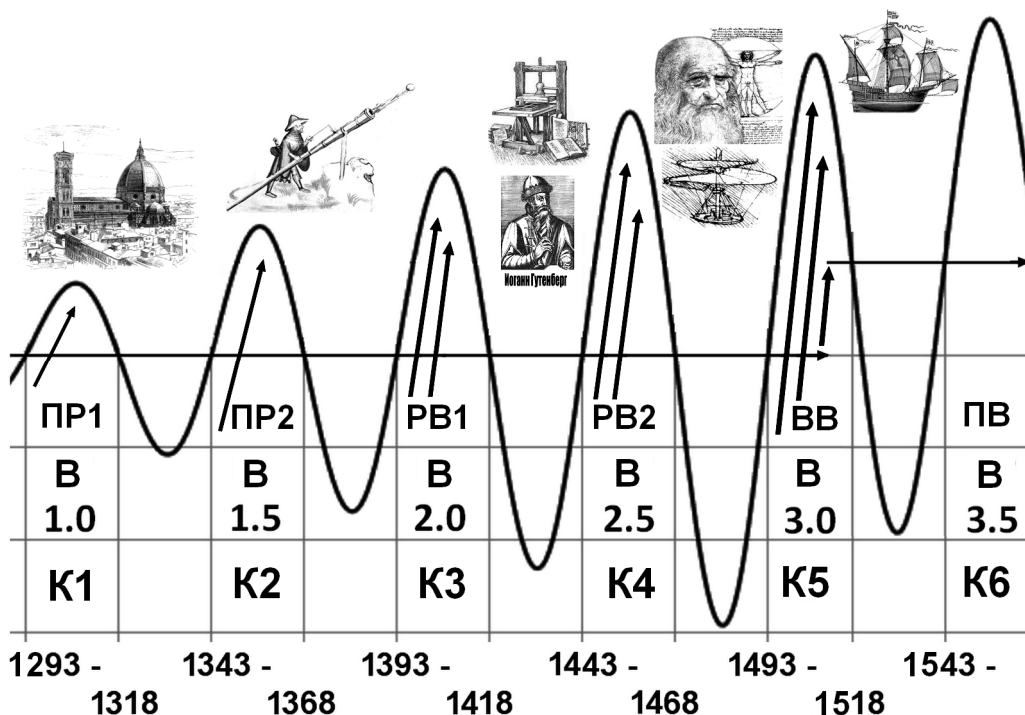


Рисунок 2. – Концептуальное представление системодинамики техносферы как последовательности К-волн (К1, ..., К6) с возрастающей амплитудой в эпоху Возрождения (В)

Таблица 1. –Коэффициенты роста, определяющие системодинамику техносферы

X	Коэффициенты роста за базовый период (20, 200, 2000 лет)	Ежегодные коэффициенты роста		
		20 лет: sX	200 лет: s0X	2000 лет: s00X
1	10	1,12	1,012	1,0012
2	100	1,26	1,023	1,0023
3	1 000	1,41	1,035	1,0035
4	10 000	1,58	1,047	1,0046
5	100 000	1,78	1,059	1,0058
6	1 000 000	2,00	1,072	1,0069
7	10 000 000	2,24	1,084	1,0081
8	100 000 000	2,51	1,096	1,0093
9	1 000 000 000	2,82	1,109	1,0104
10	10 000 000 000	3,16	1,122	1,0116

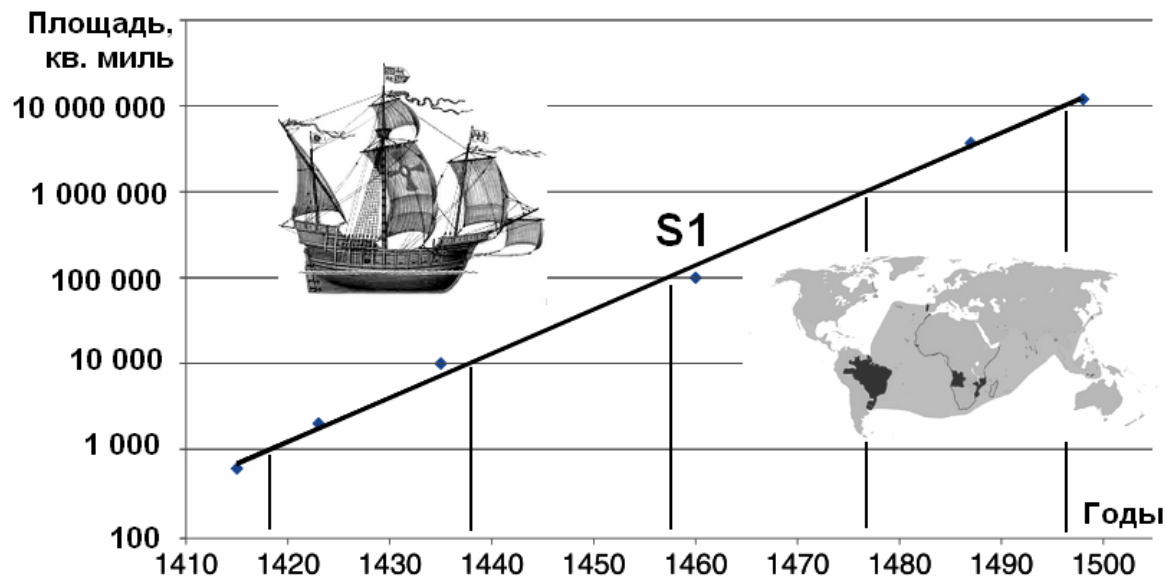


Рисунок 3. – Экспоненциальный рост площади земного шара, контролируемой Португалией в XV веке (по данным работы [36]) соответствует закономерности S1

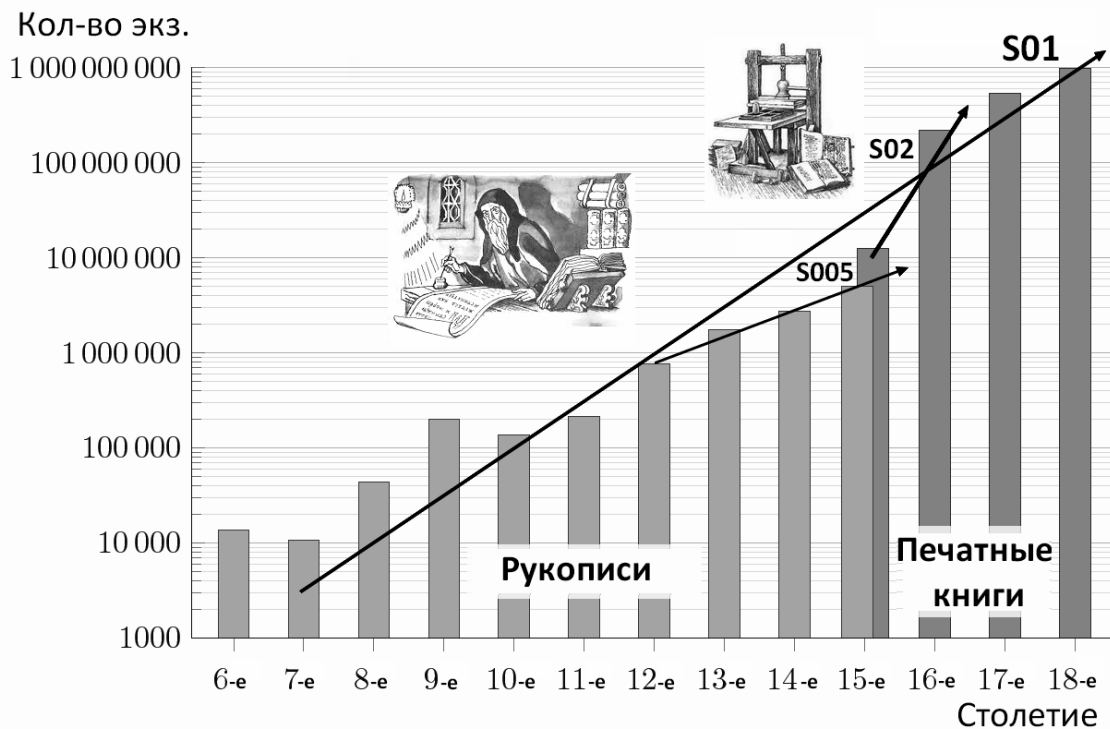


Рисунок 4. – Экспоненциальный рост европейского книгоиздания (по данным работы [37]) на протяжении более чем тысячелетия соответствует в целом закономерности S01 с относительно непродолжительными периодами заметного замедления до S005 (кризис рукописной книги в XIII-XV вв.) и ускорения до S02 (преодоление книжного кризиса путем начала книгопечатания в XV-XVI вв.)



