

## **Введение**

Достижение значимых позиций на мировом компьютерном рынке – одна из приоритетных задач возрождения отечественного компьютеростроения. На первый взгляд она кажется нерешаемой, но, как далее показывается, на современном этапе развития мирового компьютеростроения вступают в действие фундаментальные рыночные факторы, которые требуют изменения базовых моделей развития индустрии массового производства компьютеров и программ. А это влечёт необходимость кардинальной переоценки сложившихся приоритетов и соответствующих структурных изменений мирового компьютерного рынка. Инвестиционная политика должна учитывать новые рыночные факторы долгосрочного влияния непреодолимой силы.

Вступление в ВТО может устранить дискриминационные барьеры на путях выхода на мировой высокотехнологичный компьютерный рынок с новыми разработками, но это предъявляет высочайшие требования к уровням их конкурентоспособности. Особое значение обретают проекты, направленные на формирование новых рыночных ниш высокотиражной и, особенно, массовой продукции, которые опираются на превосходящие фундаментальные научные заделы и успешный опыт практических разработок в области многопроцессорных архитектур и компьютеров.

Эта область, как известно, является одной из самых наукоёмких сфер мирового компьютеростроения. Для полного раскрытия потенциала высокопараллельных компьютеров требуется не только быстро прогрессирующие полупроводниковые СБИС-технологии глубокого нанометрового диапазона, но и, прежде всего, высокоэффективные, структурно масштабируемые решения в части многопроцессорных

архитектур, которые смогут обеспечивать рост реальной производительности пропорционально быстро растущему количеству транзисторов на кристалле. Такие архитектуры уникальны и самоценны. В настоящее время они в явном дефиците. Обладание ими даёт хорошую основу для продвижения на мировой рынок.

В области высокопроизводительных и массовых компьютеров конкурентоспособность наукоёмких ноу-хау может достигаться только в рамках сложившегося на мировом рынке разделения труда с привлечением современных полупроводниковых технологий массового производства интегральных схем глубокого нанометрового диапазона 40-28-20-14-10нм.

Цели данной работы:

- проанализировать причины и индустриальные проблемы внутрикомпьютерного кризиса и определить некоторые ключевые тенденции развития компьютеростроения в сфере высокопроизводительных вычислений;
- в сравнении с современными архитектурами однокристалльных компьютеров с массовым параллелизмом рассмотреть пути конкурентоспособного развития архитектурной линии ПС-2000 в ориентации на передовые технологии глубокого нанометрового диапазона;
- оценить потенциальные рынки сбыта отечественной высокотиражной продукции.

## **1. Структурное насыщение микропроцессорных архитектур и кризис мирового компьютеростроения**

Передовые СБИС-технологии перешли на промышленное освоение глубокого нанометрового диапазона и уже предоставляют 1-3млрд. и более транзисторов на кристалле. Однако эффективное использование этого ресурса в целях повышения производительности посредством простого

увеличения числа классических микропроцессорных ядер на кристалле не имеет перспектив.

Впервые массовое компьютеростроение оказалось в ситуации архитектурного кризиса: микропроцессорные архитектуры исчерпали свой потенциал параллелизма уже на уровне 10-50 млн. транзисторов, а системообразующий потенциал многоядерных архитектур с фоннеймановскими микропроцессорами совершенно недостаточен для высокоэффективного использования потенциальных возможностей современных и перспективных СБИС-технологий.

Новейшие разработки однокристалльных "ненеймановских" многопроцессорных архитектур с массовым параллелизмом (сотни и тысячи процессоров на кристалле) всё ещё находятся в начальной стадии индустриального становления и развития.

Наиболее известным примером промышленного производства таких архитектур служат новейшие графические процессорные устройства (Graphics Processing Unit – GPU) известных производителей видеокарт для ПК – nVIDIA и AMD (ATI). Однако, оснований считать, что архитектуры, изначально ориентированные на использование в составе видеоплат ПК, или других узкопрофильных применений, сохранят высокую эффективность на других классах задачах с массовым параллелизмом, пока нет. Проблемы поиска и обоснования конкурентоспособных многопроцессорных архитектурных решений, отвечающих требованиям массовых применений в широких классах задач, в наступившем десятилетии становятся одними из наиболее приоритетных.

По сути, речь идёт о развитии новой ниши компьютерного рынка – высокопроизводительных однокристалльных компьютеров общего назначения (General Purpose – GP) с массовым параллелизмом. Этот рынок охватит весь диапазон применений – от массовых устройств мобильной

связи и встраиваемых систем управления, до суперкомпьютеров производительностью 1-1000 Пфлопс и более.

Это стратегически важное направление развития компьютеростроения, в котором отставание в полупроводниковой части СБИС-технологий на несколько поколений может в рамках международного разделения труда компенсироваться обладанием ноу-хау в части компьютерных архитектур с массовым параллелизмом и способов их индустриального программирования.

Следует отметить, что после длительного периода сверхбыстрого прогресса компьютеростроения сложилась следующая ситуация. Налицо опережающий прогресс полупроводниковых СБИС-технологий глубокого нанометрового диапазона, для которых пока нет ни совершенных многопроцессорных архитектурных решений, обеспечивающих наращивание реальной производительности пропорционально росту числу транзисторов и количеству процессоров (ядер), ни индустриальных средств автоматизации их программирования, в полной мере отвечающих сложившимся требованиям массового производства компьютеров и программ. В отсутствие высокоэффективных архитектурных решений одностороннее лидерство в полупроводниковой части СБИС уже не даёт, как прежде, безусловного превосходства.

Уникальность ситуации в том, что в условиях непреодолимых ограничений на увеличение рабочих частот компьютерная индустрия вынуждена осваивать массовое производство кристаллов с существенно многопроцессорными архитектурами. В отсутствие альтернативных путей наращивания производительности пропорционально росту числа транзисторов на кристалле для выведения таких архитектур в сферы массового производства/потребления требуются "нестандартные" подходы и к архитектурам, и к способам их индустриального программирования.

Можно говорить о том, что в настоящее время, несмотря на четыре десятилетия многопроцессорной проблематики, на мировом рынке высокопроизводительных вычислений продолжает оставаться явный дефицит высокоэффективных многопроцессорных архитектур, в том числе для задач с массовым параллелизмом. Это обстоятельство позволяет нам предложить к рассмотрению апробированную многолетней практикой эффективного промышленного применения отечественную многопроцессорную архитектуру ПС-2000 [1]. Она может быть положена в основу как фундамент для построения высококонкурентных однокристалльных многопроцессорных компьютеров общего назначения класса GP.

### ***1.1. Компьютерный рынок в преддверии кардинальных перемен***

Компьютерный рынок – не только одна из наиболее доходных и динамично развивающихся сфер мирового рынка. Массовые компьютеры, связанные глобальными сетями, проникают во все сферы жизнедеятельности.

Растущая зависимость социосферы от компьютерных технологий имеет и обратную сторону. Своевременно нерешаемые фундаментальные проблемы компьютеростроения, связанные с глубинными проявлениями внутрикомпьютерного кризиса, приводят к неравномерному развитию ключевых сфер компьютерного рынка, что ведёт к нарушению системно-технических балансов в развитии собственно компьютерной среды и компьютерного рынка. А это – упущенная выгода от недоиспользования быстро растущего рыночного потенциала передовых полупроводниковых технологий.

И чем масштабнее проявления компьютерного кризиса, тем больше потери. В условиях неустранённого внутрикомпьютерного кризиса утрачиваются перспективы устойчивого развития компьютерного рынка и,

как следствие, мирового. Инвесторы утрачивают долгосрочные ориентиры. Растут инвестиционные риски, а вместе с ними и избыток бездействующих финансовых ресурсов, что усугубляет нестабильность.

Анализ ключевых тенденций развития компьютерной среды и причин нарастающих проявлений внутрикомпьютерного кризиса [2] показывает, что прежние принципы её формирования и механизмы развития вплотную приблизились к исчерпанию своего системообразующего потенциала.



Рис.1.1. Структурное насыщение микропроцессорных архитектур

В первых поколениях классических микропроцессоров, которые, как известно, реализуют классическую фоннеймановскую модель последовательных вычислений, повышение производительности осуществлялось не только за счёт увеличения рабочей частоты, но и на структурно-архитектурном уровне путём увеличения разрядности машинных слов и аппаратного распараллеливания алгоритмов выполнения арифметических операций. Производительность в расчёте на транзистор [2] при этом быстро росла пропорционально числу транзисторов и рабочей частоте. На рис.1.1. проиллюстрирована *удельная производительность*

*микропроцессоров фирмы Intel, как частное от деления реальной производительности, измеренной на смеси типовых алгоритмов, на количество миллионов транзисторов в чипе. (Рост числа транзисторов для микропроцессоров Intel приведен в [3]).*

Из рис.1.1. видно, что максимальное значение этого показателя эффективности микропроцессорных архитектур фирмы Intel достигнуто на первом Пентиуме (PentiumI, 3.1 млн. транзисторов). Это говорит о том, что классическая модель последовательного счёта на структурно-архитектурном уровне имела скрытые резервы внутреннего параллелизма (разрядность, параллелизм арифметических операций, специализированных устройств типа ММХ, кэширование потоков данных и команд, конвейеризация операций и команд, предсказание условных переходов и др.). Однако, по мере сверхбыстрого роста количества транзисторов на кристаллах СБИС (закон Мура) изначально ограниченные архитектурные резервы параллелизма последовательной модели были, в значительной мере, исчерпаны. Можно утверждать, что в диапазоне 3-25 млн. транзисторов на кристалле было достигнуто структурное насыщение микропроцессорных архитектур.

Компьютерная индустрия в середине 90-х вошла в начальную фазу кризиса классической модели последовательного счёта. Последующие поколения одноядерных микропроцессоров в связи с исчерпанием скрытых резервов параллелизма модели последовательных вычислений быстро утрачивали компоненту наращивания производительности за счёт роста количества транзисторов на кристалле. Темпы роста производительности с середины 90-х в течение десятилетия обеспечивались, главным образом, за счёт увеличения рабочей частоты, связанного с уменьшением размеров транзисторов и расстояний между ними. Ценой роста рабочей частоты стало непропорционально высокое

потребление энергии. К середине 00-х индустрия производства микропроцессоров и компьютеров на их основе столкнулась с тепловым барьером. Его преодоление оказалось невозможным из-за технологических и экономических проблем с теплоотводом в массовых изделиях. Резервы наращивания производительности микропроцессоров по мере совершенствования СБИС-технологий в рамках классической модели последовательных вычислений оказались исчерпанными.

Налицо растущее обесценивание возможностей прогрессирующих полупроводниковых технологий – главного двигателя компьютерного прогресса. Контраргументация о резком снижении себестоимости каждого транзистора с ростом степени интеграции не отменяет архитектурного кризиса микропроцессоров, а лишь объясняет недолгосрочную конъюнктурную рентабельность массового производства микропроцессорных кристаллов, все больше заполняемых «безработными» транзисторами.

Компьютеростроение и компьютерный рынок приблизились к критической фазе своего развития, когда для дальнейшего прогресса необходимо принципиальное обновление компьютерных первооснов. Опережающего прогресса полупроводниковых технологий уже недостаточно.

Компьютерный рынок вступает в период *кардинальных структурных перемен*, которые неизбежно приведут к смене поколений лидеров компьютерной индустрии, существенному пересмотру приоритетов в инвестиционных процессах. Сложившихся за десятилетия преимуществ нынешних лидеров компьютерного рынка, основанных на прежних достижениях, уже недостаточно для открытия и обустройства новых сфер массового влияния.



Масштабы необходимых структурных перемен в большинстве случаев превысят адаптационные возможности лидеров, которые сильно ограничены длинными шлейфами прежних обязательств перед миллиардами клиентов. На этапе смены системообразующих принципов строить новое будущее и одновременно тащить растущий груз прошлого становится нереальным. Будущее вступает в противоречие с прошлым и требует обновления компьютерных первооснов и новых правил функционирования компьютерного рынка как целостной системы, правил, которые откроют принципиально новые возможности для развития и, в то же время, обеспечат преемственность с прежними наиболее востребованными наработками.

## ***1.2. Кризис: причины и проявления***

Суть глубинного внутрикомпьютерного кризиса в следующем. В основе современного рынка массовых компьютеров и программ лежат два крупнейших достижения 20-го века:

- классическая модель универсальных последовательных вычислений – модель Дж. фон Неймана, которая дала старт компьютерной эпохе (конец 40-х прошлого столетия);
- микроэлектронные технологии массового производства полупроводниковых интегральных схем, которые компьютерную эпоху сделали достоянием всего человечества.

Модель фон Неймана – это свод простых логико-инженерных правил автоматического выполнения любых алгоритмов в последовательном режиме "команда-за-командой". Они были положены в основу первых универсальных компьютеров. Они стали основой микропроцессорной революции и до сих пор остаются единым и единственным логическим "стандартом" индустрии массовых компьютеров и программ. Главное

достоинство этой модели – простота и эффективность машинной реализации универсальных вычислений.

В последовательной модели вычислений в каждый момент выполняется одна команда (операция), что позволяет называть её скалярной моделью вычислений. Вычислительный процесс выглядит как последовательная траектория точечных (скалярных) событий, каждое из которых представляет исполнение одной операции. Уникальное достоинство классической модели, при этом, состоит в том, что она на инженерном уровне предлагает логически простейший и, в то же время, практически эффективный механизм управления их реализацией. Поэтому именно она легла в основу микропроцессорной революции, а не другие, более поздние, конкурирующие с ней модели.

Технологии полупроводниковых интегральных схем дали долгосрочную материальную основу (в виде кремниевых кристаллов) для массовой реализации компактных и недорогих универсальных компьютеров, основанных на классической модели последовательных вычислений. В основе таких компьютеров лежат различные реализации *однокристалльных процессоров*, которые стали называться "*микропроцессорами*". Эти миниатюрные, быстро развивающиеся микроэлектронные устройства лежат в основе массового производства компьютеров и программ, а также трёх десятилетий компьютерной революции. Темпы компьютерного прогресса стали определяться сверхвысокими скоростями развития полупроводниковых технологий массового производства интегральных схем, которые выражаются известным законом Мура: "Количество транзисторов на кристалле удваивается каждые 1.8-2 года".

Определяющей тенденцией в развитии технологий интегральных схем является уменьшение размера транзисторов и длины проводников. Их

уменьшение даёт двойной эффект. Во-первых, чем меньше транзисторы, тем быстрее они могут срабатывать и чем меньше расстояние между ними, тем скорее обмены сигналами, что позволяет увеличивать рабочие частоты, а значит и вычислительную производительность. Во-вторых, увеличивается плотность размещения транзисторов на поверхности кристалла. Быстрое увеличение количества транзисторов на кристалле (квадратичный рост с уменьшением линейных размеров транзисторов) открывает возможности для аппаратного наращивания параллелизма вычислительных устройств, что также служит ключевым фактором повышения производительности.

На начальном этапе развития микропроцессоров повышение производительности осуществлялось одновременно как за счёт увеличения рабочей частоты, так и на структурно-архитектурном уровне наращивания параллелизма. Во второй половине 90-х (после появления микропроцессора Pentium I, см. рис. 1.1) резервы аппаратного реализуемого параллелизма классической модели последовательного счёта были в значительной мере исчерпаны. Реализованный в рамках суперскалярной архитектуры конвейерный параллелизм обработки потока команд, сохраняя на уровне программистов главный принцип управления – "команда-за-командой", заведомо ограничен числом распараллеливаемых операций, задаваемых командами (считывание команды, операндов, вычисление, запись результата).

По мере исчерпания скрытого параллелизма модели последовательного счёта продолжающийся по закону Мура рост числа транзисторов в рамках классической модели перестал трансформироваться в пропорциональное прибавление производительности. При этом, удельная производительность микропроцессора в расчёте на транзистор в линейке Intel достигла максимума на микропроцессоре Pentium I и в следующих поколениях она

только снижалась, причём с нарастающей скоростью увеличения числа транзисторов на кристалле по закону Мура.

Таким образом, внешняя рыночная сторона внутрикомпьютерного кризиса проявляла себя в кардинальном снижении вычислительной отдачи от крайне дорогостоящих и быстро растущих инвестиций в новые поколения полупроводниковых технологий. С середины 90-х снижение удельной производительности каждого транзистора микропроцессоров новых поколений вело, по сути, к обесцениванию растущих инвестиций в полупроводниковые технологии. Но в этот период на фоне растущих прибылей от снижения себестоимости и миниатюризации, которые давали основу для расширения потребительских сфер компьютерного рынка, обесценивание происходило незаметно для бизнеса (без снижения доходности). Это были ранние проявления начальной фазы внутрикомпьютерного кризиса, получившего название структурного насыщения микропроцессорной архитектуры [2].