Рисунок 5. – Рост ежегодного количества публикаций (в миллионах) в период после второй мировой войны (по данным работы [38]) соответствует закономерности S04

Первичная энергия (эксаджоулей в год)

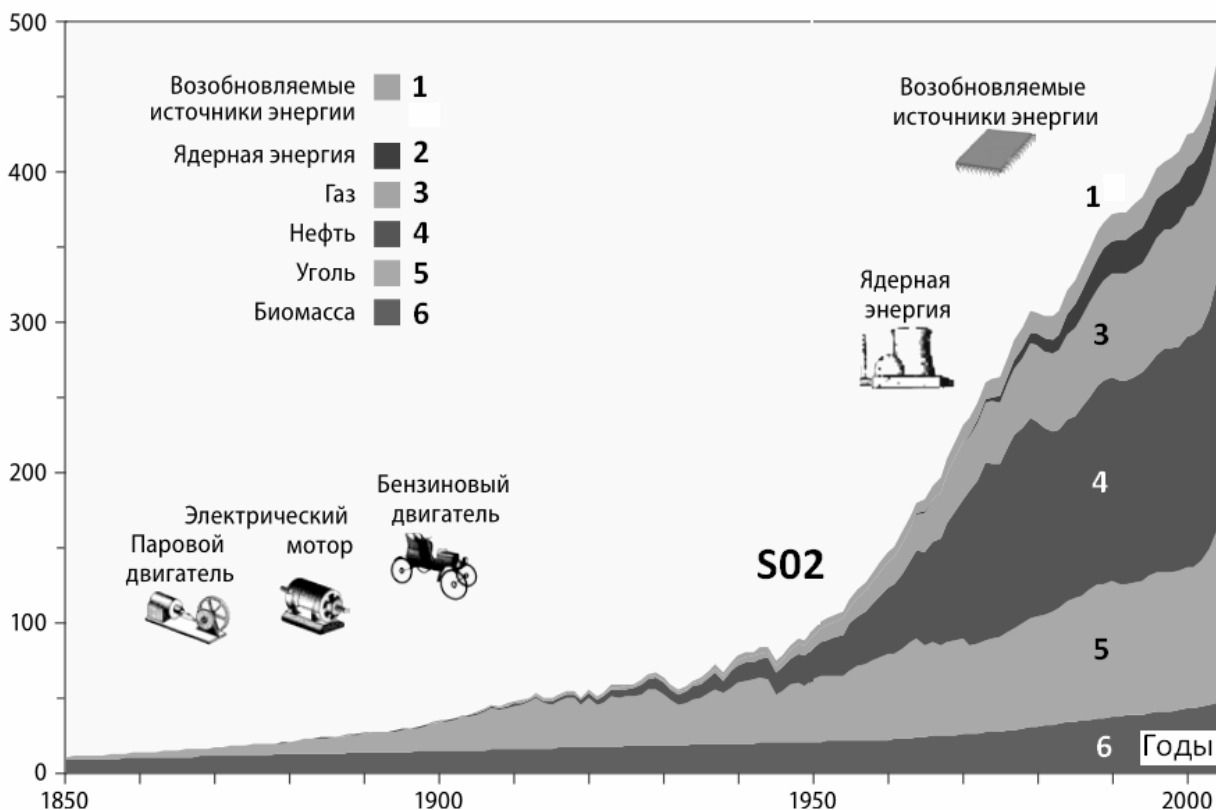


Рисунок 6. – Рост ежегодного глобального потребления первичной энергии (по данным работы [39]) соответствует в целом закономерности S02 (в эксаджоулях – 1 эксаджоуль равен 10¹⁸ джоулей и выделяется при сжигании 31,12 миллионов тонн условного топлива)

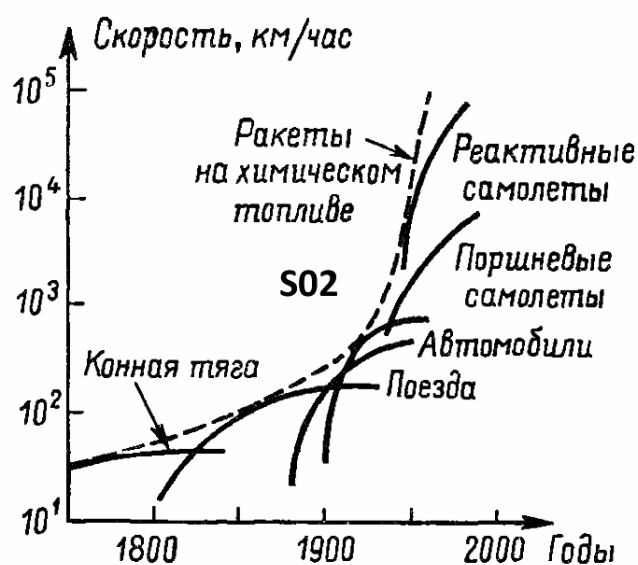


Рисунок 7. – Рост максимальных скоростей в эпоху индустриальных революций на базе различных видов транспорта [40, с. 246] соответствует закономерности S02

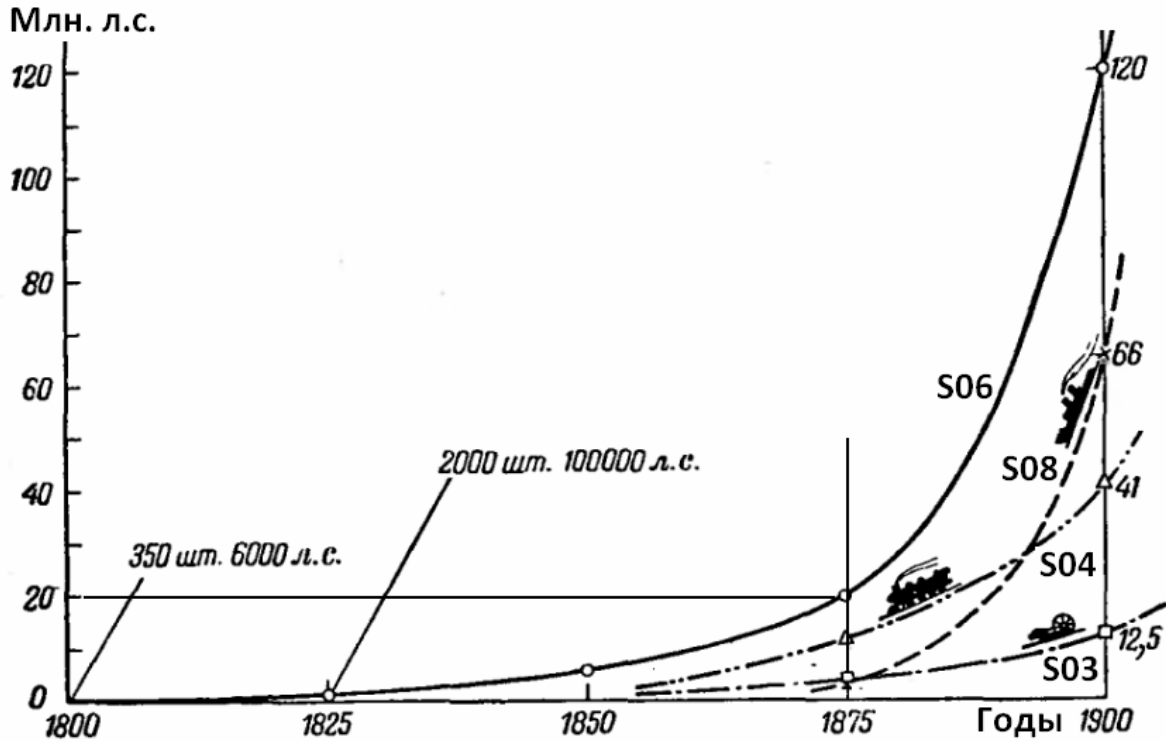


Рисунок 8. – Глобальный рост суммарной мощности паровых двигателей в XIX веке [41, с. 155]: темпы роста заметно отличаются для различных сфер применения (S03 – стационарные машины, S04 – паровозные, S08 – пароходные, S06 – суммарный рост)

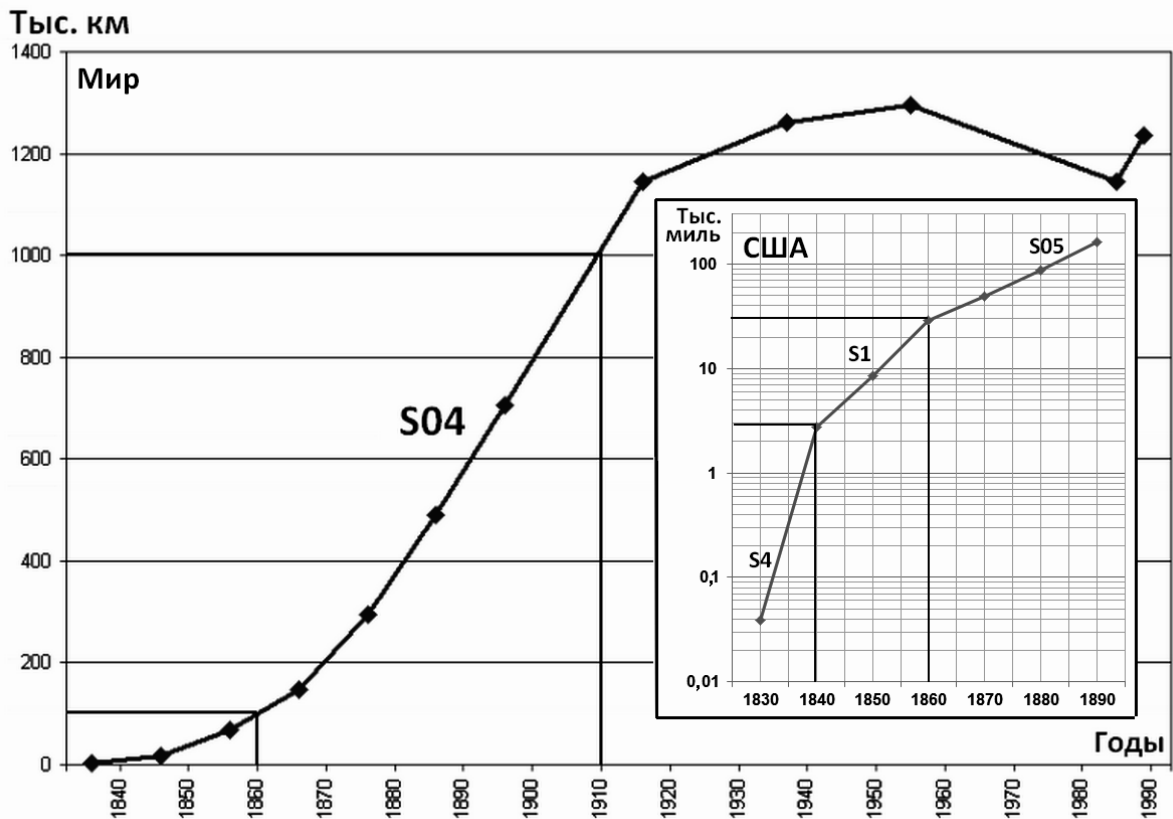


Рисунок 9. – Рост протяженности железных дорог в мире в целом, и в США в частности (по данным работы [42]): наиболее интенсивный глобальный рост (S04) имел место в период второй промышленной революции, но в США более высокие темпы роста (вплоть до S4) отмечались в предшествующие периоды

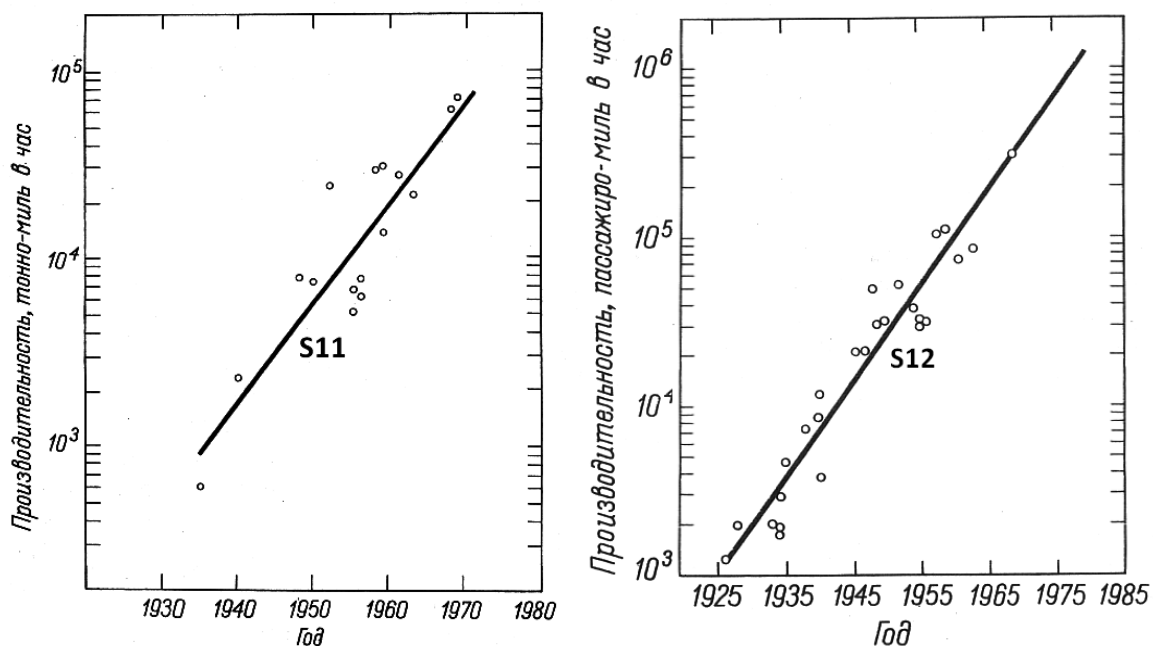


Рисунок 10. – Рост производительности транспортной авиации в XX веке (по данным работы [35, с. 142-143]): этот показатель в тонно-милях в час (слева) соответствует закономерности S11, в пассажиро-милях в час – закономерности S12

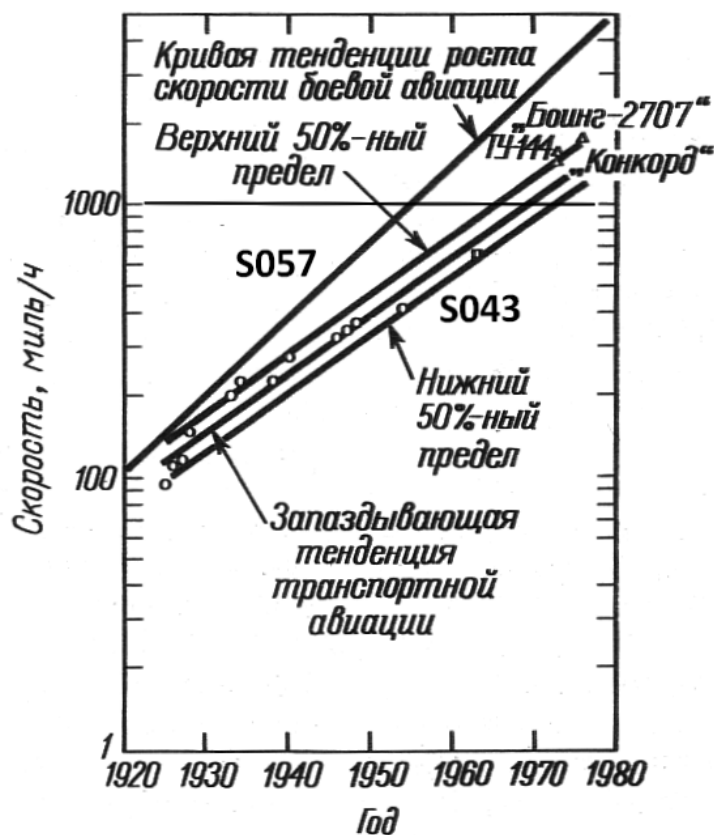


Рисунок 11. – Рост скоростей в авиации (по данным работы [35, с. 171]): S057 – для боевой авиации, S043 – для транспортной авиации