В течение последующих 10 лет, вплоть до середины 00-х кризис классической модели последовательных вычислений и микропроцессорных архитектур развивался в латентной форме. Компьютерная индустрия, развиваясь за счёт расширения сфер применения массовых компьютерных устройств, игнорировала нарастающие проявления структурного кризиса. Исчерпав резервы скрытого от программистов параллелизма классической модели, она стала довольствоваться увеличением производительности новых поколений одноядерных микропроцессоров лишь за счёт наращивания рабочей частоты. А сверхбыстрый рост "избыточных" транзисторов успешно "прятали" в многоуровневых кэшах.

В соответствии с ростом рабочих частот (1-4 ГГц), достигавшемся посредством уменьшения размера транзисторов, росло быстродействие,

которое позволяло ускорять выполнение всех последовательных программ (в одинаковой мере новых и старых) и обеспечивать коммерческий успех дальнейшей смены поколений микропроцессоров на рынке.

Активная реклама обходила вниманием катастрофическое снижение удельной производительности в расчёте на транзистор, которое осталось совершенно неведомым как для бизнеса и потребителя, так и инвесторов. Разработчики, не имея единой универсальной модели параллельных вычислений, которая могла бы составить рыночную альтернативу классической последовательной, поддерживали инерционное движение в рамках модели последовательного счёта, шлифуя накатанные, но уже бесперспективные в долгосрочном горизонте, микропроцессорные решения.

Однако беззаботный период "гладкого" развития в рамках классической модели и "лёгких" прибылей к середине 00-х завершился. С освоением технологий 90-65нм количество транзисторов на кристалле приблизилось к миллиарду. Рабочая частота достигла 4 Гц и более, но при этом энергопотребление транзисторов увеличилось настолько, что воздушное охлаждение перестаёт справляться с отводом тепла. Дальнейшее наращивание производительности массовых микропроцессоров за счёт увеличения частоты стало экономически неоправданным. Кроме того, огромный и сверхбыстро растущий сектор мобильных устройств особо остро нуждается в энергоэффективных методах повышения производительности.

Тепловой барьер в середине 00-х лишил возможности повышения производительности за счёт увеличения частоты. Стратегическая ловушка структурного насыщения микропроцессорных архитектур захлопнулась, похоже, окончательно.

Чтобы хоть как-то наращивать производительность промышленность вынужденно ответила массовыми многоядерными кристаллами. Появились 2-4-8-ми ядерные микропроцессоры. Однако они решили проблемы наращивания производительности лишь в незначительной степени. Если 2-х ядерные давали рост производительности почти в 2 раза, то каждое новое ядро добавляло производительности все меньше и меньше. В большинстве применений максимальное количество ядер не превышает 4. Этот параллелизм реализуется, во многом, на уровне системных процессов и не всегда эффективно. Кроме того, проблема «узкого горла» общей памяти для растущего числа ядер в принципе не позволяет существенно увеличивать их количество. Современные многоядерные кристаллы не стали адекватным ответом внутрикомпьютерному кризису структурного насыщения микропроцессорных архитектур.

Приведём наглядный пример, который показывает масштабы кризиса структурного насыщения. Технология позавчерашнего дня 45нм предоставляет на кристалле около 1млрд. транзисторов. На таком кристалле можно было бы разместить более 300 ядер с эффективной архитектурой Pentium I (3.1 млн. транзисторов). Однако из-за "узкого горла" памяти все 300 ядер будут работать медленнее, чем каждое ядро в отдельности. Отсюда видна "цена" архитектурного кризиса классической модели вычислений – снижение коэффициента полезного использования транзисторов в сотни раз.

Латентный период развития кризиса структурного насыщения "внезапно" для подавляющего большинства закончился. Универсальные многоядерные микропроцессоры, которые выпускаются массовыми тиражами с середины 00-х, не устранили проблемы структурного насыщения микропроцессорных архитектур.

Отсутствие долгосрочных перспектив развития такой многоядерности выражается в следующем:

- ограниченный параллелизм в обменах между ядрами и памятью не позволяет наращивать производительность пропорционально числу ядер, рост производительности прекращается уже на нескольких ядрах;
- прямым следствием структурного насыщения микропроцессорных архитектур стал кризис индустриальных технологий программирования, в основе которых десятилетиями оставалась классическая модель последовательных вычислений.

Массовое производство столь бесперспективной "всего-лишь-несколько-ядерной" архитектуры стало молчаливо-безличным признанием компьютерной индустрией того свершившегося факта, что системообразующий потенциал классической модели последовательного счёта и реализующих её одноядерных микропроцессорных архитектур исчерпан, а её полноценной постнеймановской замены всё ещё нет.

Отсутствие публичных признаний в этом нерядовом явлении понятно. В течение 30-лет гладкого асфальта инвесторы привыкли, форсируя педаль газа, каждые 3-4 года удваивать и гарантированно "отбивать" свои вложения в полупроводниковые технологии. Однако прежняя магистраль развития достигла предела, а нынешние и, тем более, грядущие удвоения многомиллиардных инвестиций – дело всё более непростое и рискованное.

Сейчас нужны новые долгосрочные и ясные перспективы, понятные дорожные карты. В их отсутствие инвестор начинает пересматривать риски и вспоминать о тормозах. А это никому не нужно – ни компьютерной индустрии, ни потребителям, ни политикам, ни самим инвесторам. Всем необходимо иное – как можно быстрее и с наименьшими потерями вывести рынок на новый компьютерный мейнстрим.

В отсутствие единой постнеймановской модели массовое компьютеростроение до сих пор не имеет ключевой опоры для дальнейшего прогресса. Компьютерной индустрии необходима новая модель развития, которая должна прийти на замену классической и стать логическим "стандартом" индустрии массового производства уже не последовательных, а высокопараллельных компьютеров и программ. Внутрикомпьютерный кризис достиг своего пика, но пути выхода из него только предстоит отыскать.

### ***1.3. Индустриальные проблемы***

Начальный, относительно гладкий, потому сравнительно лёгкий, этап тридцатилетнего развития массового компьютеростроения в рамках единой и простейшей модели последовательного счёта закончился. Бизнес собрал почти всё, что скрывалось в тонком поверхностном слое компьютерного прогресса, на который распространяется действие классической модели последовательного счёта. Более глубокие пласты тотальной компьютеризации на многие порядки более прибыльны, но требуют новых архитектур и инструментов. Но их уже невозможно собирать в рамках классической компьютерной аксиоматики.

С опозданием на десятилетие компьютерный рынок вынужденно приступает к поиску индустриальных моделей параллельных вычислений, ориентированных на реализацию посредством многопроцессорных архитектур, которые оказались бы способными стать основой формирования нового, уже постнеймановского и постмикропроцессорного, мэйнстрима в массовом производстве компьютеров и программ.

Для индустриализации нового мэйнстрима на смену классической – простейшей, ввиду своей скалярности, модели универсального счёта, должны прийти иные модели и архитектуры, которые на уровне обновленных базовых постулатов способны регламентировать



универсальные вычисления в пространстве параллельных вычислительных процессов.

Фундаментальное отличие от классических последовательных траекторий скалярных вычислительных событий в том, что в пространстве параллельных процессов доминирует новое измерение, характеризующее множественность вычислительных событий, обозначаемая термином "параллелизм". Параллелизм предполагает, что в каждый момент одновременно исполняется множество операций (команд). Чем больше таких операций способна предоставить вычислительная задача, тем более высокими уровнями параллелизма должны располагать компьютерные архитектуры. Только так достигается рост производительности параллельных вычислений.

Модели параллельных вычислений и соответствующие им архитектуры начали активно разрабатываться ещё в 60-е годы. С тех пор их наработано огромное количество. Но почти все они создавались вне индустриальных требований реализуемости компьютеров и программ в массовых тиражах и, поэтому, не могли составить основу для индустриального мейнстрима.

В рамках ключевой системообразующей компьютерной парадигмы массовый компьютерный рынок с одной стороны крайне динамичен в поисках и охвате новых сфер сбыта, а с другой – весьма консервативен, поскольку отягощён инерцией сопровождения наработанных продуктов.

Целостное развитие уходящего мейнстрима компьютеростроения обеспечивалось системообразующим потенциалом классической модели последовательных вычислений. Теперь, когда этот потенциал вычерпан почти до дна, из-за отсутствия общей базовой модели параллельных вычислений, адекватной требованиям массового производства компьютеров и программ, резко возрастают риски утраты целостности компьютерного рынка. Упущенное время, в течение которого

внутрикомпьютерный кризис из латентной фазы перерос в запущенную и открытую, требует экстренных мер по предотвращению стихийного распада рыночных структур, уже не отвечающих новым вызовам.

Более чем десятилетней задержке с активными поисками новой базовой модели трудно найти оправдание, поскольку характер моделей параллельных вычислений и соответствующих компьютерных архитектур по отношению к классике кардинально меняется. При этом научные проблемы достижения *практической эффективности* таких моделей и архитектур, отвечающие *индустриальным требованиям массового производства компьютеров и программ, крайне сложны* и для их решения требуется определённое время. В них доминируют уже не столько задачи совершенствования собственно технологий производства аппаратных и программных средств, сколько фундаментальные проблемы комбинаторной сложности, связанные с поиском эффективных многопроцессорных структур в условиях *математической многовариантности* структурно-динамического многообразия параллельных вычислений.

В долгосрочной перспективе продвижения на рынок моделей параллельных вычислений и архитектур, отвечающих требованиям массового производства компьютеров и программ, необходимы новые высокоэффективные многопроцессорные архитектуры и технологии их индустриального программирования. *Синергетическим эффектом* стартовой точки лавинного роста может стать принципиальное продвижение в части однокристалльных компьютеров общего назначения с высокопараллельными существенно многопроцессорными архитектурами.

*Главным инструментом наращивания производительности становятся такие однокристалльные многоядерные архитектуры, которые обладают свойствами структурной масштабируемости и*

*комплексируемости, обеспечивают высокую вычислительную эффективность на широких классах задач с массовым параллелизмом. Такие архитектуры смогут обеспечивать увеличение производительности пропорционально быстро растущему в глубоком нанометровом диапазоне количеству транзисторов на кристаллах за счёт пропорционального увеличения количества ядер.*

## **2. Состояние рынка однокристалльных многоядерных ускорителей общего назначения**

Высокопараллельные многопроцессорные архитектуры – это та область знаний, в которых уровень конкурентоспособности изделий не может основываться только на превосходстве полупроводниковых технологий производства интегральных схем. Потребительские свойства таких изделий напрямую зависят от *глубины научной проработки сложнейших многоаспектных проблем обоснования эффективности многопроцессорных архитектур, особенно тех, которые успешно апробированы обширной практикой промышленного применения.*

Проблема в том, что среди огромного числа вариантов допустимых параллельных архитектур только малое их число обладает достаточной эффективностью. Необходимость поиска эффективных решений становится главной проблемой индустриальных параллельных вычислений, архитектур и технологий программирования. Лишь ничтожная часть структурных решений имеет практическую значимость, но регулярных методов построения таких решений пока не предложено.

Отсюда особая роль наиболее удачных достижений в части эффективных параллельных архитектур. Их не так много. Одним из весьма удачных решений, является оригинальная многопроцессорная архитектура отечественного компьютера ПС-2000 [1,4], ориентированного на решение

широких классов задач с массовым параллелизмом на уровне вычислительных операций.

Это был первый в мире сравнительно недорогой, потому широкодоступный, суперкомпьютер, который в 80-х годах выпускался большой промышленной серией. Его оригинальная, масштабируемая и комплекслируемая архитектура доказала свою высокую вычислительную эффективность и экономическую рентабельность во многих сферах промышленной обработки данных, а также в научно-инженерных расчётах, в системах обработки потоков данных реального времени и больших объёмов данных.

По признанию зарубежных специалистов ПС-2000 был одним из наиболее успешных отечественных суперкомпьютеров и одним из первых в мире многопроцессорных компьютеров, который выпускался серийно и использовался в многочисленных и разнообразных сферах [5,6].

Современные многопроцессорные аналоги по областям применения – однокристалльные ускорители GP GPU (General Purpose Graphics Processing Units), гетерогенные мультипроцессоры и матричные многоядерные процессоры, с которыми предстоит конкурировать новым поколениям ПС-2000. изначально специализировались и балансировались *под узкие классы задач*. Так производители nVIDIA и AMD (ATI) начинали осваивать массовые рынки с изготовления графических ускорителей (видеокарт) для ПК. В ходе их развития к середине 00-х сформировался новый рыночный класс однокристалльных многопроцессорных компьютеров – GPU (Graphics Processing Units)

### **2.1. Гетерогенный мультипроцессор Cell**

Примерно в это же время IBM вывела на рынок однокристалльный ускоритель Cell [7], с гибридной многопроцессорной архитектурой, заточенный под игровые приставки. На рис. 2.1 представлена структурная

схема гетерогенного мультипроцессора Cell<sup>1</sup>. Он содержит 64-битный центральный процессор IBM PowerArchitecture™ и 8 базовых вычислительных модулей (БВМ). Каждый БВМ содержит векторный процессор<sup>2</sup>, который представляет собой SIMD-архитектуру функционально поддерживающую архитектуру блока Power™ VMX<sup>3</sup>.

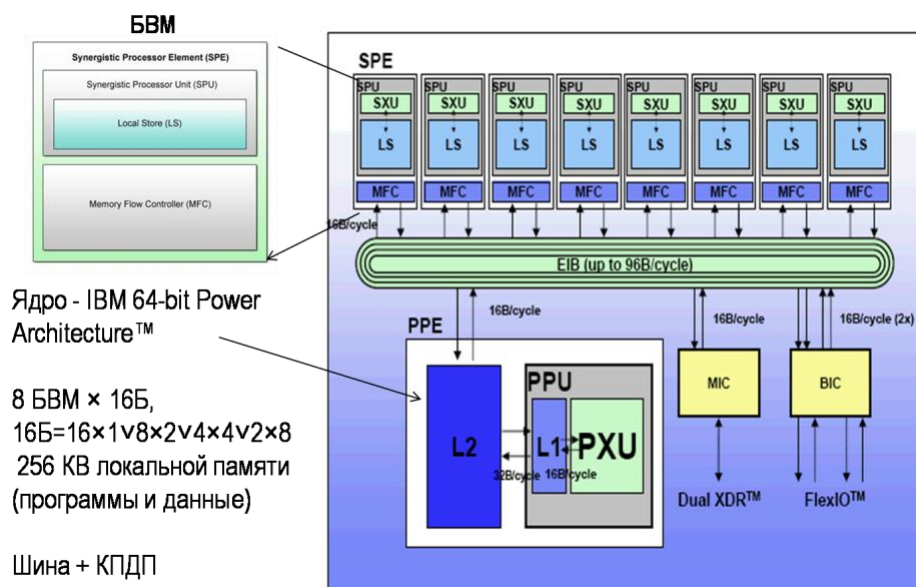


Рис. 2.1. Структурная схема мультипроцессора Cell [7]

Векторный процессор может одновременно обрабатывать 16 байт данных, которые можно представить либо 8 компонентным вектором из 2 байтных слов, либо 4 компонентным вектором из 4 байтных слов, либо 2 компонентным вектором из 8 байтных слов, либо 1 компонентным вектором из 16 байтного слова. Каждый БВМ содержит 256 КБ локальной памяти для хранения программ и данных. БВМ объединены двунаправленной шиной, которая имеет вход/выход на КПДП.

Архитектура гетерогенного мультипроцессора Cell разработана совместно фирмами IBM, Sony и Toshiba, как высокопроизводительная и одновременно эффективная по энергопотреблению и стоимости

<sup>1</sup>Cell Broadband Engine Architecture (CBEA).

<sup>2</sup>Synergistic Processor Unit (SPU)

<sup>3</sup>VMX (vectormultimediaextensions) – векторный ускоритель для обработки мультимедийной информации.

архитектура, предназначенная для широкого диапазона применений, включая наиболее коммерчески выгодное и тиражируемое – игровые приставки.

## 2.2. GP GPU nVIDIA Fermi

На рис.2.2. представлена структурная схема GP GPU nVIDIA Fermi.