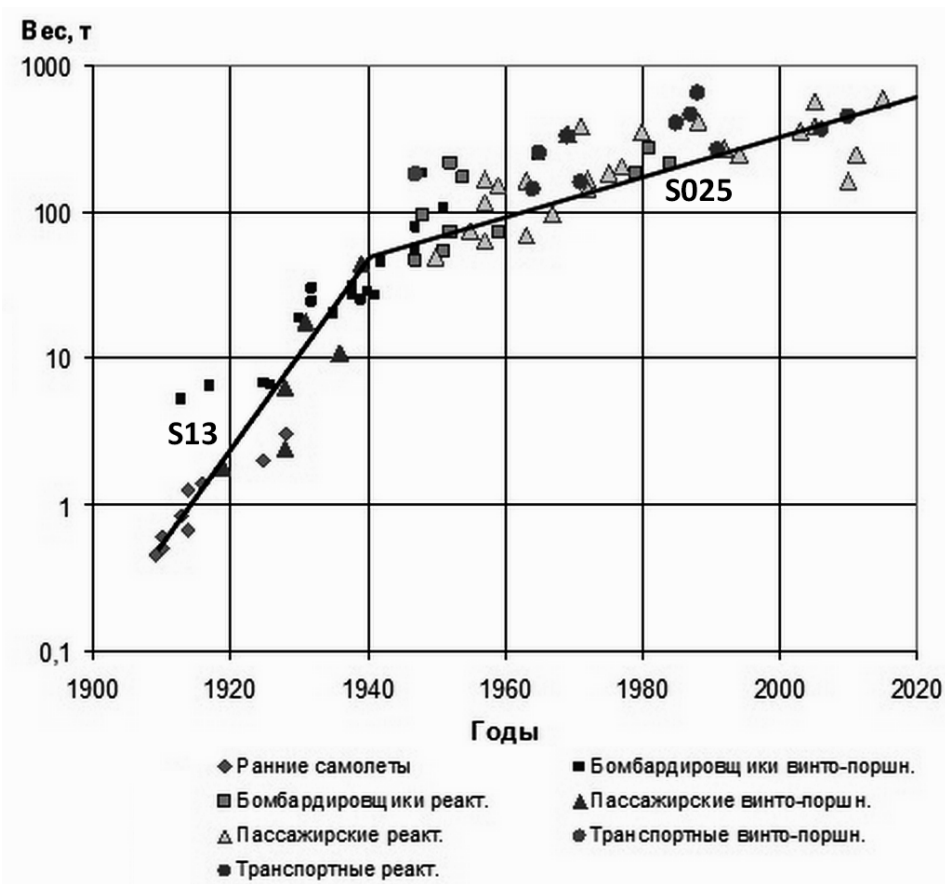


Рисунок 12. – Рост взлетного веса самолетов [48]: до начала 1940-х годов быстрый рост в соответствии с закономерностью S13, но затем темпы роста снижаются до S025

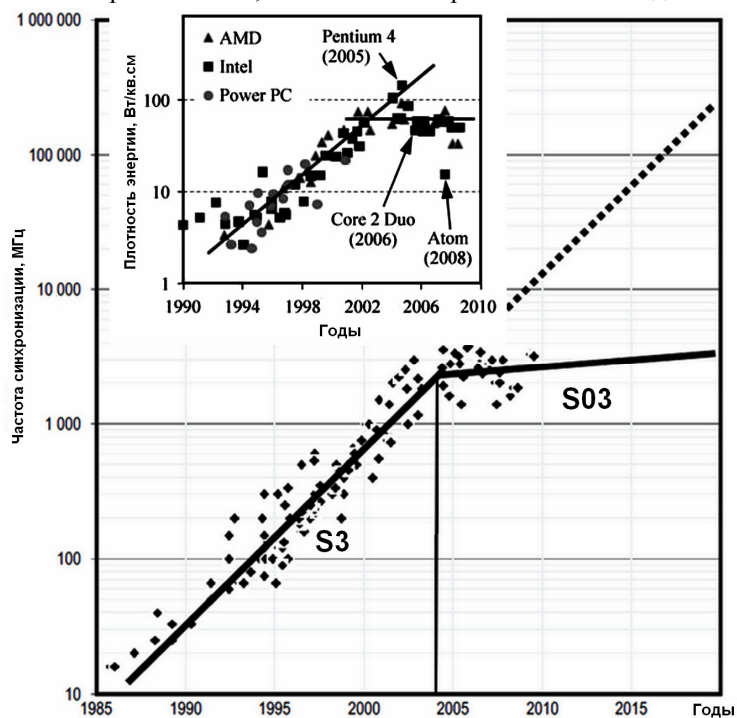


Рисунок 13. – Интенсивный экспоненциальный рост (со скоростью S3) частоты синхронизации микропроцессоров резко замедлился (до S03) к 2005 году, что позволило предотвратить катастрофическое нарастание плотности энергии в микропроцессорах (рисунок-врезка слева вверху)

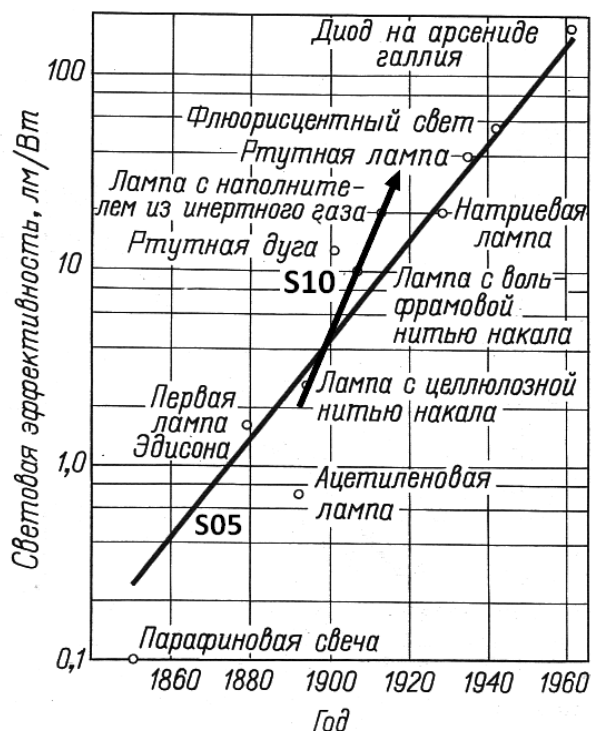


Рисунок 14. – Рост световой эффективности искусственных источников света [35, с. 145]: на фоне долговременной закономерности роста S05 в период второй промышленной революции наблюдалось стремительное расширение использования новых источников света и ускоренный рост их эффективности в соответствии с закономерностью S10

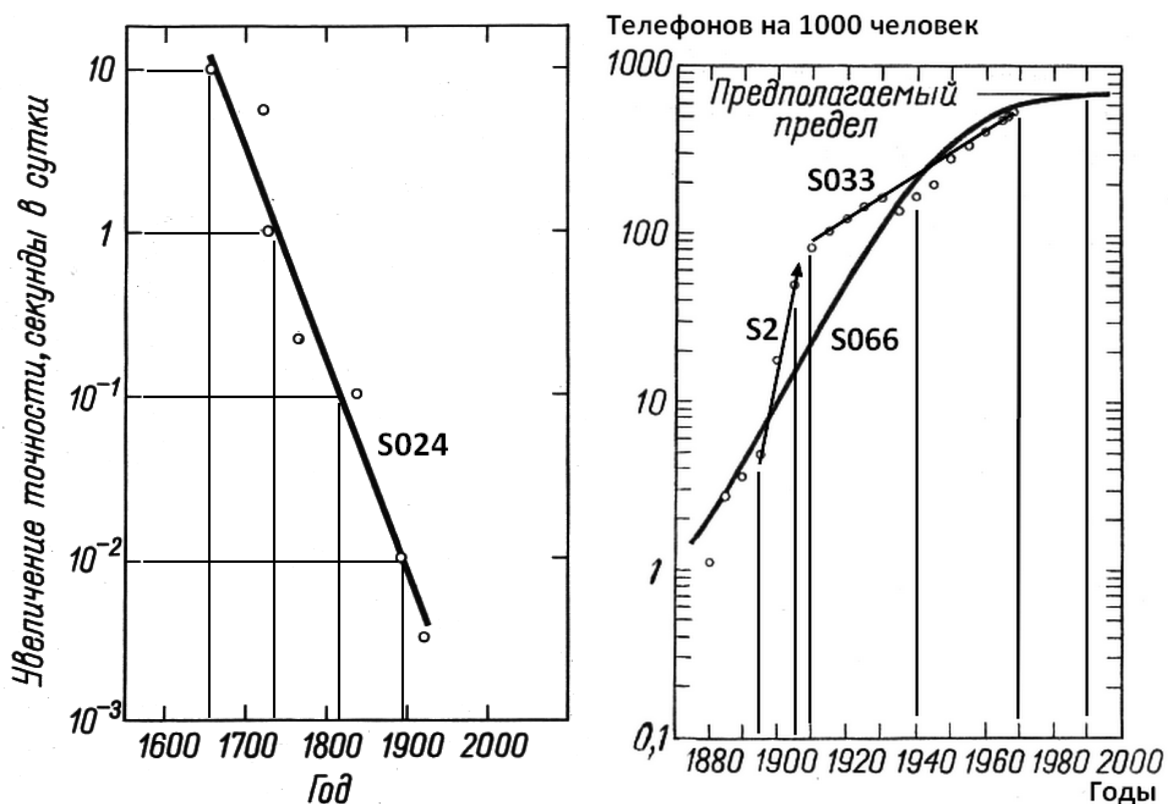


Рисунок 15. – Рост точности средств измерения времени, выраженный в ежесуточной погрешности в секундах (слева) [35, с. 296], на протяжении 3-х столетий соответствовал закономерности S024, а рост числа телефонов (справа) [35, с. 132] при общей скорости роста S066 на протяжении столетия имеет относительно короткий период резкого ускорения S2 на рубеже столетий с последующим резким замедлением

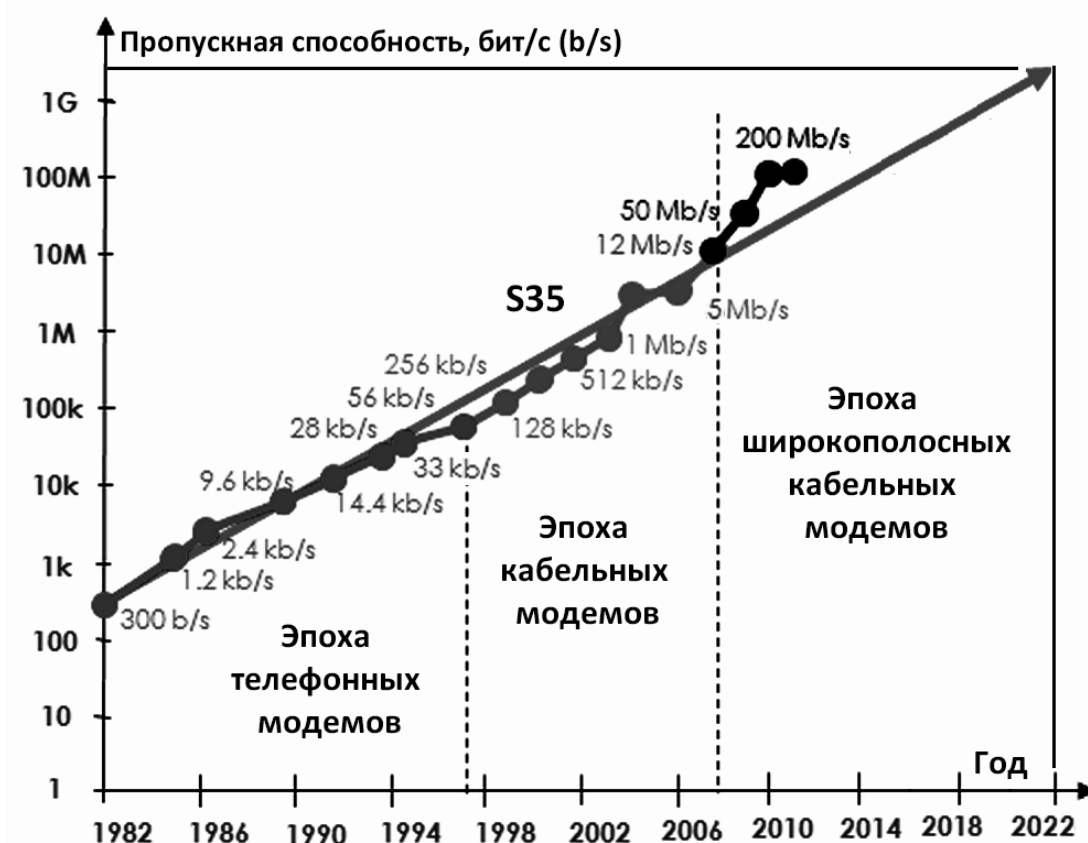


Рисунок 16. – Рост пропускной способности кабельных модемов (и три эпохи их развития) [49] в соответствии с закономерностью S35

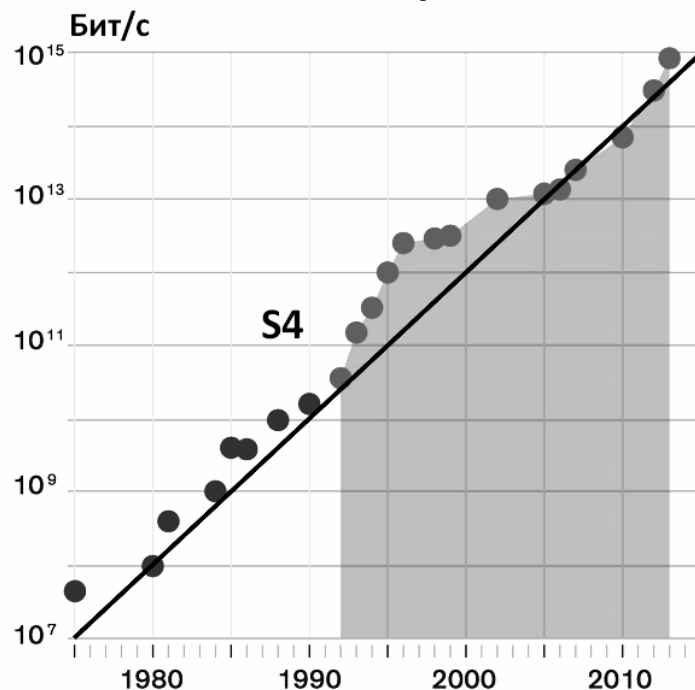


Рисунок 17. – Рост пропускной способности волоконно-оптических линий связи (так называемый закон Кека [50]) в соответствии с закономерностью S4