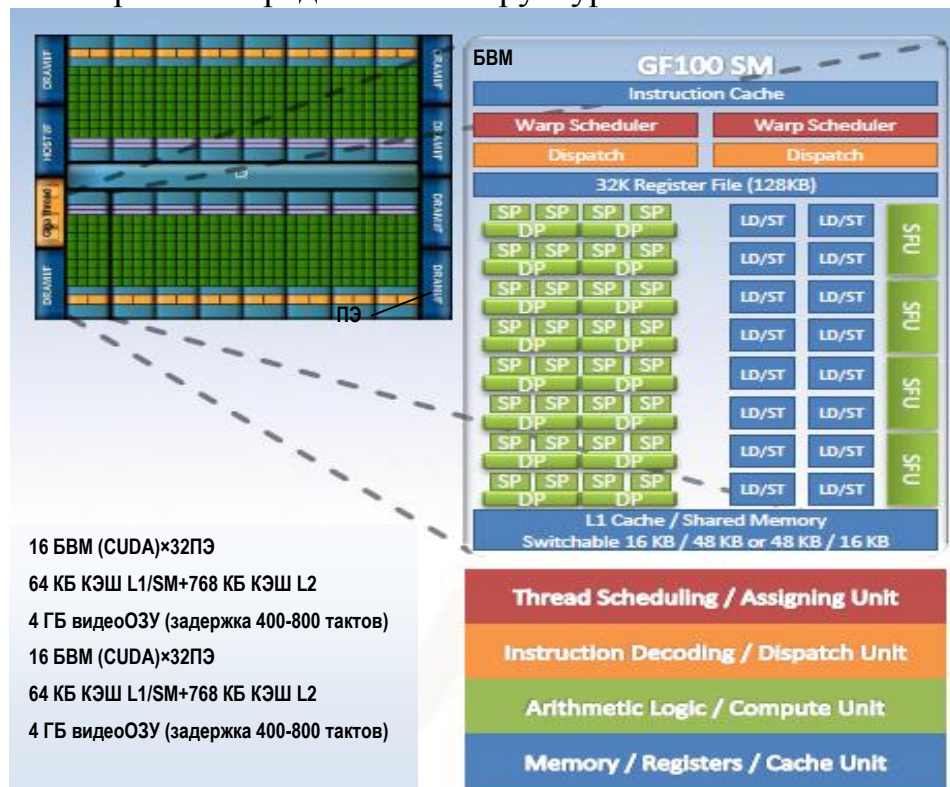


Рис. 2.2. Структурная схема GP GPU nVIDIA Fermi [8]

Структура содержит 16 БММ (CUDA<sup>1</sup>) с SIMD- архитектурой. Каждый БММ содержит либо 32 ПЭ (режим вычислений с одинарной точностью), либо 16 ПЭ (режим с двойной точностью), а также 4 АЛУ для вычислений трансцендентных функций (sin, cos, arctan, sqrt и т.п.). Объем внутренней памяти 1 МБ, объем видеоОЗУ 4 Гб. Частота 1.15 – 1.4 ГГц, пиковая производительность 1 Тфлопс с одинарной точностью или 515 Гфлопс с двойной точностью.

Ускорители фирмы nVIDIA – Fermi (40нм, 512 ядер) [9] и Kepler (28нм, 1536 ядер) [10] являются одними из лидеров в классе GP. Они

<sup>1</sup>Compute Unified Device Architecture – компьютерное устройство с унифицированной архитектурой.

используются для обработки данных в различных приложениях с различной степенью эффективности. Это обосновано особенностями архитектуры, которая изначально была ориентирована на графическую обработку. Соответственно, те прикладные задачи, которые близки к структуре алгоритмов графической обработки, выполняются на GPU эффективно (см. табл. 2.1). На других задачах эффективность архитектуры существенно падает.

Показатели эффективности GP GPU в различных приложениях. Таблица 2.1

Примеры задач решаемых на GPGPU	Ускорение <sup>*)</sup>	КПД,%
Гидрогазодинамика	10	5
Обработка изображений, видео, компьютерное зрение	3 -160	1.5-80
Сейсмическое моделирование (поиск нефти/газа)	30	15
Распознавание целей, объектов	7 – 35	3.5-17
Квантовая химия, моделирование белка	20-80	10-40
Моделирование взаимодействия объектов на молекулярном уровне	17	<10
Базы данных, поиск, сортировка	2-6	1-3
Предсказание погоды, моделирование климата	20-40	10-20
Физическое моделирование-астрономия, компьютерные игры	10-40	5-20
Анализ и распознавание объектов, слежение за объектами	7-12	~5
Криптография и криптоанализ	1.7-20	1-10

<sup>\*)</sup>Представлено ускорение относительно времени решения задачи на универсальном многоядерном микропроцессоре. Соотношение пиковых производительностей GP GPU и большинства многоядерных микропроцессоров ~ 200. Отсюда КПД= Ускорение × 100% / 200.

Следует признать, что системы класса GP, получаемые трансформацией из узкопрофильной многопроцессорной архитектуры GPU, изначально ориентированной на ограниченный набор алгоритмов графической видео обработки, не могут рассматриваться как окончательные решения, обеспечивающие высокую вычислительную эффективные на разнообразных классах задач. В частности одним из слабых звеньев такой архитектуры остаётся "узкое" горло к общей оперативной памяти, что является серьёзным ограничением в классах задач с произвольным доступом к данным. Всё это снижает стратегический потенциал конкурентоспособности таких подходов в развитии систем класса GP.

### 2.3. Архитектуры других фирм

Архитектуры класса GP также развиваются и другими фирмами. Среди них и Intel – всемирно признанный лидер, и новички, например, калифорнийская компания Tileria.

MIC (Many Integrated Core) [11] – новая однокристалльная многоядерная платформа фирмы Intel. Она является развитием трёх предыдущих проектов этой фирмы – Larrabee, Teraflops Research Chip и Single-chip Cloud Computer. Это ряд однокристалльных сопроцессоров-ускорителей с числом ядер до 61. Технология 22 нм с 3D Tri-Gate транзисторами. Ядра связаны кольцевым каналом<sup>1</sup> и поддерживают систему команд линейки микропроцессоров Intel, что позволяет использовать существующие технологии программирования. Производительность ускорителя – до 1.2 Tflops для чисел двойной точности при пиковых рабочих частотах до 1,33 ГГц. Потребляемая мощность – до 300 Вт.

В настоящее время этот однокристалльный ускоритель ядер достиг лучших характеристик фактической производительности среди представленных на рынке в классе GP. При этом, сравнительно небольшое количество ядер не позволяет его, также как и Cell, в полной мере относить к классу масштабируемых архитектур с массовым параллелизмом, в которых число ядер – сотни, тысячи и более. Таким "промежуточным" многоядерным архитектурам, заведомо не доступен огромный резерв массового параллелизма на уровне простых вычислительных операций.

Матричный многоядерный процессор TILE64 [12] компании Tileria предназначен для телекоммуникационных применений и видеоконференций. Он содержит 64 БВМ. Каждый БВМ представляет собой независимый процессор, соединённый с четырьмя соседними.

---

<sup>1</sup> <http://www.intel.ru/content/www/ru/ru/processors/xeon/xeon-phi-coprocessor-block-diagram.html>



## **2.4. Перспективы архитектур класса GP**

Именно так, спустя 20-30 лет после индустриальной премьеры ПС-2000, состоялся новый выход высокопараллельных многопроцессорных архитектур в широкие сферы применений. Конечно, масштабы промышленного тиражирования продуктов совершенно иные. ПС-2000 – выпускался большой промышленной серией в несколько сотен вычислительных комплексов [1,4].

Продукция Cell и GPU – миллионные тиражи. Но это не удивительно. Современный компьютерный рынок – совершенно иная элементная база, иные масштабы сфер потребления.

Надо отметить особый вклад узкопрофильных многопроцессорных ускорителей GPU и Cell, с которыми была пройдена наиболее рискованная часть рыночной инновации многопроцессорных архитектур. *Уверенный спрос на ускорители этих классов доказал, что высокопараллельные многопроцессорные архитектуры, несмотря на гораздо более высокую, в сравнении с классическими однопроцессорными компьютерами, сложность программирования, нашли своё место на компьютерном рынке и неуклонно расширяют своё присутствие.*

Далее, по мере наполнения массового рынка узкопрофильных многопроцессорных ускорителей, стал формироваться широкий спрос на недорогие ускорители для более широких классов задач. К ним относятся, прежде всего, программируемые ускорители для научно-инженерных задач высокой вычислительной сложности. Такие системы отличаются от узкопрофильных прежде всего тем, что имеют открытые для пользователей системы программирования, которые позволяют им решать свои задачи.

Так на базе рынка узкопрофильных ускорителей сформировался следующий потребительский класс однокристальных многопроцессорных ускорителей общего назначения – GP.

Значительная часть ускорителей класса GP применяется в настольных суперкомпьютерах и вычислительных серверах, центрах обработки данных, которые всё шире используются в исследовательских и проектных организациях, университетах, медицинских центрах. Такие ускорители применяются и в топовых суперкомпьютерах, обеспечивая освоение диапазона производительности более 1-10 Пфлопс и более.

В настоящее время большая часть ускорителей класса GP представлена расширением архитектур GPU, изначально специализированных на обработку графики. Анализ архитектур GPU выявил их принципиальные недостатки. *Для существенного повышения эффективности высокопараллельных вычислений требуются иные архитектуры, способные на широких классах решаемых задач с массовым параллелизмом на порядок повысить интегральный показатель удельной (в расчёте на ядро и транзистор) производительности и энергоэффективности.*

### **3. Архитектурный потенциал опережения**

Пройдя высокорисковую стадию начального формирования на мировом рынке, потребительский класс ускорителей GP уже перешёл в устойчивую стадию развития. Его характерные особенности:

- наличие устойчиво растущего спроса в разнообразных сферах применения и долгосрочных тенденций к их расширению;
- число ведущих производителей невелико (в пределах десятки: среди них nVIDIA, AMD, IBM, Intel);

- отсутствие однозначно лидирующей архитектуры.

Несмотря на различие, представленных на рынке архитектурных подходов, ни один из них не имеет существенного превосходства по всей совокупности значимых потребительских характеристик. Так, вычислительная эффективность, измеряемая коэффициентом полезного использования ядер, в разных классах задач даёт значительный разброс реальной производительности. Отсюда разделение сфер влияния по классам задач: графические видеоплаты (nVIDIA, AMD), игровые приставки (IBM&Sony&Toshiba), научно-инженерные расчёты высокой вычислительной сложности (nVIDIA, AMD, Intel, IBM), телекоммуникации (Tilera).

*Дальнейшее развитие однокристальных ускорителей класса GP требует архитектурных решений, которые сохраняют высокую вычислительную эффективность на как можно более широких классах задач с массовым параллелизмом и обладают свойствами эффективной масштабируемости и комплексированности с увеличением количества ядер.*

### **3.1. Преимущества архитектуры ПС-2000**

Архитектура ПС-2000 изначально ориентирована на эффективное решение широких классов задач с массовым параллелизмом на уровне вычислительных операций. Архитектура прошла практическую апробацию в течение более 10-летней эксплуатации в различных приложениях на задачах промышленной обработки, где её эффективность приближалась к 100%. На большинстве показанных в табл. 2.1 задачах, решаемых на GPU, архитектура ПС-2000 существенно более эффективна (КПД, как правило, более 70-80%).

В отличие от узкопрофильных многопроцессорных архитектур, заложенных в GP GPU, в основу высокопараллельной архитектуры ПС-2000 изначально положены *общие принципы* высокоэффективной

обработки данных на широких классах задачах с массовым параллелизмом. Она обладает достаточным потенциалом своего развития для конкурентоспособного покрытия большинства классов задач с массовым параллелизмом, отдельные подклассы которых поделены между сегодняшними игроками.

Архитектура ПС-2000 обладает уникальным на фоне современных ускорителей свойством структурной масштабируемости, которое позволяет одновременно с увеличением количества вычислительных ядер пропорционально наращивать пропускную способность встроенной хорошо организованной распределённой памяти, а также свойством комплексируемости на внутри- и межкристальном уровнях. А это – принципиально более высокий потенциал и в использовании растущих возможностей полупроводниковых технологий, и в расширении классов эффективно решаемых задач.

Одна, вместо многих узкопрофильных, масштабируемая и комплексируемая в большом диапазоне процессорных элементов (ядер), программно совместимая многопроцессорная архитектурная линейка, которая не уступает им в эффективности по совокупным параметрам – даёт превосходство в охвате разнообразных классов задач, а это важное преимущество в наращивании тиражей и формировании однородного по аппаратно-программным средствам массового рынка высокопроизводительных компьютеров и программ.

Благодаря структурной масштабируемости архитектуры ПС-2000 доступ к современным полупроводниковым технологиям открывает возможности пропорционального повышения вычислительной производительности и пропускной способности памяти, снижение удельного энергопотребления, а также себестоимости производства и эксплуатации.

Неудовлетворённый спрос массового рынка на общедоступные компьютерные устройства сверхвысокой производительности в классе GP открывает возможности выхода на многомиллионные тиражи, характерные для уже традиционных многоядерных микропроцессоров.

Дальнейшее развитие апробированной отечественной архитектуры предполагается осуществить в рамках проекта ПС-2000М, который направлен на максимальное раскрытие возможностей СБИС-технологий глубоко нанометрового диапазона 45-10нм за счёт структурно масштабируемой архитектуры, высокоэффективной на широких классах задач с массовым параллелизмом на уровне вычислительных операций.

### ***3.2. Основные цели проекта ПС-2000М***

- Разработка на базе архитектуры ПС2000 и создание с применением ПЛИС-технологий прототипа высокоэффективной на задачах с массовым параллелизмом, масштабируемой многопроцессорной архитектуры для последующей однокристалльной реализации на технологиях нанометрового диапазона 90 -65-45 нм и менее.
- Экспериментальное обоснование возможности создания на базе архитектуры ПС2000 конкурентоспособного на мировом рынке однокристалльного компьютера для использования в качестве элементной базы высокопроизводительных вычислительных систем, «облачных» и распределённых вычислительных систем и других компьютерных систем.
- Разработка микросхемы масштабируемого семейства однокристалльного компьютера ПС-2000М и организация его массового производства на современных нанотехнологиях одной из зарубежных фабрик, а также на отечественных производствах.
- Обоснование целевых рыночных сегментов и создание необходимых условий для вывода конкурентоспособного отечественного

однокристалльного компьютера на мировой рынки компьютерной техники.

#### **4. Предыстория**

Отечественные многопроцессорные компьютеры ПС-2000 создавались на основе оригинальных архитектурных идей, без каких-либо заимствований. Предыстория их создания нетривиальна, потому поучительна и заслуживает более пристального внимания.

##### ***4.1. Политика и компьютеры***

Первые электронные вычислительные машины (ЭВМ) создавались для решения политических задач ядерно-ракетного противостояния двух конкурирующих мировых систем. Эти задачи не имели аналогов ни по наукоёмкости, ни по масштабам реализованной новизны [13]. Компьютеростроение зарождалось под эгидой могущественных опекунов от политики, отвечавших за равновесие военных потенциалов.

В ходе решения все более сложных, но сравнительно узких по профилю вычислительных задач военной тематики, компьютерные архитектуры быстро прогрессировали, становясь все более совершенными и доступными для более широких применений. Благодаря отчётливо проявившейся универсальности и первым признакам комфортности сфера применения компьютеров стала быстро расширяться. Возрастала доля гражданских областей применения компьютерной техники, при этом стали складываться доселе неведомые стимулы для её развития, корни которых находятся в глубинах человеческого общества, наделённого уникальной способностью в ходе своей жизнедеятельности создавать, обрабатывать, накапливать и потреблять прогрессивно растущие потоки и объёмы информации.

Компьютеростроение стимулировало и вбирало в себя лучшие

достижения смежных областей науки и техники: сначала – электроники, а затем и микроэлектроники, вложившей информационную мощь в миллионы мельчайших транзисторов. Микроэлектроника в последние 40 лет стала главной движущей силой компьютерной революции. В результате в условиях открытого рыночного информационного пространства в мире сформировалась массовая компьютерная индустрия, осуществляющая принципиально новую социальную функцию: обеспечение лавинообразного накопления цифровой информации, которая все более явно становится главной регулирующей силой жизни человечества.