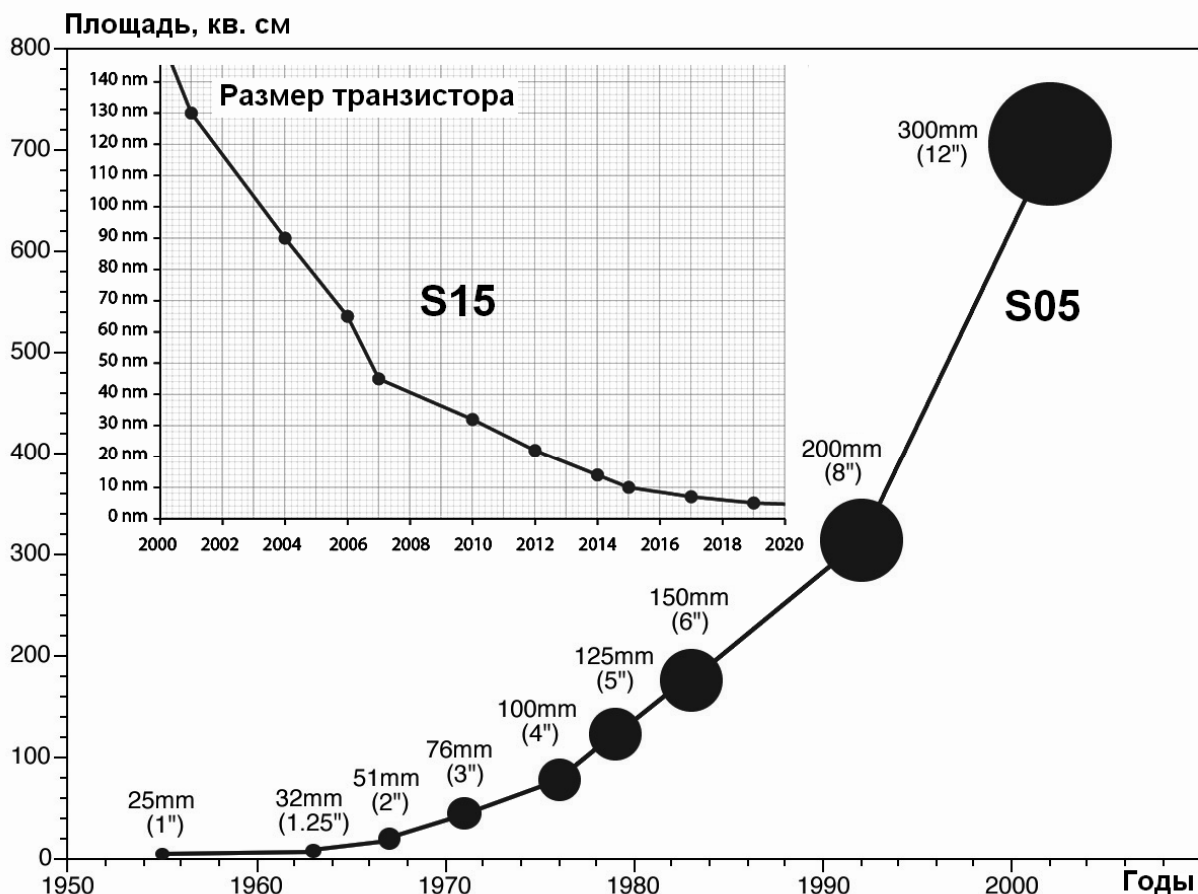


Рисунок 18. – Сокращение размеров транзисторов в соответствии с закономерностью S15 и рост размеров кремниевых пластин для производства интегральных микросхем в соответствии с закономерностью S05 в совокупности с постоянным расширением производственных мощностей определяют лавинообразный рост суммарного производства транзисторов в соответствии с закономерностью S3



Рисунок 19. – Рост глобального производства транзисторов в соответствии с закономерностью S3: к 2014 году в расчете на каждого живущего в мире человека ежесекундно производилось порядка миллиарда транзисторов!

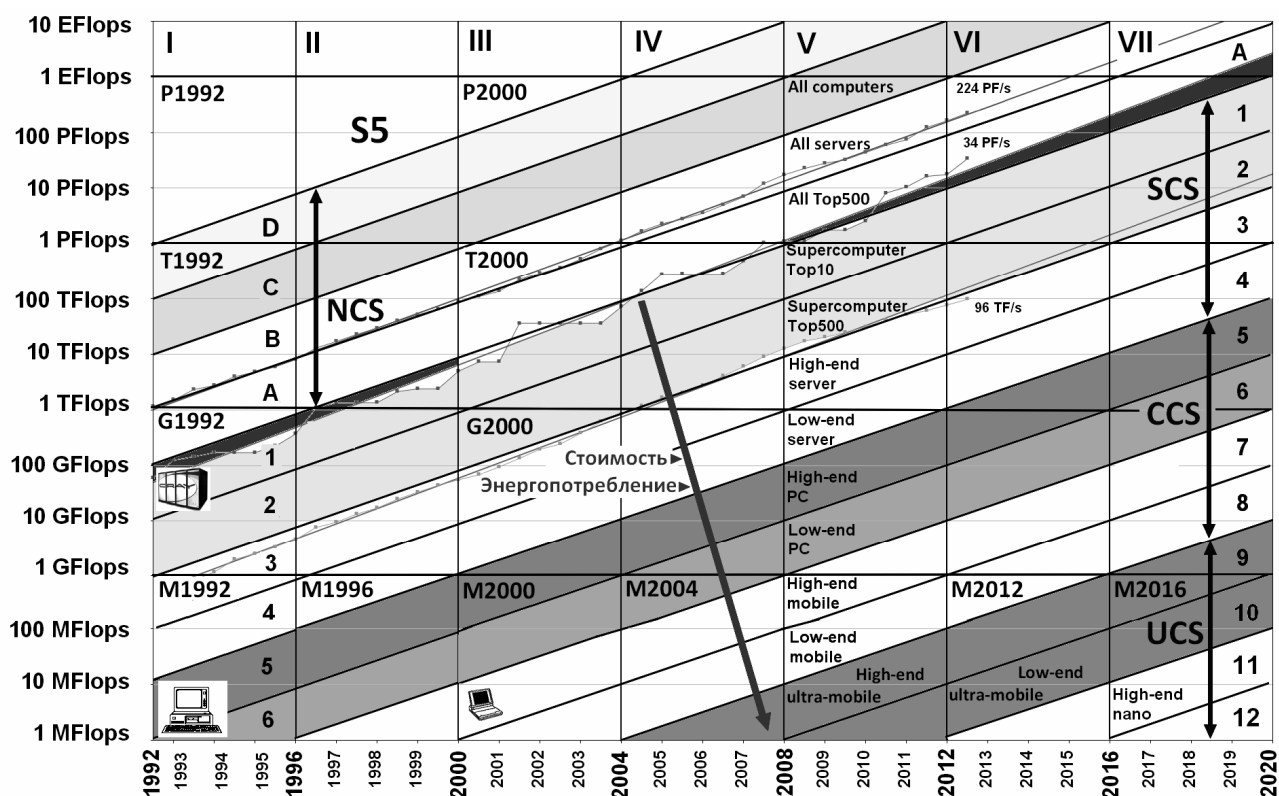


Рисунок 20. – Наиболее высокие темпы роста (S5) в современной техносфере на протяжении всего периода информационно-компьютерной революции наблюдаются в сфере роста производительности компьютерных систем различных классов (детальнее см. в работах [1, 2, 4 – 6])

Список литературы

1. Аноприенко А.Я. Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности // Системный анализ в науках о природе и обществе. – Донецк: ДонНТУ, 2014, №1(6)–2(7). – С. 11 – 29.
2. Аноприенко А.Я. Система закономерностей развития средств и методов компьютеринга // Материалы V всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2014)» – 22–23 апреля 2014 г., Донецк, ДонНТУ, 2014. В 2-х томах. Т. 1. – С. 11 – 23.
3. Аноприенко О.Я., Варзар Р.Л., Иваница С.В. Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ–2014). Выпуск 1(19). – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 5 – 10.
4. Аноприенко А.Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования» (МАП–2013). Выпуск № 1(12)–2(13): Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 10 – 32.
5. Аноприенко А.Я. Закономерности развития компьютерных систем // Научная дискуссия: инновации в современном мире. №10(18): Сборник статей по материалам XVIII международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд. Международный центр науки и образования, 2013. – С. 19 – 29.
6. Аноприенко А.Я. Модели эволюции компьютерных систем и средств компьютерного моделирования // Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 24 сентября 2013 года, Донецк, ДонНТУ, 2013. – С. 403 – 423.
7. Аноприенко А.Я. Будущее компьютерных технологий в контексте технической и кодологической эволюции // Вестник Инженерной Академии Украины. Теоретический и научно-практический журнал Инженерной Академии Украины. Выпуск 3–4, 2011. – С. 108 – 113.