Уже на первой стадии перехода к открытому информационному пространству и массовой компьютерной индустрии резко изменились условия соревнования сложившихся в мире компьютерных школ. Отечественные разработчики, успешно обеспечивавшие паритетное развитие компьютерных архитектур при решении военных задач, оказались в изоляции от рыночных стимулов массовых гражданских применений. Информационно-закрытое государство искусственно отгородилось и от мировой рыночной экономики, и от своего общества, перекрыв себе естественные пути полномасштабного и самофинансируемого развития массового компьютеростроения.

Масштабные, но весьма специфические российские проблемы перехода к открытому информационному пространству не имеют аналогов и поэтому нельзя полагаться исключительно на законченные импортные разработки. Решать свои глубинные информационные, и не только, проблемы, не вписывающиеся в готовые западные форматы, предстоит нам самим.

Биография компьютера ПС-2000 также не обошлась без политики.

Следует признаться, вездесущие Штаты и здесь поучаствовали. Весьма

необычным образом для наших непростых отношений с компьютерной (и не только) сверхдержавой. Обычно, кое-что из соблазнительных компьютерных достижений заносило в нашу страну холодным западным сквозняком через случайные щели в высоких заборах эмбарго. Конечно же, не в виде лицензий, чаще в виде действующих образцов для подражания. Над ними неустанно трудились, под некоторые создавали НИИ, заводы, даже целые города. Все знают Зеленоград. С тех времён думать об опережении в компьютерных сферах, особенно в части элементной базы, считается у нас нескромным. А сегодня уже и вовсе неприличным. Да и некогда было думать: наше качество и количество в отсутствие стимулов массового компьютерного рынка никак не хотело успевать за их новыми образцами.

В нашем случае ситуация была непохожей. К материализации и производству ПС-2000 нас подтолкнули не компьютерщики, а политики. Самые большие. Главы двух самых сильных государств.

#### ***4.2. Эпизод 1. Смотрины по-американски***

Любопытная и небанальная история из "детского" дневника компьютера ПС-2000.

Карибский пик холодной войны и вьетнамское противостояние довели руководство двух самых могучих стран и весь остальной мир до нервного истощения. Равным по силе требовалась передышка, которую назвали "разрядка" (не путать с "перестройкой"). В мае 1972 года в Москву прилетел Президент США Р. Никсон. На высшем уровне был подписан договор об ограничении стратегических вооружений (ОСВ-1).



В 1973 г. Л. Брежнев с ответным визитом посетил США. "Разрядка" (прообраз "перестройки" и "перезагрузки") закреплялась не только в дипломатии и



расширяющейся международной правовой базе. Стали налаживаться каналы взаимодействия в научно-технической сфере. Американцы проявили повышенный интерес к перспективным исследованиям в области высокопроизводительных компьютеров, что вполне объяснимо ввиду растущих ограничений натуральных испытаний ядерных вооружений.

В 1973 г. призывы к "разрядке" и "мирному сосуществованию" доросли до призывов к научно-техническому сотрудничеству. Весной этого года к нам в страну прибыла высокопоставленная делегация корпорации CDC (Control Data Corporation) – суперкомпьютерного авторитета и кумира 70-х. Представительной делегации под руководством вице-президента Роберта Пиркинса разрешили показать самые смелые компьютерные идеи немногих открытых научных центров страны.

В этот не очень обширный список того, что можно было показать, попал и Институт проблем управления. В мае-июне делегация в течение двух недель изучала поисковые проекты, осуществляемые под руководством И.В. Прангишвили, недавно ставшим заместителем директора.

К этому времени в Институте проблем управления благодаря усилиям И.В. Прангишвили сложилась передовая для того времени научная школа исследований в области однородных и ассоциативных вычислительных структур.

Поняв много раньше других стратегическое значение и чрезвычайную перспективность применения высокопараллельных компьютерных архитектур в гражданских применениях, И.В. Прангишвили, будучи молодым зам. директора Института проблем управления АН СССР (в настоящее время ИПУ РАН), уже получил признание своих начинаний [14]. Осознавая высокую новизну, наукоёмкость и междисциплинарный характер проблем построения компьютеров с параллельными

архитектурами, в начале 70-х при активной поддержке академика В.А. Трапезникова – директора Института – он сформировал в своей лаборатории несколько исследовательских групп, которым поручил проведение свободного научного поиска идей построения компьютеров с высокопараллельными архитектурами.

Поначалу приоритетными направлениями поиска стали однородные структуры и ассоциативные принципы обработки данных. Тогда эти направления были передовым краем научных исследований, настолько новыми, что ещё не могли опираться на обширный практический опыт. Безошибочное инженерное чутьё, интуиция прирождённого лидера подсказали И.В. Прангишвили, что в такой ситуации требуется сформировать ещё одно – "запасное" – направление поиска, в котором новомодные новации не станут доминировать над уже известным в мире инженерным опытом построения высокопроизводительных многопроцессорных компьютеров.

В начале 1972 г. он пригласил к себе в лабораторию к.т.н. И.Л. Медведева, уже зарекомендовавшего себя в Институте как творчески активного, яркого инженера, новаторского и напористого конструктора.

В одном из нескольких независимых проектов, инициированных И.В. Прангишвили, к 1973 г. Были сформированы научные основы и инженерные принципы воплощения Однородного Ассоциативного Мультипроцессора (ОАМП), который стал прообразом многопроцессорной архитектуры, позднее получившей название ПС-2000. Идеологию этой архитектуры, обобщившей идеи "мелкозернистой" однородности и ассоциативной обработки до уровня многопроцессорных структур, формировал И.Л. Медведев с небольшой группой своих сотрудников.

В концепции ОАМП архитектура высокопараллельного

многопроцессорного компьютера прорисовалась уже достаточно отчётливо. Один из докладов на встрече с делегацией CDC был посвящён этой новой идеологии. Яркий и эмоциональный доклад И.Л. Медведева был воспринят авторитетной делегацией с нескрываемым энтузиазмом и повышенным вниманием к необычной идеологии, образно и убедительно выраженной инженерным языком.

Так состоялись смотрины будущего отечественного рекордсмена.

По результатам поездки группы американских экспертов по отечественным предприятиям было выделено несколько перспективных проектов, в число которых вошли предложения Института проблем управления. Делегация подписала весьма смелый по тем временам протокол о намерениях расширить сотрудничество по совместному продвижению разработок в области высокопроизводительных многопроцессорных компьютеров.

Позднее, после анализа результатов работы делегации, из CDC поступило предложение о строительстве в нашей стране заводов по производству элементной базы – больших интегральных схем (БИС) и высокопроизводительных компьютеров совместной разработки. Руководство CDC неоднократно сообщало, что в конце 1974г. ожидает получить от своего правительства разрешение на полномасштабное сотрудничество.

Такого феерического сценария никто не мог и предположить. Но политика, как известно, не любит прямолинейных траекторий. Осенью 1974г. в США, накануне получения обещанного разрешения, была принята поправка Джексона-Вэника, запрещающая экономическое сотрудничество с нами в области высоких технологий.

Чудо-альянса с заграницей не случилось. Но правильный вектор развития руководство страны ухватило. Пока CDC боролась со своей

бюрократией, академик В.А. Трапезников и Министр Приборостроения средств автоматизации и систем управления СССР К.Н. Руднев добились поддержки на высших уровнях и было принято решение разрабатывать новые компьютеры своими силами, с подключением к ИПУ предприятий Министерства Приборостроения.

В 1974 г. в качестве предприятия проектировщика был выделен НИИ УВМ, входящий в НПО "Импульс" (г. Северодонецк), серийно выпускавший популярные управляющие вычислительные машины (УВМ) СМ-1 и СМ-2, относящиеся к классу мини-ЭВМ.

В 1975 г. по распоряжению Министра начались совместные НИОКР. Несмотря на новизну архитектуры, не имевшей аналогов, проект ПС-2000 осуществлялся очень быстро. Уже в 1978 г. в ИПУ был установлен полнофункциональный макет 64-х процессорного компьютера ПС-2000, а в декабре 1980 г. Госкомиссия приняла восемь опытных образцов вычислительных комплексов ПС-2000, подготовленных для запуска в серию на Северодонецком приборостроительном заводе. С 1981 г. начался их серийный выпуск.

#### ***4.3. Эпизод 2. Паблицити по-советски***

Публикаций собственно по компьютеру, к сожалению, было немного. И, в основном, на русском [15,16]. Поэтому за океаном обратили внимание на ПС-2000 довольно поздно – лишь во второй половине 80-х, когда по всей стране в разных областях народного хозяйства уже трудились две сотни недорогих вычислительных комплексов невиданной производительности. По припозднившимся откликам зарубежных источников многопроцессорный ПС-2000 - самый продвинутый и самый быстродействующий советский компьютер [5,6], выпускавшийся большой

промышленной серией. Добавим, что серийного производства компьютеров такого класса за рубежом в то время не было.

## **5. Многопроцессорный компьютер ПС-2000**

В основе компьютера ПС-2000 лежит сформированная в начале 70-х оригинальная идеология простой многопроцессорной структуры высокоэффективной в широких классах задач с массовым параллелизмом простых операций. Высокая вычислительная и экономическая эффективность архитектуры и системы команд компьютеров ПС-2000 подтверждена на разнообразных классах задач промышленной обработки данных сотнями вычислительных комплексов на их основе.

Уникальный опыт создания, промышленного производства и применения опережающей архитектуры нового класса компьютеров с массовым параллелизмом дает важные преимущества на пути к созданию конкурентоспособной отечественной элементной базы в классе однокристалльных ускорителей общего назначения.

Многопроцессорный компьютер ПС-2000 [1, 4, 15, 17] имеет SIMD-архитектуру и ориентирован на высокопроизводительную обработку больших массивов данных по хорошо распараллеливаемым регулярным алгоритмам.

ПС-2000 состоит из набора однотипных процессорных элементов (ПЭ), связанных регулярным и магистральным каналом, и общего устройства управления (ОУУ).

Общее устройство управления (ОУУ) обеспечивает приём, хранение и исполнение программы многопроцессорного компьютера ПС-2000, генерацию и передачу общих для всех ПЭ управляющих сигналов, синхронизацию процессов обработки и ввода-вывода, тестирование ПЭ, а также связь с внешней мониторной подсистемой (МПС), которая

обеспечивает системные и пользовательские функции вычислительного комплекса (ВК).

Найденные учёными ИПУ РАН решения впервые ориентировали конструкторов на проектирование *сверхэкономичных суперкомпьютеров с рекордно высоким показателем производительности в расчёте на единицу оборудования и стоимости*. Предварительные исследования и расчёты впоследствии подтвердились. Производительность серийных вычислительных комплексов ПС-2000, фото которого приведено на рис.5.1, достигала 200 млн. операций в секунду при весьма доступных стоимостных показателях, включая расходы на эксплуатацию.



Рис. 5.1. Многопроцессорный компьютер ПС2000 (на переднем плане видны четыре из пяти стоек)

За период с 1975 по 1980 гг. был выполнен полный комплекс НИОКР, разработка и изготовление партии серийных образцов высокопараллельного многопроцессорного компьютера ПС-2000.

В конце 1980 г. Госкомиссия приняла серийные образцы и санкционировала серийное производство высокопроизводительных вычислительных комплексов (ВК) промышленной обработки данных ПС-2000. *Восемь экземпляров ВК ПС-2000 всех 4 конфигураций, демонстрировавшихся перед комиссией на геофизических задачах, давали общую производительность около миллиарда операций в секунду, что превышало суммарную вычислительную производительность всего парка вычислительных машин страны.*

Столь высокая производительность достигалась на хорошо распараллеливаемых задачах, которые характерны для многих практических применений. На серийных ЭГВК ПС-2000 в ходе промышленного решения таких задач обеспечивалось рекордное значение показателя "производительность/стоимость".

С 1981 по 1988 гг. Северодонецким приборостроительным заводом, входящим в НПО "Импульс", было выпущено 242 многопроцессорных компьютеров ПС-2000.

*Отечественное компьютеростроение впервые в мире большим тиражом выпустило высокопроизводительный существенно многопроцессорный рентабельный компьютер общего назначения.*

### **5.1. Особенности архитектуры ПС-2000**

Оригинальная архитектура ПС-2000 соединила относительную простоту аппаратных решений систем управления одним потоком команд с беспрецедентно высокой гибкостью программирования высокопараллельной обработки одновременно многих потоков данных. Уникальная гибкость управления ПС-2000 ломает привычные

представления о функциональных возможностях SIMD-компьютеров. Невероятно, но в серийном ПС-2000 было сделано, казалось, совершенно немыслимое для компьютеров этого класса. В ресурсах ПС-2000 на программном уровне была эмулирована многопроцессорная архитектура MIMD (много потоков команд, много потоков данных). При этом все ПЭ, работая параллельно под управлением устройства активации, могли одновременно выполнять каждый свою программу, загруженную в собственный модуль оперативной памяти. Например, 64-процессорный SIMD-компьютер ПС-2000 смог параллельно выполнять 64 потока разных программ. Существовавшие на тот момент SIMD-компьютеры этого делать не умели.

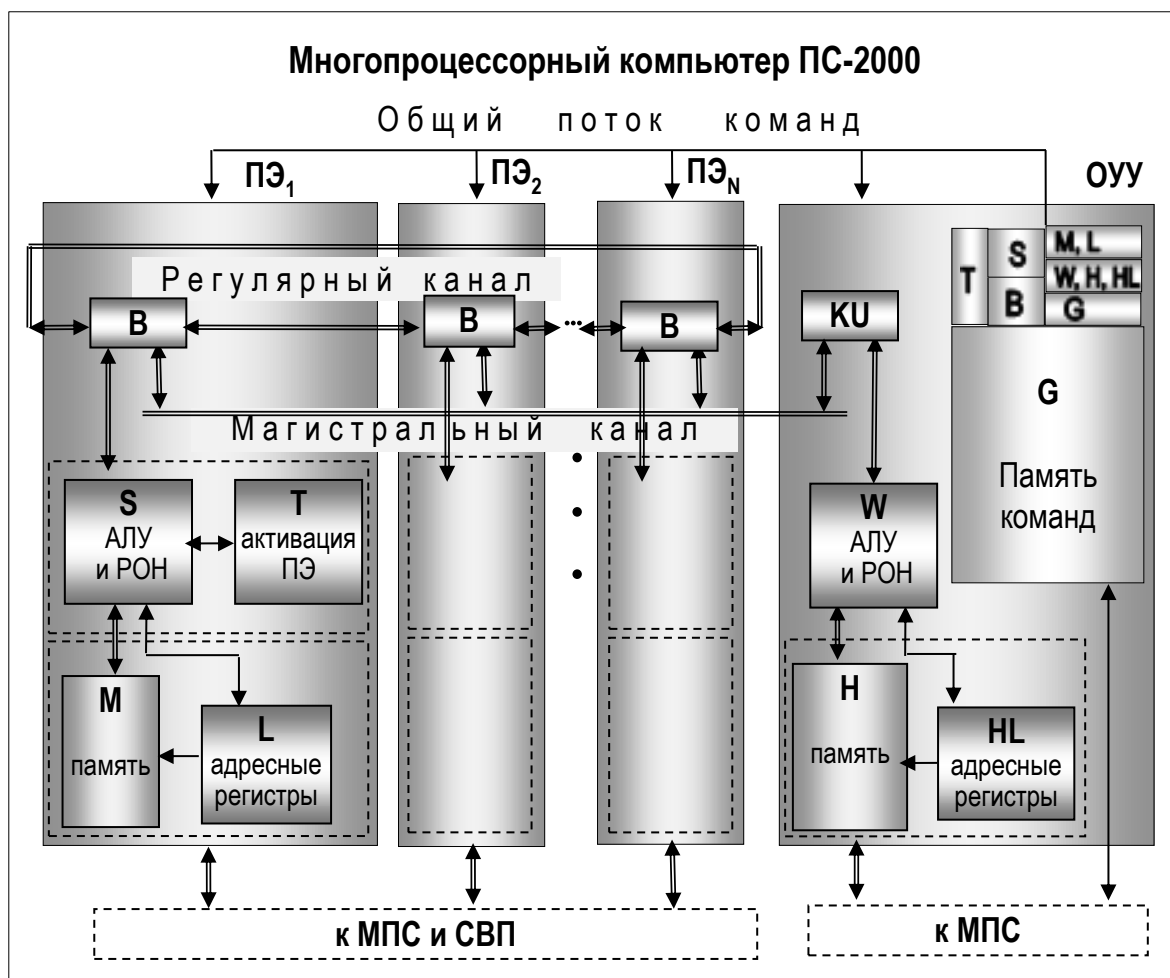


Рис. 5.2 Структура многопроцессорного компьютера ПС-2000



Перечислим особенности архитектуры ПС-2000, которые обеспечили ей высокую гибкость и эффективность вычислений.

- Команды в общем потоке команд обладают повышенной функциональной гибкостью программного управления разнообразными видами аппаратного параллелизма. Это качество достигается за счёт эффективного иерархического структурирования большого множества одновременно исполняемых операций.
- Виды программно управляемого параллелизма:
  - одновременное выполнение во всех ПЭ множества разнотипных действий (активация, вычислительные операции, вычисление адресов, доступ к модулям оперативной памяти, межпроцессорные пересылки данных);
  - одновременный обмен данными между модулями оперативной памяти ПЭ и набором дисководов через автономные каналы системы внешней памяти (СВП);
  - действия в мониторной подсистеме (МПС): управление процессами внешней операционной системы.
- Наличие значительных объёмов регистровой памяти ПЭ. В них параллельно во всех активных ПЭ в темпе максимальной тактовой частоты синхронно реализуются массовые вычисления и межпроцессорные обмены при исполнении циклических участков программ. Для циклов с большим числом повторений доля обращения к более медленным модулям оперативной памяти ПЭ может быть малой. В этом случае регистры реализуют положительный эффект программно управляемого кэширования (причём, с параллельным выполнением массовых вычислительных действий во многих ПЭ).
- Набор однотипных устройств адресной арифметики  $L$  во всех ПЭ обеспечивает параллельный расчёт набора различных адресов для

памяти М в различных ПЭ.

- Набор однотипных устройств активации Т в ПЭ обеспечивает высокий уровень параллелизма в реализации ассоциативной обработки больших массивов данных (поиск и сортировки по программно задаваемым предикатным функциям, реализация теоретико-множественных операций, обработка растровой графики, событийное управление вычислительными действиями).

Пиковая производительность ПС-2000, равная произведению быстродействия арифметико-логического устройства S на число ПЭ, достигается за счёт одновременного исполнения вычислительных операций в устройствах S ПЭ и управляющих действий в других функциональных устройствах. К таким действиям относятся считывание команд, считывание операндов и запись результатов, модификация адресов операндов, активация ПЭ, межпроцессорные обмены, управление конфигурацией и т.п.

Эффективное управление реализуется на основе следующих принципов [18]:

- применение отдельных блоков памяти для хранения команд, векторных и скалярных данных с возможностью одновременного доступа к ним;
- применение значительных объёмов регистровой памяти в функциональных вычислительных устройствах;
- взаимодействие с памятью через независимые от вычислений действия чтение/запись с простой адресацией;
- применение форматов команд одинакового размера, разбитых на поля, в которых задаются независимые трёхадресные регистровые операции;
- простая дешифрация команд;
- аппаратная поддержка исполнения команд;

- совмещение программным путём нескольких параллельно исполняемых действий разной длительности (совмещение нескольких статических конвейеров).

Такие принципы получили распространение в более поздних разработках компьютеров с VLIW-архитектурами [19]. Развитие предложенных принципов в применении к высокопараллельным компьютерным архитектурам актуально и в настоящее время.

## 5.2. Масштабируемость архитектуры ПС-2000

Многопроцессорный компьютер комплектуется из модулей трёх типов, каждый из которых размещается в одной стойке. Модули масштабирования комплектуются из устройства обработки (УО), состоящего только из 8 ПЭ, и ОУУ.

Состав модулей следующий:

- модуль базовый, имеет одно УО (8 ПЭ) и одно ОУУ;
- модуль наращивания 1, имеет одно УО (8 ПЭ);
- модуль наращивания 2, имеет два УО (16 ПЭ).

На рис. 5.3 показаны разные по числу ПЭ конфигурации многопроцессорного компьютера в стоечном исполнении модулей масштабирования.

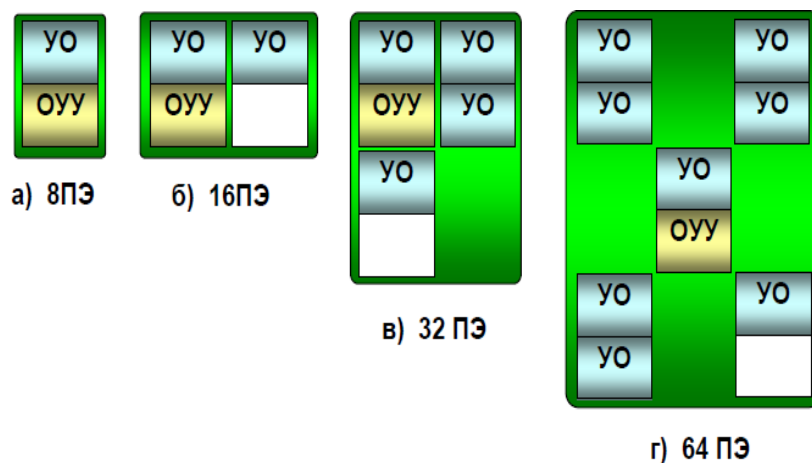


Рис. 5.3. Конфигурации масштабирования многопроцессорного компьютера ПС-2000 на уровне стоек

Минимальная конфигурация (8 ПЭ) состоит из одной стойки (рис. 5.3,а). Максимальная конфигурация (64 ПЭ) состоит из пяти стоек, размещённых в виде "звезды" (рис. 5.3,г).

Масштабируемость архитектуры ПС-2000 (рис. 5.3) обеспечивается системой команд, позволяющей изменять количество ПЭ и объём памяти в ПЭ. Регулировка числа ПЭ обеспечивается сегментацией регулярного и магистрального каналов. Относительная регистровая адресация памяти Мпозволяет адресовать до 16Кслов в каждом ПЭ при общей и локальной адресации.

### 5.3. Экспедиционный геофизический комплекс ПС-2000

В состав экспедиционного геофизического комплекса (ЭГВК) ПС-2000 [16], см. рис. 5.4, входит многопроцессорный компьютер, мониторная подсистема (МПС) и от одной до четырёх подсистем внешней памяти (СВП), обеспечивающих параллельно-асинхронную работу нескольких каналов ввода/вывода в режиме одновременного функционирования многих магнитных носителей информации (на дисках и лентах).

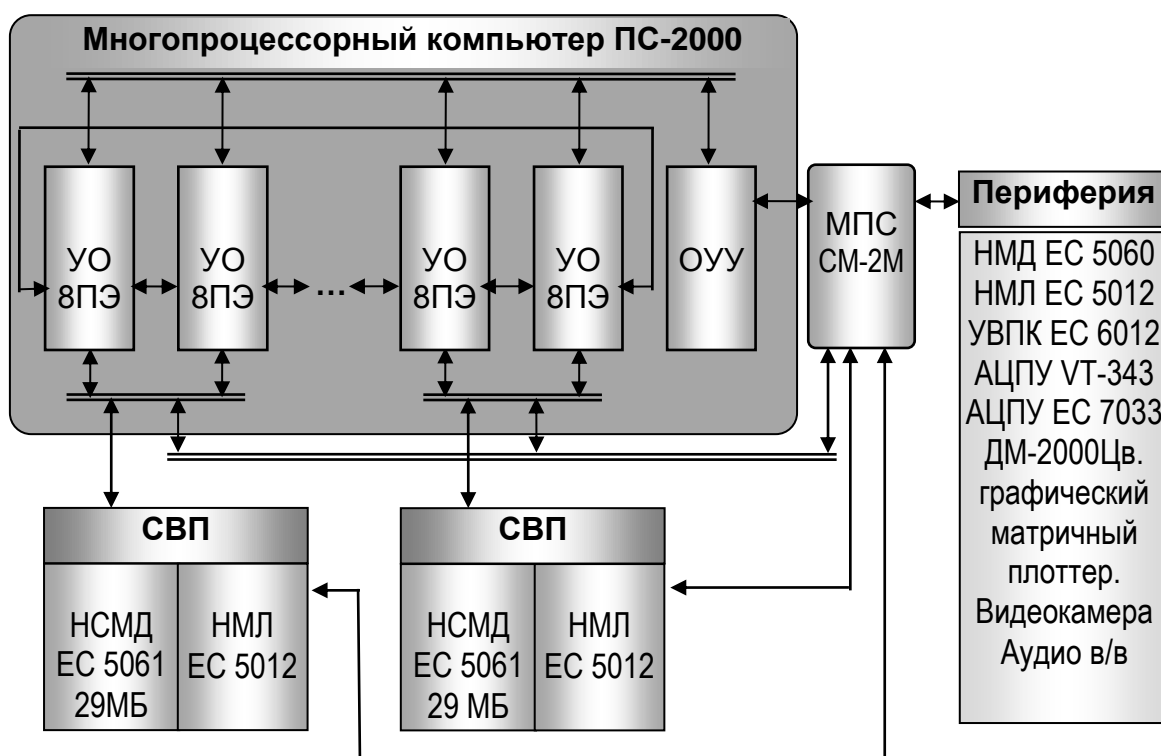


Рис. 5.4. Структура ЭГВК ПС-2000

При работе с физическими объектами в реальном времени возможно подключение потоков информации к распределённой по процессорным элементам памяти ПС-2000 как через СВП, так и через специальные высокоскоростные каналы.

Мониторная подсистема (МПС) на базе малой управляющей ЭВМ СМ-2М реализует функции операционной системы, управляет асинхронным функционированием нескольких СВП, осуществляет трансляцию, редактирование текстов, исполнение вспомогательных программ, управление собственной периферией, включая внешнюю память, различные средства ввода/вывода.

#### ***5.4. Примеры промышленного применения ЭГВК ПС-2000***

Уникальные особенности высокопараллельной архитектуры суперкомпьютера ПС-2000 – простота, вычислительная эффективность и, одновременно, уникальная для архитектур класса SIMD гибкость управления разными видами аппаратного параллелизма – обеспечили его широкое использование для решения задач высокой вычислительной сложности в различных областях народного хозяйства. Они включают разведку месторождений нефти и газа, создание комплексов обработки гидроакустической и телеметрической информации в реальном времени, управление космическими аппаратами, компьютерное моделирование сложных явлений и систем, выполнение вычислительных экспериментов, решение задач математической физики и многое другое.

Областью наиболее широкого промышленного применения ЭГВК ПС-2000 стала геофизика, которая объективно нуждалась в компьютерах такого класса. Быстрорастущие стеллажи из внушительных катушек магнитных лент (размером с большую тарелку каждая) с записями данных сейсморазведки, годами безмолвно хранивших нефтяные и газовые секреты, предопределили успех ПС-2000. Уже в 70-е годы сейсмическая

разведка настолько успешно "просвечивала" и записывала на ленты километровые глубины недр Родины, что, буквально, с головой засыпала катушками архивы вычислительных центров. В год удавалось расшифровывать лишь несколько процентов того, что ежегодно поступало от 1000 геофизических партий за один сезон разведки.

Для обработки данных сейсмической разведки месторождений нефти и газа во ВНИИ "Геофизика" (г. Москва) при участии ИПУ РАН была создана система промышленной обработки геофизической информации СОС-ПС. В отрасли успешно эксплуатировалось около 90 ЭГВК ПС-2000, обеспечивающих углублённую обработку значительной части данных сейсморазведки нефти и газа.

ЭГВК ПС-2000 создавался в соответствии с требованиями Министерства геологии и являлся единственной в стране экспедиционной рабочей станцией полностью оснащённой всем необходимым оборудованием для обработки данных сейсморазведки в полевых условиях [16]. ЭГВК ПС-2000 не требовал большой площади, имел сравнительно малое энергопотребление, низкие эксплуатационные расходы, обеспечивал высокую надёжность при работе в условиях геофизических экспедиций, его стоимость составляла около 800 тыс. рублей, что было в десятки раз меньше стоимости зарубежных суперкомпьютерных систем сопоставимой производительности.

Применение ЭГВК ПС-2000 позволило отказаться от импорта дорогостоящих зарубежных вычислительных комплексов. Подтверждённый экономический эффект от использования только полутора десятков ЭГВК ПС-2000 составил более 200 млн. инвалютных рублей (1 и.р.= \$1.43), при том, что на разработку компьютеров ПС-2000 было затрачено около 15 млн. "обыкновенных" руб.

На базе нескольких комплексов ПС-2000 были созданы высокопроизводительные (до 1 млрд. операций в секунду) системы обработки гидроакустической и телеметрической информации в реальном масштабе времени. Каждая система содержала несколько ВК ПС-2000, соединённых в конвейер. Для многоканального ввода и вывода гидроакустической, спутниковой информации для таких систем создавались специализированные высокоскоростные каналы с прямым доступом в распределённую память М каждого ПЭ.



Рис. 5.5. ВК ПС-2000 в ЦУП (тёмные стойки на дальнем плане)

ВК ПС-2000 активно и длительное время использовались в центре управления космическими полётами (ЦУП). Первые комплексы ПС-2000 поступили в ЦУП в 1982 г., последние – в 1988 г. Всего было задействовано восемь 32-процессорных комплексов.

ВК ПС-2000 в составе телеметрического вычислительного комплекса ЦУП (см. рис. 5.5) использовались с 1986 г. по 1997 г., в качестве системы предварительной обработки телеметрической информации. К одной

центральной системе "Эльбрус-2" была подключена пара 32-процессорных ЭГВК ПС-2000 для обработки восьми полных потоков телеметрии<sup>1</sup>.

С целью повышения надёжности параллельно работали два телеметрических комплекса, а на динамических участках полёта космических объектов - три.

С 1986 г. в составе телеметрического вычислительного комплекса ЦУП-М они использовались для обеспечения ряда космических объектов: станции «Салют» (на заключительном этапе ее существования), станции «Мир», включая базовый модуль, технологические и научные модули «Квант-1», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа», транспортных кораблей «Союз-ТМ», грузовых кораблей «Прогресс», «Прогресс-М», многоразового космического корабля «Буран», аппаратов дальнего космоса «Фобос-1», «Фобос-2», научного модуля «Гамма».

Высокий параллелизм обработки информации в ПС-2000 позволил реализовать новые алгоритмы обработки телеметрической информации.

ВК ПС-2000 широко использовались в различных сферах для моделирования и научно-инженерных расчётов, а также для обработки данных в реальном времени в составе испытательных стендов, систем управления и др.

### **5.5. Задача сейсмической миграции**

Одной из наиболее представительных задач широкого промышленного применения для ПС-2000 явилась задача сейсмической миграции [20].

На рис. 5.6 представлена схема получения данных сейсмической разведки и последующего расчёта глубинного разреза земли. На поверхности земли с интервалом 25 м расставлены датчики, которые

---

<sup>1</sup> Такой гибридный комплекс можно рассматривать как прообраз современных петакомпьютеров, в которой совместно функционируют многопроцессорные кластеры общего назначения (MIMD) и высокопараллельные ускорители (SIMD) с массовым параллелизмом. В телеметрических комплексах ЦУП – это Эльбрус-2 и ПС-2000, соответственно.



каждые 2 мс фиксируют отражённые от границ сред с различной плотностью сигналы, поступающие от источника сейсмических волн.

Это пример задачи, в которой на одно вводимое данное приходится много вычислительных действий, что позволило максимально продемонстрировать достоинства архитектуры ПС-2000, обеспечив максимальное использование всех видов машинного параллелизма многопроцессорного компьютера, включая заявленную пиковую производительность 200 Mips.

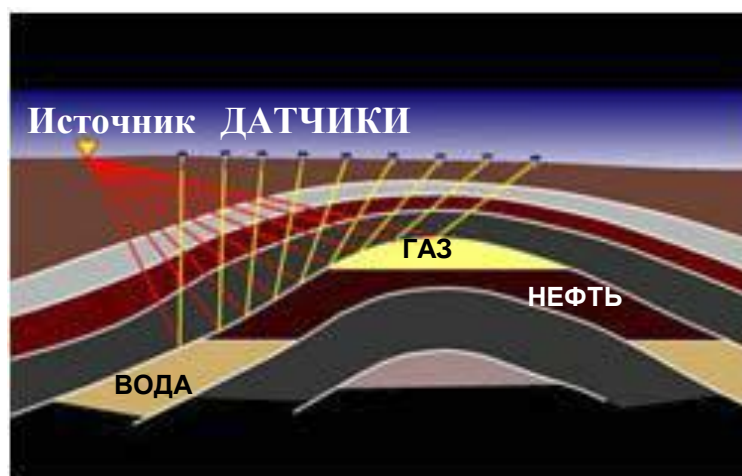


Рис. 5.6. Схема получения экспериментальных данных для сейсмического моделирования глубинного разреза земли (изображение взято из сети Интернет)

В экспериментальных данных зафиксированы интегральные значения отражённых сигналов, приходящих в каждый момент времени от многих точек границ сред различной плотности. Задача сейсмической миграции – восстановить границы сред различной плотности глубинного разреза земли.