8. Аноприенко А.Я. Ноокомпьютинг и будущее информационно-компьютерной инфраструктуры // *Материалы Международного научного конгресса по развитию информационно-коммуникационных технологий и развития информационного общества в Украине*. К., 2011. – С. 12 – 13.
9. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // *Материалы II всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ2011)»*. Донецк: ДонНТУ, 2011. Т. 1. – С. 7 – 22.
10. Аноприенко А.Я. Пределы информатики // *Информация и рынок. Теоретический и научно-практический журнал*. – 1993. – № 2 – 3. – С. 10 – 14.
11. Аноприенко А.Я. Нооритмы – эффективная модель структурирования исторического времени // *Материалы I международной научной междисциплинарной конференции «Время в зеркале науки»* (Киев, 19 марта 2011 года). – К.: Центр учебной литературы, 2011. С. 299 – 303.
12. Аноприенко А.Я. Нооритмы: комплексная эмпирическая модель ноосферной динамики // *Международный междисциплинарный симпозиум «Нанотехнология и ноосферология в контексте системного кризиса цивилизации»*. Сборник тезисов докладов. Симферополь, 2011. – С. 30 – 32.
13. 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.
14. Аноприенко А.Я. Цивилизация, ноосфера и нооритмы // *Ноосфера и цивилизация. Научный журнал*. Выпуск 7 (10). – Донецк, 2009. – С. 62 – 69.
15. Аноприенко А.Я. Нооритмы: модели синхронизации человека и космоса. – Донецк: УНИТЕХ, 2007. – 372 с.
16. Ферсман А.Е. Химические проблемы промышленности. – М.: Научное хим.-техн. издательство, 1924. – 52 с.
17. Ферсман А.Е. Избранные труды. Том III. – М.: Издательство Академии наук СССР. – 1955. – 798 с.
18. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере / *Успехи современной биологии*. – 1944. – No.18, вып. 2. – С. 113 – 120.
19. Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. – М.: Наука, 1988. – 520 с.
20. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. – М.: Наука, 1991. – 273 с.
21. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
22. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня... Свободные размышления. 1917–1993. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1997. – 426 с.
23. Труды Н.Н. Моисеева по вопросам современного образования. – М.: изд-во МНЭПУ, 2012. – 213 с.
24. Шугрин С.М. Космическая организованность биосферы и ноосферы. – Новосибирск: Наука, 1999. – 496 с.
25. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Издательство АСТ, 2003. – 379 с.
26. Аверин Г.В. Об основаниях системодинамики // *Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе*. Донецк: ДонНТУ. – 2011, № 1. – С. 6 – 52.
27. Аверин Г.В. О фундаментальных основах системодинамики: опытные факты, методология, приложения // *Интеллектуальный анализ информации, ИАИ–2011*. – К: НТУ «КПИ», 2011, – С. 152 – 169.
28. Аверин Г.В. Системодинамика. – Донецк: Донбасс, 2014. – 403 с.
29. Кондратьев Н.Д. Мировое хозяйство и его конъюнктуры во время и после войны. – Вологда, 1922. – 258 с.
30. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры / *Вопросы конъюнктуры*. – 1925. – Вып.1, Т.1. – С. 28 – 79.
31. Кондратьев Н.Д. Основные проблемы экономической статики и динамики: Предварительный эскиз. – М.: Наука, 1991. – 567 с.
32. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. – М.: Экономика, 2002. – 767 с.
33. Гидлевский А.В. Парадоксы антропогенного космологического принципа // *Вестник Омского ун-та*, 2007, № 3. – С. 60 – 67.
34. Аноприенко А.Я. Космоэкология и космоантропный принцип // *Экогеософский альманах «Мудрость дома Земля»: О мировоззрении XXI века*. – Санкт-Петербург – Донецк, 2007. – С. 128 – 135.
35. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. – М.: Прогресс, 1977. – 592 с.
36. Magee C.L., Devezas T.C. How many singularities are near and how will they disrupt human history? // *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 78. 2011, 8, pp. 1365 – 1378.

37. Buringh E., Zanden J. Charting the “Rise of the West”: Manuscripts and Printed Books in Europe, A Long-Term Perspective from the Sixth through Eighteenth Centuries // *The Journal of Economic History*, Vol. 69, no.2. 2009, pp. 409 – 445.
38. Aboukhalil R. The rising trend in authorship // *The Winnower*, 2014, <https://thewinnower.com/papers/37-the-rising-trend-in-authorship>.
39. *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 93 p.
40. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. – М.: Прогресс, 1970. – 568 с.
41. Белькинд Л.Д. История техники. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 491 с.
42. Сотников Е.А. Железные дороги мира из XIX в XXI век. – М.: Транспорт, 1993. – 200 с.
43. Мэлоун М. The Intel: как Роберт Нойс, Гордон Мур и Энди Гроув создали самую влиятельную компанию в мире. – М.: Эксмо, 2015. – 680 с.
44. Тунг Х., Гупта А. Персональные компьютеры // *В мире науки*, 1983, №8. – С. 52 – 65.
45. Анопrienko А.Я. На пороге информационного общества // *Донецкий политехник*. – 24 марта 1998. – №3. – С. 8.
46. Transcript: Pat Gelsinger Keynote with special guest appearance by Gordon Moore // *PRESS KIT – Intel Developer Forum*, September 18–20, 2007. – 68 p.
47. Богапов Г – 50 лет – закону Мура! *Itnews*, 15 июня 2015. <http://itnews.com.ua/analytics/524.html>.
48. Голдовский Б.И. Почему до сих пор не осуществился прогноз Р.Л.Бартини // *Методолог*, 2012, <http://www.metodolog.ru/node/1578>.
49. IEEE Industry Connections Ethernet Bandwidth Assessment // *IEEE 802.3 BWA Ad Hoc Report*, 19th July 2012. – 40 p.
50. Hecht J. Is Keck’s Law Coming to an End? // *IEEE Spectrum*, 2016, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/is-kecks-law-coming-to-an-end>.
2. Anoprienko A.J. Sistema zakonornostej razvitija sredstv i metodov komp'jutinga // *Materialy V vseukrainskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii “Informacionnye upravljajushhie sistemy i komp'juternyj monitoring (IUS i KM 2014)”* – 22–23 aprelja 2014 g., Doneck, DonNTU, 2014. V 2-h tomah. T. 1. pp. 11 – 23 (in Russian).
3. Anoprienko O.J., Varzar R.L., Ivanica S.V. Zakonornosti razvitija analogo-cifrovyh preobrazovatelej i perspektivy ispol'zovanija postbinarnogo kodirovanija // *Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta. Serija: Informatika, kibernetika i vychislitel'naja tehnika. Issue 1(19)*. – Doneck: DonNTU, 2014. pp. 5 – 10 (in Russian).
4. Anoprienko A.J. Osnovnye zakonornosti jevoljucii komp'juternyh sistem i setej // *Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta. Serija Problemy modelirovanija i avtomatizacii proektirovanija (MAP-2013). Issue no.1(12)–2(13)*: Doneck: DonNTU, 2013. – pp. 10 – 32 (in Russian).
5. Anoprienko A.J. Zakonornosti razvitija komp'juternyh sistem // *Nauchnaja diskussija: innovacii v sovremennom mire. no.10 (18): Sbornik statej* – M.: Izd. Mezhdunarodnyj centr nauki i obrazovanija, 2013. – pp. 19 – 29 (in Russian).
6. Anoprienko A.J. Modeli jevoljucii komp'juternyh sistem i sredstv komp'juternogo modelirovanija // *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Modelirovanie i komp'juternaja grafika 24–27 sentjabrja 2013 goda*, Doneck, DonNTU, 2013. pp. 403 – 423 (in Russian).
7. Anoprienko A.J. Budushhee komp'juternyh tehnologij v kontekste tehničeskoy i kodo-logičeskoy jevoljucii // *Vestnik Inzhenernoj Akademii Ukrainy. Teoreticheskij i nauchno-praktičeskij zhurnal. Issue 3 – 4, 2011*. – pp. 108 – 113 (in Russian).
8. Anoprienko A.J. Nookomp'jutering i budushhee informacionno-komp'juternoj infrastruktury // *Materialy Mezhduna-rodного nauchного kongressa po razvitiju informacionno-kommunikacionnyh tehnologij i razvitija informacionного obshhestva v Ukraine. K., 2011*. – pp. 12 – 13 (in Russian).
9. Anoprienko A.J. Komp'juternye nauki i tehnologii: sledujushhie 50 let // *Materialy II vseukrainskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Informacionnye upravljajushhie sistemy i komp'juternyj monitoring*. Doneck: DonNTU, 2011. T. 1. – pp. 7 – 22 (in Russian).
10. Anoprienko A.J. *Predely informatiki // Informacija i rynek*. – 1993. – no.2 – 3. – pp. 10 – 14 (in Russian).

References (transliteration)

1. Anoprienko A.J. Sistemodinamika nootehnosfery: osnovnye zakonornosti // *Sistemnyj analiz v naukah o prirode i obshhestve*. – Doneck: DonNTU, 2014, №1(6)–2(7). pp. 11 – 29 (in Russian).

11. Anoprienko A.J. Nooritmy – jeffektivnaja model' strukturirovanija istoricheskogo vremeni // Materialy I mezhdunarodnoj nauchnoj mezhdisciplinarnoj konferencii Vremja v zerkale nauki (Kiev, 19 marta 2011 goda). – K.: Centr uchebnoj literatury, 2011. – pp. 299 – 303 (in Russian).
12. Anoprienko A.J. Nooritmy: kompleksnaja jempiricheskaja model' noosfernoj dinamiki // Mezhdunarodnyj mezhdisciplinarnyj simpozium Nanotehnologija i noo-sferologija v kontekste sistemnogo krizisa civilizacii. Sbornik tezisov dokladov. Simferopol' – Jalta, 2011. – pp. 30 – 32 (in Russian).
13. Anoprienko A.J. Nooritmy i vremja v informacionnuju jepohu // Vremja v zerkale nauki. Special'nyj vypusk sbornika nauchnyh trudov Gumanitarnye studii. Chast' 1. – K.: Centr uchebnoj literatury, 2010. pp. 291 – 305 (in Russian).
14. Anoprienko A.J. Civilizacija, noosfera i nooritmy // Noosfera i civilizacija. Issue 7 (10). – Doneck, 2009, pp. 62 – 69 (in Russian).
15. Anoprienko A.J. Nooritmy: modeli sinhronizacii cheloveka i kosmosa. – Doneck: UNITEH, 2007. – 372 p. (in Russian).
16. Fersman A.E. Himicheskie problemy promyshlennosti. – M.: Nauchnoe him.-tehn. izdatel'stvo, 1924. – 52 p. (in Russian).
17. Fersman A.E. Izbrannye trudy. Tom III. – M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. – 1955. – 798 p. (in Russian).
18. Vernadskij V.I. Neskol'ko slov o noosfere / Uspехи sovremennoj biologii. – 1944. – no.18, Issue 2. pp. 113 – 120 (in Russian).
19. Vernadskij V.I. Filosofskie mysli naturalista. – M.: Nauka, 1988. – 520 p. (in Russian).
20. Vernadskij V.I. Nauchnaja mysl' kak planetnoe javlenie. – M.: Nauka, 1991. – 273 p. (in Russian).
21. Moiseev N.N. Algoritmy razvitija. – M.: Nauka, 1987. – 304 p. (in Russian).
22. Moiseev N.N. Kak daleko do zavtrashnego dnja.... – M.: MNJePU, 1997. – 426 p. (in Russian).
23. Trudy N.N. Moiseeva po voprosam sovremenного obrazovanija. – M.: izd-vo MNJePU, 2012. – 213 p. (in Russian).
24. Shugrin S.M. Kosmicheskaja organizovannost' biosfery i noosfery. – Novosibirsk: Nauka, 1999. – 496 p. (in Russian).
25. Forrester Dzh. Mirovaja dinamika. – M.: OOO AST, 2003. – 379 p. (in Russian).
26. Averin G.V. Ob osnovanijah sistemodinamiki // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshchestve. Doneck: DonNTU. – 2011, no.1. – pp. 6 – 52 (in Russian).
27. Averin G.V. O fundamental'nyh osnovah sistemodinamiki: opytnye fakty, metodologija, prilozhenija // Intellektual'nyj analiz informacii. – K.: NTU “KPI”, 2011, – pp. 152 – 169 (in Russian).
28. Averin G.V. Sistemodinamika. – Doneck: Donbass, 2014. – 403 p. (in Russian).
29. Kondrat'ev N.D. Mirovoe hozjajstvo i ego konjunktury vo vremja i posle vojny. – Vologda, 1922. – 258 p. (in Russian).
30. Kondrat'ev N.D. Bol'shie cikly konjunktury / Voprosy konjunktury. – 1925. – Vyp.1, T.I. – pp. 28 – 79 (in Russian).
31. Kondrat'ev N.D. Osnovnye problemy jekonomicheskoy statiki i dinamiki: Predvaritel'nyj jeskiz. – M.: Nauka, 1991. – 567 p. (in Russian).
32. Kondrat'ev N.D. Bol'shie cikly konjunktury i teorija predvidenija. – M.: Jekonomika, 2002. – 767 p. (in Russian).
33. Gidlevskij A.V. Paradoksy antropnogo kosmologicheskogo principa // Vestnik Omskogo universiteta, 2007, no.3. – pp. 60 – 67 (in Russian).
34. Anoprienko A.J. Kosmojekologija i kosmoantropnyj princip // Jekogeosofskij al'manah Mudrost' doma Zemlja: O mirovozzrenii XXI veka. Rossijsko-ukrainskoe izdanie. – Sankt-Peterburg – Doneck, 2007. – pp. 128 – 135 (in Russian).
35. Martino Dzh. Tehnologicheskoe prognozirovanie. – M.: Progress, 1977. – 592 p. (in Russian).
36. Magee C.L., Devezas T. C. How many singularities are near and how will they disrupt human history? // Technological Forecasting & Social Change, Vol. 78. 2011, 8, pp. 1365 – 1378.
37. Buringh E., Zanden J. Charting the “Rise of the West”: Manuscripts and Printed Books in Europe, A Long-Term Perspective from the Sixth through Eighteenth Centuries // The Journal of Economic History, Vol. 69, no.2. 2009, pp. 409 – 445.
38. Aboukhalil R. The rising trend in authorship // The Winnower, 2014, <https://thewinnower.com/papers/37-the-rising-trend-in-authorship>.
39. Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 93 p.
40. Janch Je. Prognozirovanie nauchno-tehnicheskogo progressa. – M.: Progress, 1970. – 568 p. (in Russian).
41. Bel'kind L.D. Istorija tehniki. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1956. – 491 p. (in Russian).
42. Sotnikov E.A. Zheleznye dorogi mira iz XIX v XXI vek. – M.: Transport, 1993. 200 p. (in Russian).

43. Mjeloun M. The Intel: kak Robert Nojs, Gordon Mur i Jendi Grouv sozdali samuju vlijatel'nuju kompaniju v mire. – M.: Jeksmo, 2015. – 680 p. (in Russian).
44. Tung H., Gupta A. Personal'nye komp'yutery // V mire nauki, 1983, no.8. pp. 52 – 65 (in Russian).
45. Anoprienko A.J. Na poroge informacionnogo obshhestva // Doneckij politehnik. – 1998. no.3. – p. 8 (in Russian).
46. Transcript: Pat Gelsinger Keynote with special guest appearance by Gordon Moore // PRESS KIT – Intel Developer Forum, September 18 – 20, 2007. – 68 p.
47. Bogapov G – 50 let – zakonu Mural! Itnews, 15 iyunja 2015 (in Russian).
<http://itnews.com.ua/analytics/524.html>.
48. Goldovskij B.I. Pochemu do sih por ne osushhestvilsja prognoz R.L. Bartini // Metodolog, 2012. (in Russian).
<http://www.metodolog.ru/node/1578>.
49. IEEE Industry Connections Ethernet Bandwidth Assessment // IEEE 802.3 BWA Ad Hoc Report, 19th July 2012. – 40 p.
50. Hecht J. Is Keck's Law Coming to an End? // IEEE Spectrum, 2016,
<http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/is-kecks-law-coming-to-an-end>.

Аноприєнко О.Я. «Системодинаміка техносфери: як виміряти технічний прогрес». Системодинаміка техносфери може розглядатися як поєднання періодичних і експоненційних закономірностей росту. Основою періодичної компоненти може служити модифікована концепція хвиль Кондратьєва. Суть модифікації при цьому полягає в прив'язці хвиль до 50-річних періодичних коливань зі змінною амплітудою в межах 500-літніх періодів. Аналіз великого обсягу реальних історичних даних підтверджує доцільність і достатню продуктивність такої моделі як мінімум при розгляді розвитку техносфери на протязі останнього тисячоліття. Експонентну складову запропоновано кількісно оцінювати на базі універсального показника швидкості зростання S . При цьому в якості базової шкали пропонується використовувати ту ж шкалу, яка використовується для опису різних закономірностей зростання ноотехносфери. Це дозволяє наочно порівнювати інтенсивність процесів розвитку в різних областях техніки з інтенсивністю прогресу в комп'ютерних технологіях, де в даний час спостерігаються найвищі та стійкі темпи зростання.

Ключові слова: системодинаміка, техносфера, періодичні процеси розвитку, експоненціальне зростання, закономірності розвитку технічних систем, швидкість технічного прогресу, узагальнений закон Мура.

Anopriyenko A. “Systemdynamics of technosphere: how to measure the technical progress”. System dynamics of technosphere can be presented as a combination of periodic and exponential growth patterns. The basis of the periodic component can be modified concept of Kondratieff waves. The essence of the modification is the combination of 50-year periodic oscillations with variable amplitude within a 500-year period. Analysis of a large volume of real historical data confirms the feasibility and efficiency of this model, sufficient at least when considering the development of a technosphere over the last millennium. Exponential component offered to quantify on the basis of universal indicator S . In this case the growth rate as the base of the scale is proposed to use the same scale, which is used to describe different patterns of growth for nootechnosphere. This allows simple comparing of the intensity of development processes in various fields of technology to the intensity of progress in computer technology, which currently has the highest and sustainable growth.

Keywords: system dynamics, technosphere, periodic processes of exponential growth, patterns of development of technical systems, the speed of technical progress, a generalization of Moore's Law.

Статья поступила в редакцию 22.06.2015
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Г.В. Авериньым