Временной разрез земли рассчитывается по данным сейсморазведки недр, содержащим 1000÷2000 сейсмотрасс, привязанным к точкам на поверхности земли с пространственными координатами  $x_i$ , в которых установлены датчики (рис.5.6). Каждая сейсмотрасса содержит 3000 значений измерений, каждое значение имеет свой момент времени  $t_j$ . Входные данные – зафиксированные датчиками отражённые сигналы

(сейсмотрассы) – на рис. 5.7 расположены под осью  $x$  в виде вертикальных волнистых кривых. Все точки этих кривых задаются матрицей чисел  $f(t_j, x_i)$ .

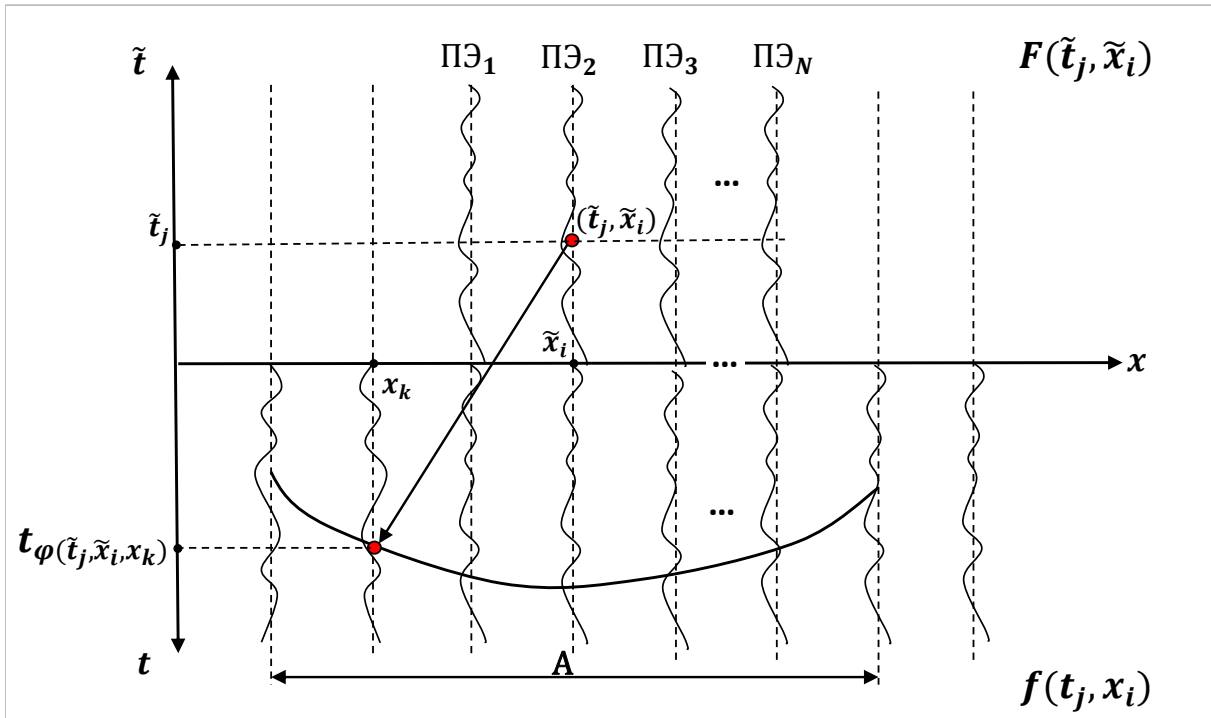


Рис. 5.7. Интегрирование по годографу в пределах апертуры

Выходные данные расположены над осью  $x$ , также в виде вертикальных волнистых кривых, которые представляют собой мигрированный временной разрез. Он представлен матрицей  $F(t_j, x_i)$ , полученной в результате обработки методом быстрого сейсмологографического преобразования Кирхгофа [21], суть которого состоит в прямом интегрировании цилиндрического волнового уравнения в соответствии с формулами:

$$\|F(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i)\| = \sum_{k=(\tilde{x}_i-A/2)/\Delta x}^{(\tilde{x}_i+A/2)/\Delta x} f(t_{\varphi}(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i, x_k), x_k), \quad (1)$$

$$\text{где } t_{\varphi}(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i, x_k) = \frac{r(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i, x_k)}{v(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i)},$$

$$r(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i, x_k) = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_k)^2 + (\tilde{t}_j \times v(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i))^2},$$

$v(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i)$  – внешние параметры, среднелучевая скорость в точке  $(\tilde{t}_j, \tilde{x}_i)$ .

Кривые годографов для каждой искомой точки вычисляются в соответствии с формулой (1) имеют "гиперболический" вид, изображённый на рис. 5.7 под осью  $x$ .

```

01630 ****
01631 *
01632   ZC(C+RD);
01633   ZM(C+RD);
01634   ZCNL;
01635   P(B=C);
01636   B(+1);
01637   P1(C=B) #   WA(U=I3+1);   FI->RD
01638   RD=C;
01639   P(B+R5) #   I3=U;
01640   B(+1) #   MR(LD);
01641   P1(C=B);
01642   R5=C #   G(BEPT)/U<=J7;
01643 *****
01644   P(M=RD) #   U=I8;
01645   P(C=R5) #   MUW,WA(U=U+1); ЗАПИСЬ В М FI

```

Рис. 5.8. Вычисление в N ПЭ значений  $F(t_j, x_i)$ ,  $(i=1, N)$  с записью N результатов одновременно в N ПЭ

На рис. 5.8 приведено ядро массовых вычислений программы сейсмической миграции (1), написанное на МИКРОКОДЕ ПС-2000. Здесь последовательность трех операций: 1) ZC(C+RD); 2) ZC(C+RD); 3) ZCNL; задаёт сложение с плавающей запятой.

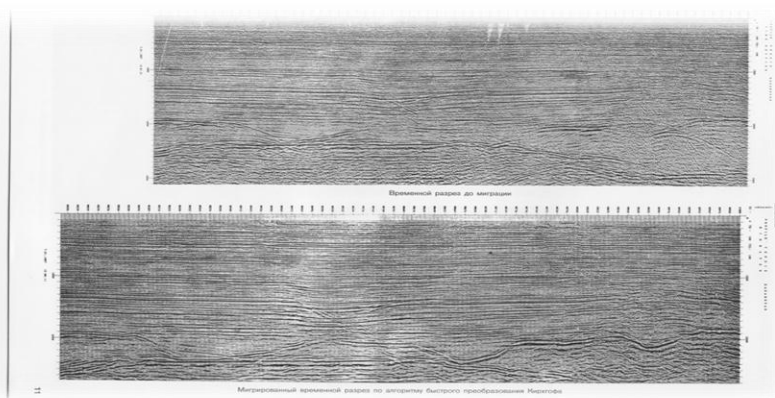


Рис. 5.9. Пример обработки на ПС-2000 [20] временного разреза по алгоритму быстрого преобразования Кирхгофа [21]

На рис. 5.9 вверху приведён исходный временной разрез, внизу – мигрированный временной разрез.

Высокоскоростная обработка растровой графики для вывода на матричный плоттер исходных трасс и мигрированного разреза (изображены на рис. 5.9) также производилась на ПС-2000 по специально разработанным алгоритмам.

Решение задачи сейсмической миграции на ПС-2000 позволило ввести в повседневную практику геологоразведочных экспедиций вторичную обработку промышленных данных сейсморазведки. Ранее решение этой задачи было возможно только в стационарных условиях региональных вычислительных центров, при этом обработка одного разреза на БЭСМ-6 занимала более 5 часов против 3-7 минут на ПС-2000.

Производительность близкая к пиковой (~99%) достигнута за счёт полного и одновременного использования всех видов аппаратного параллелизма:

- массовые вычисления и межпроцессорные обмены производятся с данными, расположенными в регистрах;
- выборка данных из памяти производится параллельно во всех ПЭ по индивидуальному для каждого ПЭ адресу и совмещается во времени с массовой обработкой в регистрах;
- подготовка и приём внешних данных системой внешней памяти (СВП) и ввод/вывод данных в/из память ПЭ по КПДП производятся параллельно между собой и с обработкой.

В GP GPU nVIDIA при решение задачи сейсмической миграции используется 15% пиковой производительности. Одна из причин – обращение к общей памяти, которое занимает около 800 тактов, по сложно вычисляемым в ходе решения задачи адресам к значениям функции  $f(t_j, x_i)$ ,

что не позволяет формировать данные для считывания строки в темпе выполнения вычислительной обработки.

### ***5.6. Возможности гибридной архитектуры ЭГВК ПС-2000***

Важнейшая особенность высокопараллельной архитектуры ПС-2000 состоит в том, что её эффективность не определяется жёсткой привязкой к особенностям технологической базы. Это нашло подтверждение в том, что, несмотря на более чем скромные возможности задействованной элементной базы, по показателям абсолютной производительности компьютеры ПС-2000 благодаря преимуществам своей архитектуры длительное время находились на достойных позициях мирового списка суперкомпьютеров Top500. При том, что рабочая частота в десятки раз уступала соседям по списку. По потенциалу совершенствования экономического показателя производительность/стоимость эта архитектура остаётся одной из лучших в своём классе и в настоящее время.

Архитектура ПС-2000, в отличие от современных аналогов по сферам применимости – однокристальных ускорителей GP GPU, изначально создавалась и балансировалась не под узкие, а под широкие классы задач с массовым параллелизмом с применением экономически рентабельного показателя – максимума производительности на единицу оборудования и стоимости. Она вполне отвечает основным требованиям, предъявляемым сегодня к однокристальным ускорителям класса GP. Прежде всего, это – высокая реальная производительность в расчёте на транзистор, себестоимость и единицу энергопотребления.

Принципы построения его оригинальной, высокоэффективной и масштабируемой архитектуры, опередившей своё время, практически не зависят от элементной базы, в которой она реализуется.

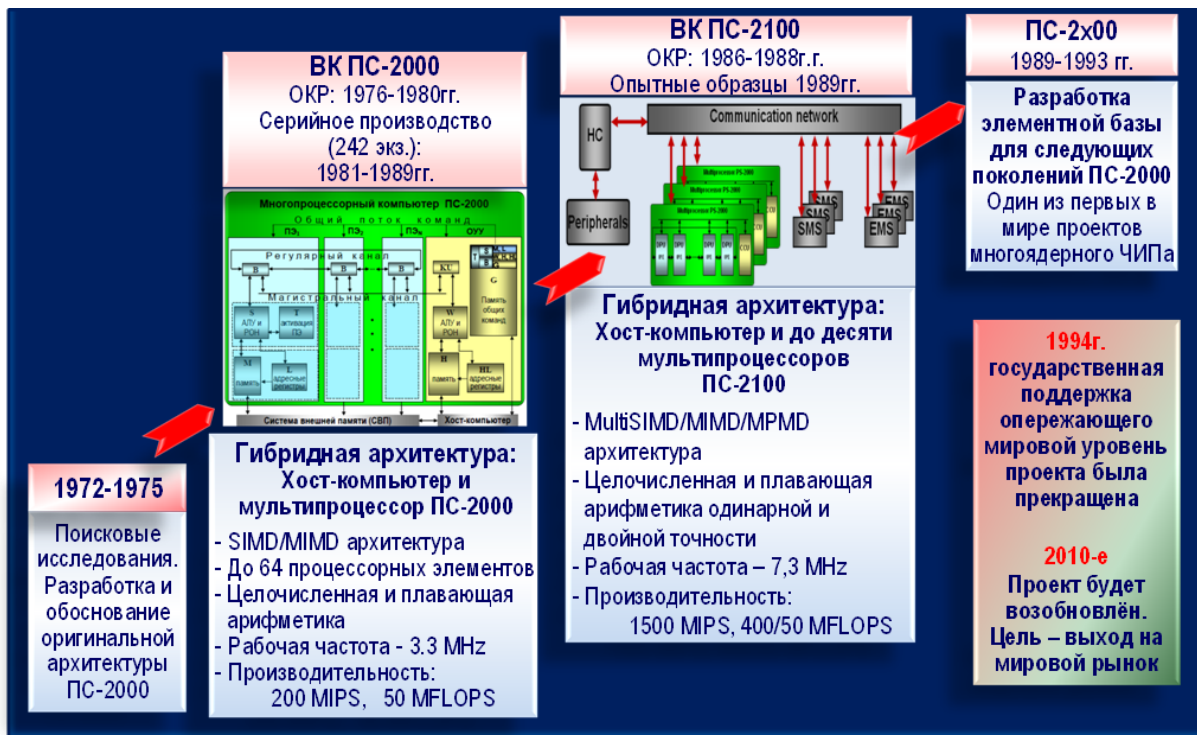


Рис. 5.10. Развитие архитектурной линии PS-2000.

На рис. 5.10 показана линия развития архитектуры PS-2000.

Эффективность архитектуры и рентабельность компьютера PS-2000 подтверждена широкой практикой использования в разнообразных сферах промышленной и научно-инженерной обработки данных. Как уже говорилось, в большинстве применений эффективность использования процессорных элементов составила около 80% и выше. Важно отметить, что PS-2000 эффективно использовалась и в системах реального времени, а также в управлении большими базами данных.

Важно отметить, что, как видно на рис. 5.10, промышленные ВК на базе масштабируемых мультипроцессоров PS-2000/2100 строились по гибридной архитектуре {Универсальный компьютер (Хост-машина: здесь СМ-2)} & {Многопроцессорный ускоритель (Собственно мультипроцессор PS-2000)}. Назначение гибридных архитектур – сочетание достоинств последовательных универсальных компьютеров со стандартными ОС и многопроцессорных компьютеров, обеспечивающих на задачах с массовым параллелизмом повышение производительности на порядки.

Гибридные архитектуры в настоящее время лежат в основе систем высокой и сверхвысокой производительности и широко используются в мировой практике компьютеростроения.

Использование уникального обширного промышленного опыта производства и применения ВК ПС-2000 с гибридной архитектурой даёт основу для возобновления архитектурной линии на базе современных СБИС-технологий и успешной реализации проекта однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М, о котором будет сказано далее.

## **6. Инновации: государство и люди**

Инновации – это всегда личности. Разных поколений, опыта, профессий, положений. Неравнодушные, способные не только заглянуть в будущее, но изменить привычное течение. ПС-2000 с этим повезло.

### **6.1. Инновации – дело государственное**

Принятие государственных решений требует полноты знаний о состоянии ведущих отраслей народного хозяйства и наличие стратегии его развития, правильной оценки интеллектуальных и производственных ресурсов, подбор ответственных лиц, способных воплотить полный инновационный цикл – от научных идей до промышленного освоения.

Определяющий вклад в принятие решения об инициации финансирования работ по созданию и промышленному производству и внедрению ВК ПС-2000 внесли руководители высоких государственных уровней.



**Н.К. Байбаков**  
Председатель Госплана СССР

Н.К. Байбаков – Председатель Госплана СССР (1965-1985), ранее Министр нефтяной промышленности (1944-1955). Обладая необходимой полнотой знаний о текущем состоянии народного хозяйства и стратегией его развития, увидел основные отрасли



**Е.А. Козловский**  
Министр Геологии СССР

применения перспективных высоко-производительных и экономичных ВК ПС-2000. Как показало время, правильно определил головного заказчика – Министерство геологии СССР.

Благодаря усилиям Е.А. Козловского – Министра геологии (1975–1989), его ведомство обладало развитой общесоюзной информационной инфраструктурой сбора, накопления и первичной обработки



промышленных сейсморазведочных данных при поиске нефти и газа, в основе которой лежали вычислительные комплексы на базе мини-ЭВМ СМ-1/2, производившиеся на предприятиях Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР (Минприбор).



**К.Н. Руднев**  
Министр  
Приборостроения,  
средств автоматизации и  
систем управления СССР

К.Н. Руднев, возглавлявший Минприбор с 1965 по 1980г.г., взял на себя ответственность в индустриальном продвижении принципиально новой, разработанной в академическом Институте, концепции многопроцессорных компьютеров ПС-2000, а вместе с этим и все инновационные риски, связанные с вложением немалых ресурсов в промышленное освоение принципиально новых идей.



Академик  
**А.П.Александров**

А.П. Александров – академик, Президент Академии Наук СССР (1975– 1986), понимавший стратегическое значение компьютеров сверхвысокой производительности, разделил с министром К.Н. Рудневым ответственность за выдвижение инициативы, исходившей из Института проблем управления – одного из ведущих институтов в области наук об управлении, возглавляемого академиком В.А. Трапезниковым (1951-1987).



Академик  
**В.А. Трапезников,**  
директор ИПУ (ИАТ)

Институт находился в двойном подчинении – Академии Науки и Минприбора, что сокращало путь крупномасштабных инновационных академических проектов к промышленному внедрению и широкому использованию высокотехнологичной продукции в народном хозяйстве. И это – несомненная заслуга

директора ИПУ – академика В.А. Трапезникова, понимавшего огромное значение фундаментальной науки в индустриальном развитии страны.

Восстановление тесных связей академической науки и промышленности – необходимое условие построения современной инновационной экономики РФ.

## 6.2. Инновации – беспокойный союз науки и производства



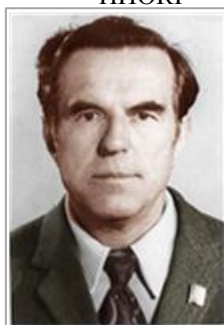
**М.С. Шкабардя**  
Министр  
Приборостроения,  
средств автоматизации и  
систем управления СССР  
1980-1989г.г.

Ответственность за исполнение выдвинутых инициатив и принятых решений взяли на себя М.С. Шкабардя (зам. министра, затем в 1980-1989г.г.– Министр приборостроения, средств автоматизации и систем управления) и И.В. Прангишвили (зам. директора в 1970- 1987г.г. и директор ИПУ в 1987- 2006г.г.).



**И.В. Прангишвили,**  
научный руководитель  
НИОКР

Тяжесть организации всего комплекса работ от научного обоснования до проектирования, освоения промышленного производства и внедрения ЭГВК ПС-2000 была возложена на И.В. Прангишвили – научного руководителя НИОКР по всей гамме компьютеров ПС, а также руководителей ведущих предприятий Минприбора, имевших огромный опыт



**А.А.Новохатный**  
директор НПО  
"Импульс"



**В.В. Резанов**  
директор  
НИИ УВМ)

разработки и промышленного производства управляющих вычислительных машин и комплексов, А.А. Новохатного– директора НПО "Импульс" (1959-1987г.г.) и В.В. Резанова – директора НИИ УВМ и зам. директора НПО "Импульс" (1958 –

1994г.г.) (г. Северодонецк). Благодаря усилиям возглавляемых ими коллективов в кратчайшие сроки был осуществлен весь комплекс работ по внедрению – от опытно-конструкторских разработок до промышленного производства ВК ПС-2000.

### ***6.3. Инновации–искусство материализации востребованных идей***

Идеи однородных и ассоциативных структур, которые в конце 60-х активно развивал И.В. Прангишвили и его сотрудники, нашли понимание и всестороннюю поддержку академика В.А. Трапезникова. Это были те направления в области высокопараллельных вычислительных структур, которые находились в сферах повышенного внимания передовых исследований, поскольку открывали новые возможности развития перспективных классов высокопроизводительных компьютеров.

В архитектуре многопроцессорного компьютера ПС-2000 эти идеи получили оригинальное развитие с учётом мирового опыта разработки многопроцессорных архитектур класса SIMD.

Свойство перестраиваемости однородных структур с использованием ассоциативных механизмов активации в архитектуре ПС-2000 было обобщено на уровень процессорных элементов, связанных программно управляемой системой межпроцессорной коммутации. Благодаря этому решающее поле обрело возможности программно перенастраиваться на структуры различных задач, что сделало возможным распараллеливание вычислений в высокоэффективных режимах перестраиваемых систолических структур.

Значительная по объёму, гибко адресуемая оперативная память, распределённая по процессорным элементам, позволила существенно расширить классы эффективно решаемых задач посредством высокопараллельной, в том числе ассоциативной, обработки больших объёмов данных.

В отличие от известных на то время многопроцессорных компьютеров, архитектура ПС-2000 оптимизировалась посредством максимизации экономически значимого критерия производительность/стоимость. Такое решение было направлено на формирование нового класса компьютеров с массовым параллелизмом, отвечающих индустриальным и экономическим требованиям широкой применимости в разнообразных сферах.

Определяющий вклад в разработку принципов, научное обоснование и проектирование архитектуры многопроцессорного компьютера ПС-2000 внесли:

от ИПУ – И.Л. Медведев, С.Я. Виленкин, Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко;

от НИИ УВМ: И.И. Итенберг, А.С. Набатов, Н.И. Голован, Г.Ю. Пивоваров.

Важный вклад в разработку и внедрение программного обеспечения мультипроцессора ПС-2000 внесли:

от ИПУ – С.Я. Виленкин, Е.Р. Лазебник, И.И. Паишев, Е.Г. Сухов;

от ВНИИ "Геофизика" – В.М. Крейсберг, А.А. Богданов – разработка СОС-ПС (системы обработки сейсмоданных), при участии ряда сотрудников ИПУ – О.И. Лапшенкиной, И.М. Гришиной, А.В. Неймана, Е.Т. Амелиной.

Неоценимый вклад в разработку системного и прикладного ПО вносили сотрудники многих организаций и ведомств страны, где активно использовались десятки и сотни ВК ПС-2000.

#### ***6.4. Страница одной биографии***

Создание новых компьютеров – труд многих специалистов. В большей по объёму и самой заметной части это высокоинтеллектуальное ремесло. В меньшей – исключительной, доступной только посвящённым, – искусство.

Для нового, опережающего своё время компьютера, эта "меньшая" предопределяет его дальнейшую судьбу. Подменить её отсутствие или незрелость не сможет даже самое высокое ремесло. Далее макета или опытных образцов дело не двинется.

Состоявшееся озарение вбрасывает потоки особой энергии. Она придаёт силы противостоять неприятию скептиков, на удивление сплочённых и агрессивных. Высвечивает среди настоящих профессионалов единомышленников, вовлекает их в процесс творения неведомого. Сопричастность объединяет очень разных, но самых компетентных и креативных. Формируется аура неформального внесистемного единения. В многопроцессорном компьютере ПС-2000 удивительным образом материализовался романтический идеализм его начинателей. Это нетипично, но случается.



*И.Л. Медведев*  
14.06.1930-29.10.1998

Искусство опирается на творца. Тайна творения кодируется в неповторимом сплаве таланта, личности и ... обстоятельств. Есть такой код и в архитектуре ПС-2000. Имя кодообразующей персоны: Медведев Израиль Львович. Он был и остаётся известным не очень многим. В основном, его единомышленникам и оппонентам. В числе их было почти поровну, но по весу регалий "паритет" соблюдался далеко не всегда.

Блестящая интуиция учёного, многогранный и неукротимый талант инженера и конструктора. Медведеву удалось из массы вариантов структурных решений извлечь фундаментальные принципы удивительно простой и стройной высокопараллельной архитектуры, уникально гибкой и эффективной. Он смог главное – не только увидеть новую идеологию, сформировать облик высокопараллельной архитектуры, но и упаковать её в оригинальное системообразующее архитектурное ядро [22].

Архитектурное ядро ПС-2000 фундаментально, потому самоценно и принадлежит будущему. Может с успехом воплощаться как в примитивной россыпи элементной базы 70-х, так и в новейших кристаллах СБИС глубокого нанометрового диапазона с миллиардами транзисторов.

Его целеустремлённая самодостаточность и сверхубеждённость, необычайная и разносторонняя трудоспособность помогли уберечь и пронести целостность идеологии через ухабы многочисленных этапов технической материализации. Такое даётся немногим.

Он был одним из первых выпускников МЭИ, получивших классическое образование по специальности "Вычислительная техника", имел опыт работы на производствах по выпуску ЦВМ "Урал" и др. В ИПУ прошёл блестящую научную школу управления, закончив аспирантуру и защитив кандидатскую диссертацию в лаборатории академика Я.З. Цыпкина.

Начав свою многопроцессорную эпопею в 1972 г., в зрелые 42 года, Медведев 20 лет вёл своё детище по всему жизненному циклу – от первых разрозненных идей до полномасштабного его применения в разнообразных сферах народного хозяйства. Брал на себя самое трудное и рискованное.

И сейчас, спустя годы, не пропадает чувство удивления: как много ему, не располагавшему "волшебной палочкой" административного ресурса, удавалось поступать значимо и делать так много.

*Рабочий момент начала 80-х. В.А. Трапезников (директор ИПУ) и И.Л. Медведев (справа) в машинном зале ПС-2000. (Фото снято видеокамерой и распечатано на матричном плоттере, подключенном к ВК ПС-2000 с обработкой изображения на многопроцессорном компьютере ПС-2000)*



Продвигая новые идеи, Медведев сохранял творческую независимость. Без этого невозможна бескомпромиссная защита принципиальных решений в ходе неформального авторского надзора. Этим он не снискал больших должностей и регалий, но его неформальное лидерство было ощутимым и незаменимым. Десятки специалистов из разных городов, разных возрастов и даже поколений, в чьих руках оказалась судьба ПС-2000, знали Медведева, многие искали с ним встреч, чтобы в критические моменты найти правильные пути.

И.Л. Медведев, работая в Институте проблем управления, в начале 70-х выдвинул идеи и архитектурные принципы нового класса многопроцессорных компьютеров–высокорентабельных систем общего назначения с массовым параллелизмом, ориентированных на широкие применения в разнообразных сферах. Многопроцессорный компьютер ПС-2000 стал заметным вкладом в отечественное и мировое [5,6] компьютеростроение. В 80-х, несмотря на заведомо устаревшую элементную базу, он находился в мировом рейтинговом списке суперкомпьютеров.

Идеи д.т.н. И.Л. Медведева все более актуальны и в наше время. Они конкурентоспособны и ждут своего полномасштабного воплощения в новейших технологиях сверхбольших интегральных схем глубокого нанометрового уровня.

## **7. Однокристалльный многопроцессорный компьютер ПС-2000М**

Последующий анализ и сравнение с существующими на рынке многоядерными архитектурами в целях оценки перспектив достижения конкурентоспособности проводится с учётом результатов исследований [24,25], направленных на развитие архитектурной линии ПС-2000 в

расчёте на применение современных технологий нанометрового диапазона 40-28-20-14-10нм.

### ***7.1. Тенденции развития элементной базы для высокопроизводительных вычислений***

Преимущества однокристалльных многопроцессорных архитектур для высокопроизводительных вычислений определяются совмещением двух ключевых факторов:

- высокой удельной производительностью, снимаемой с единицы площади кристалла в широком диапазоне классов задач с массовым параллелизмом, что позволяет снизить тепловой барьер;
- пропорциональным ростом производительности при снижении технологических норм (40-28-20-14-10нм), для чего архитектура должна изначально обладать свойством структурной масштабируемости, позволяющим наращивать параллелизм и объёмы памяти внутри кристалла без потери эффективности и с сохранением программной совместимости.

Исходя из современных тенденций развития элементной базы, можно сформулировать и требования к новым архитектурам:

- достижение высоких значений КПД (80% и выше) параллельных вычислений для различных классов задач с массовым параллелизмом на уровне вычислительных операций, что должно существенно повысить реальную производительность и вычислительную энергоэффективность (производительность/Ватт);
- обеспечение возможностей формирования компактных, а также распределённых, сверхбольших вычислительных сред с количеством программно управляемых вычислительных ядер в диапазоне  $10^6 - 10^9$  и более, для чего потребуется обеспечить:
  - структурную масштабируемость многопроцессорных архитектур на



- внутри- и межкристальном уровнях с одновременной масштабируемостью программного обеспечения;
- комплексированность аппаратных и программных средств в рамках гибридных архитектур, совмещающих традиционные микропроцессорные и высокопараллельные архитектуры;
  - высокую надёжность вычислений в условиях сверхбольших вычислительных сред (отказоустойчивые, самоконтролирующиеся и самовосстанавливающиеся резервированные структуры и вычислительные процессы);
  - создание гибридных архитектур, объединяющих возможности универсальной последовательной обработки с использованием многоядерных микропроцессоров и высокопараллельной обработки с использованием процессоров с массовым параллелизмом.

## ***7.2. Описание развиваемых продуктов и областей применения***

Основным продуктом в области развития элементной базы является однокристалльный компьютер с гибридной архитектурой, объединяющий центральное процессорное устройство (ЦПУ), реализованное с использованием стандартных микропроцессорных ядер, и вычислительную систему с массовым параллелизмом на основе развития архитектуры ПС-2000. Однокристалльная многопроцессорная архитектура ПС-2000М является масштабируемой и программно совместимой архитектурой терафлопных уровней производительности (1-30Тфлопс и более) с реализацией на технологиях нанометрового диапазона. Архитектура обеспечивает достижение высоких показателей эффективности Флопс/Вт/мм<sup>2</sup>/\$ на широких классах задач с массовым параллелизмом.

### ***7.2.1. Особенности архитектуры***

Требования к балансировке многопроцессорной архитектуры, ориентированной на однокристалльное исполнение:

- параллелизм массовых операций требует гибкого межпроцессорного обмена промежуточными данными на регистровом уровне;
- возможность гибкого разделения общего транзисторного ресурса на кристалле между ресурсами обработки, хранения и коммутации;
- совмещение ввода-вывода данных со временем счёта;
- балансировка параллелизма на уровне массовых операций с уровнем системных процессов;
- структурная масштабируемость архитектуры внутри кристалла;
- комплексируемость архитектуры на межкристальном уровне<sup>1</sup>.

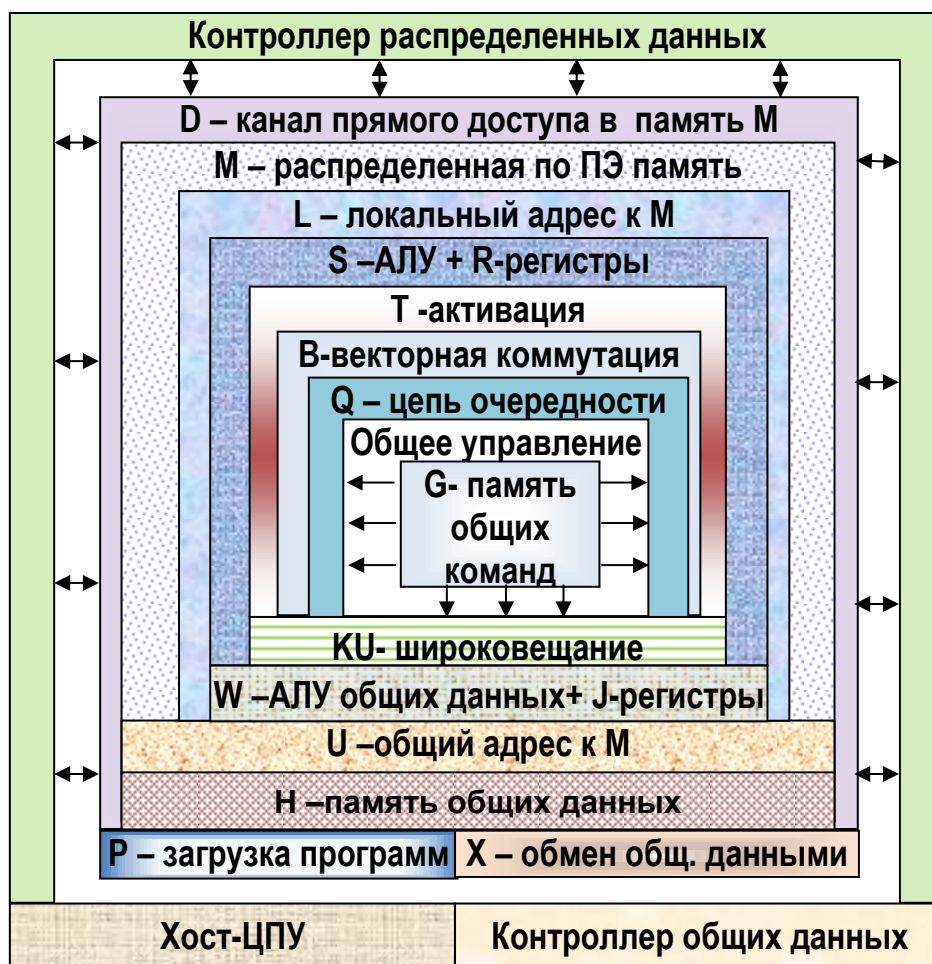


Рис. 7.1. Композиция базового вычислительного модуля ПС-2000М

<sup>1</sup> Нарращивание производительности за счёт соединения многопроцессорных кристаллов на уровне плат, блоков, стоек.

На рис. 7.1 представлена общая композиция кристалла базового вычислительного модуля (БВМ) многопроцессорного кристалла ПС-2000М.

Базовый вычислительный модуль строится как существенное развитие архитектуры ПС-2000 и содержит:

- общее устройство управление (ОУУ), содержащее:
  - память общих команд G;
  - ПЭ общих данных W со своей памятью данных H, адресным процессором HL и каналом ввода/вывода общих данных X;
  - регистр магистральной коммутации данных KU;
  - программно управляемый канал ввода/вывода P для обмена данными с ЦПУ;
- решающее поле (РП), содержащее:
  - набор из N ПЭ (АЛУ S + регистры R);
  - программируемые устройства активации T, обеспечивающие возможность индивидуального отключения каждого ПЭ по вычисляемым предикатам;
  - равномерно распределённую по ПЭ память M с локальной L и общей U косвенной регистровой адресацией;
- взаимодополняющие коммутирующие среды, содержащие:
  - В - векторный канал, обеспечивающий одновременный обмен данными между многими ПЭ;
  - KU – широковещательный канал, обеспечивающий передачу данных из ОУУ ко многим ПЭ;
  - Q - канал цепи очередности ПЭ, обеспечивающий последовательную передачу данных от выделенных ПЭ-передатчиков к выделенным ПЭ-приёмникам;
  - каналы прямого доступа Dv распределённую память ПЭ, связанные с

внешними источниками данных (датчики, внешние ЗУ, компьютеры, в том числе, однокристальные многопроцессорные компьютеры ПС-2000М и т.п.).

Базовые вычислительные модули (БВМ) внутри кристалла с помощью коммутационной сети, содержащей каналы обмена векторными Z и общими Y данными, в зависимости от решаемой задачи могут объединяться в параллельные и конвейерные структуры. На рис. 7.2 приведены примеры комплексирования базовых вычислительных модулей (БВМ) внутри кристалла ОМК ПС-2000М. БВМ в данном примере содержит 32 ПЭ и ОУУ.

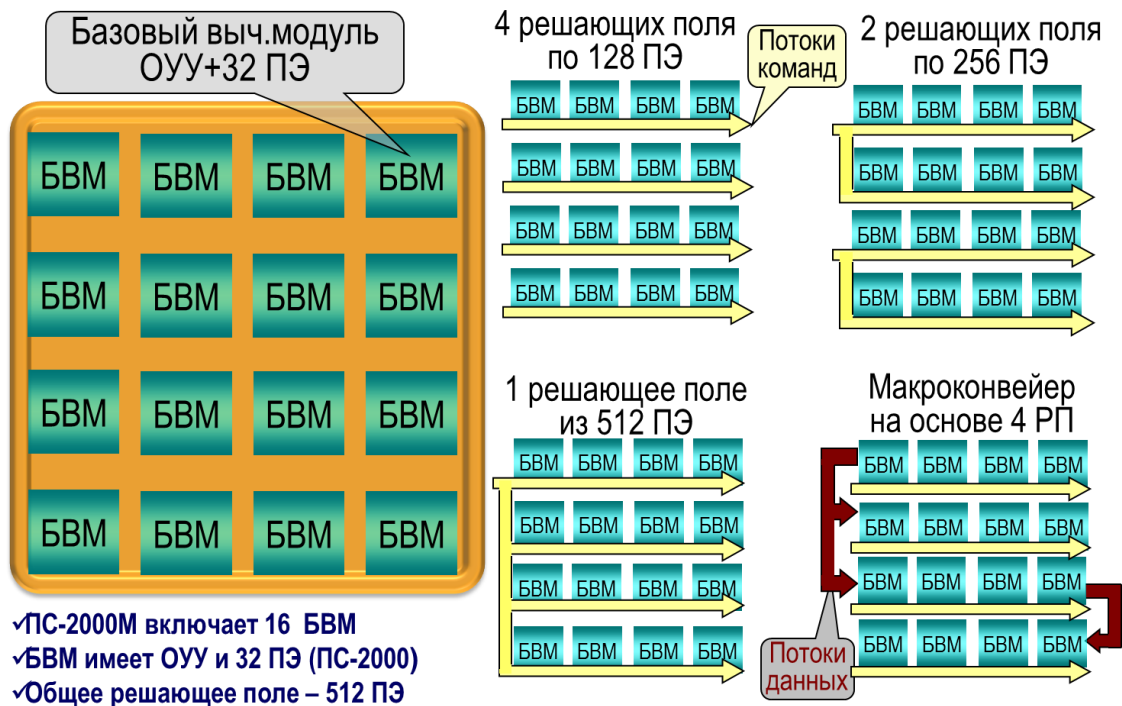


Рис. 7.2. Комплексирование БВМ внутри кристалла

Особенности гибридной архитектуры развиваемой элементной базы на основе архитектуры ПС-2000:

- универсализм вычислений за счёт совмещения в одном чипе последовательной обработки данных на универсальном микропроцессоре и высокопараллельной обработки данных на ПС-

2000М;

- обеспечение возможности эффективного взаимодействия микропроцессорных ядер и высокопараллельных БВМ ПС-2000М в составе одного кристалла;
- гибкая и реконфигурируемая высокопараллельная многопроцессорная архитектура:
  - поддержка различных вычислительных моделей для широкого набора классов решаемых задач – SIMD/VLIW/MIMD, систолические вычисления и ассоциативная обработка, потоковая обработка в конфигурируемых внутри- и межкристальных макроконвейерах;
  - массовый многоуровневый параллелизм обработки, операций с памятью, работы устройства управления и ввода/вывода данных и программ;
  - сбалансированная в широком диапазоне приложений архитектура по доставке потоков данных и потоков управления и по их взаимодействию;
  - многоканальный ввод/вывод данных с прямым доступом в память;
  - поддержка реконфигурируемых «крупно-зернистых» и «мелко-зернистых» и систолических массивных вычислений в распределённой по ПЭ памяти;
  - широкие возможности по обработке данных – целочисленная арифметика и логическая обработка, плавающая арифметика одинарной и двойной точности.

На рис. 7.3 приведена восходящая лестница на основе структурного масштабирования архитектуры ПС-2000М при реализации на современных и будущих интегральных технологиях.

Из рис. 7.3 видно, как масштабируется «пиковая» производительность по мере перехода на новые технологии, что отражает основные свойства и

демонстрирует потенциал архитектуры. Однако пиковая производительность не является основным показателем параллельной архитектуры. Более важным показателем является производительность и энергоэффективность архитектуры в различных классах решаемых задач. Возможности раскрытия потенциала архитектуры в широком диапазоне прикладных задач определяются комплексом её свойств, её «гибкостью» и эффективностью системы её программирования.



Рис. 7.3 Масштабирование реализаций высокопараллельной архитектуры ПС-2000М по мере развития промышленных технологий

На первом этапе развития проекта может быть создано два продукта, в зависимости от объёма доступного финансирования.

В первом, более дешёвом, варианте предполагается создание однокристалльного компьютера (условное название ПС-2000М) с использованием в качестве центрального процессорного устройства (ЦПУ) одного лицензируемого микропроцессорного ядра компаний ARM или MIPS и высокопараллельной системы ПС-2000М с общим числом

процессорных элементов до 1024. Предполагаемая технология производства – 40нм.

Во втором варианте возможно создание полноценной реализации однокристалльной гибридной архитектуры на основе интеграции высокопараллельной ПС-2000М в одном чипе с ЦПУ на основе высокопроизводительного многоядерного микропроцессорного блока компании ARM. Предполагаемая технология производства – 28 нм.

Однокристалльный компьютер ПС-2000М предназначается для использования в широкой номенклатуре высокопроизводительных универсальных вычислительных систем и для реализации различных встраиваемых вычислительных систем и систем управления реального времени.

#### *7.2.2. Области применения*

Развиваемые продукты предназначаются для развития технологий высокопроизводительных и распределённых вычислений в широком диапазоне приложений, как существующих, так и будущих. Более того, реализация предлагаемой технологии призвана послужить стимулом для развития новых прикладных областей.

В сочетании с многоядерным хост-ЦПУ однокристалльный компьютер ПС-2000М может быть использован для построения широкого диапазона гибридных универсальных вычислительных систем – встраиваемых систем реального времени, высокопроизводительных персональных компьютеров, игровых приставок, рабочих станций, серверов, дата-центров и суперкомпьютеров.

Предполагается, что использование развиваемой элементной базы и технологий распределённых вычислений обеспечит эффективную обработку различных классов вычислительных задач и приложений:

- моделирование тока жидкости/газа (обтекание твёрдых препятствий);

- обработка изображений, кодирование видео, компьютерное зрение;
- обработка звука и речи;
- сейсмическое моделирование (3D модели поиска нефти/газа, взрывов);
- широкополосные синхронные импульсные радары: распознавание целей/объектов;
- биоинформатика, моделирование лекарств;
- квантовая химия, моделирование белка;
- медицина: трёхмерная компьютерная томография, автоматизированная ранняя диагностика (по рентгеновским снимкам);
- молекулярное моделирование (взаимодействие объектов);
- физическое моделирование (астрономия, компьютерные игры);
- антивирусные приложения (проверка по базам сигнатур);
- криптография и криптоанализ (шифрование и взлом паролей);
- базы данных: поиск, сортировка;
- геометрическое моделирование (объекты, освещение, преобразования, тени и т. п.);
- предсказания погоды с учётом большого количества параметров;
- моделирование климата ;
- анализ океанских волн;
- финансовое моделирование/расчеты;
- анализ сетей;
- компьютерные игры, анимация персонажей, виртуальных миров (для игр и кино);
- самолетостроение;
- системы безопасности (камеры наблюдения: анализ происходящего, слежение за объектами, идентификация людей, выдача предупреждений);



- оборонные, военные и специальные приложения.

### 7.2.3. Конкуренентоспособность

Архитектура ПС-2000М обладает набором свойств, которые в современных условиях (см. рис. 7.3) позволяют прогнозировать её высокую конкурентную способность и долгую жизнь на мировом рынке.

В таблице 7.1 сопоставлены характеристики архитектур основных «игроков» рынка высокопроизводительных вычислений и предлагаемого однокристального компьютера ПС-2000М.

Таблица 7.1

Сравнение характеристик архитектур высокопроизводительных вычислителей для массового рынка

Характеристика	IBM Cell	nVIDIA Fermi, Kepler	ПС-2000М (концепция)
Тип архитектуры	Гибридная, ЦПУ и параллельная подсистема	Высокопараллельная	Гибридная, высокопроизводительное ЦПУ и высокопараллельная подсистема
Степень поддержки универсальных вычислений	Высокая	Низкая	Высокая
Технология	65 нм	40 нм...10 нм	40 нм...10 нм
Эффективность связи между ЦПУ и параллельной подсистемой	Высокая	Очень низкая	Высокая
Число ядер ЦПУ	1	-	>1
Возможности структурного масштабирования параллельной подсистемы	Низкие	Средние (пропускная способность памяти отстаёт от арифметики)	Пропорционально высокие
Число ПЭ в параллельной системе	8 (16...32)	Масштабируемое, 512, 1536	Масштабируемое, 1024, 2046, ...,16384
Пиковая производительность параллельной системы, Tflops	0,256	масштабируемая, 1, 3	Масштабируемая, 1-2-4-8-16-(32- на 10нм)
Гибкость параллельной архитектуры	Средняя	Низкая	Высокая, поддержка набора вычислительных моделей
Организация памяти	Разделяемая и распределённая	Разделяемая	Разделяемая и распределённая

Объем встроенной памяти, МБ	1	0,6	16-512, пропорционально количеству ПЭ
Наличие прямого доступа в память	Есть	Нет	Есть
Наличие встроенного межпроцессорного коммутатора	Есть	Нет	Есть
Возможности межкристального масштабирования	Нет	Нет	Есть

Процессоры Cell имеют гибридную архитектуру с небольшим количеством ядер и определённой степенью универсальности, но при отсутствии дальнейшего развития к настоящему моменту обладают относительно низким уровнем пиковой производительности. К недостаткам архитектуры следует отнести невысокую гибкость параллельной архитектуры и отсутствие возможностей её масштабирования на линейке нанотехнологий.

К недостаткам архитектуры nVIDIA Fermi и GPU в целом можно отнести [23,24]:

- существенную жёсткость;
- низкую степень универсальности;
- небольшой объём встроенной памяти;
- отсутствие встроенной межпроцессорной коммутации;
- невозможность прямого ввода/вывода в память;
- отсутствие возможности "бесшовного" комплексирования нескольких GPU в систему.

В силу отсутствия встроенного ЦПУ, GPU не обеспечивают достаточного уровня универсализма вычислений. Поэтому невозможно построить высокопроизводительную компьютерную систему на основе только GPU, необходимо также использовать и отдельные универсальные микропроцессоры. Таким образом, одной из проблем эффективного

использования GP GPU в высокопроизводительных вычислениях является узкое горло связи между универсальным микропроцессором и GP GPU, что существенно снижает возможности эффективного использования их параллельных ресурсов в широком диапазоне классов задач и алгоритмов.

Когда размерность решаемой задачи выходит за пределы возможностей аппаратуры GPU, отсутствие встроенной межпроцессорной коммутации и небольшой объем встроенной памяти приводит к необходимости обмена данными через внешнюю память. Это влечёт за собой необходимость обеспечения высокой пропускной способности внешней памяти и как следствие повышенное энергопотребление всей системы.

Выделим основные свойства архитектуры ПС-2000М, позволяющие прогнозировать её высокую конкурентоспособность относительно современных систем с массовым параллелизмом:

- реализация архитектуры:
  - высокое соотношение показателя «пиковая производительность/(транзистор\*стоимость\* энергопотребление)»;
  - «околопиковая» производительность на широких классах задач (70-80% и выше), обеспеченная высокой гибкостью параллельной архитектуры;
- простота аппаратных решений и гибкость управления:
  - SIMD из простых исполнительных устройств (АЛУ + регистры);
  - VLIW для управления (простота дешифрации, уплотнение команд организует оптимизирующий компилятор);
  - эффективная структура межпроцессорных обменов;
- пропорциональная структурная масштабируемость:
  - по числу ПЭ;
  - по объёму памяти;
  - по ширине внешнего интерфейса ввода/вывода;

- по частоте (энергосбережение);
- бесшовная комплексированность:
  - полностью программно управляемая;
  - использование смесей параллельных и конвейерных структур;
  - единый механизм на внутри- и межкристальных (системных) уровнях;
  - встроенные технологии бесшовной сетевой интеграции (позволяют формировать легко масштабируемые облачные кластеры, предназначенные для оказания широкого круга массовых услуг по доставке пользователям суперкомпьютерных алгоритмических сервисов).
- наличие системы программирования, открытой для пользователей, которая позволяет создавать высокоэффективные машинные программы, а также развивать [26] перспективные методы автоматического синтеза таких программ.

К достоинствам предлагаемого к реализации однокристалльного компьютера ПС-2000М следует также отнести его гибридную архитектуру, объединяющую в одном чипе универсальный микропроцессор и процессор с массовым параллелизмом, что обеспечивает высокий уровень универсализма поддерживаемых вычислений относительно классов решаемых задач.

## **8. Стратегия выхода на рынок и основные рыночные ниши**

В результате создания прототипа архитектуры ПС-2000М на ПЛИС и оценок параметров его однокристалльной реализации на технологиях глубокого нанометрового диапазона предполагается разработать технико-экономическое обоснование возможностей создания на этой основе первого продукта конкурентоспособного на мировом рынке.

Рыночные перспективы однокристалльного компьютера ПС-2000М определяются отличительными свойствами его архитектуры, которые дают

серьёзные преимущества и по обеспечению высокого КПД вычислений в широком диапазоне приложений, в части структурной масштабируемости в глубоком нанометровом диапазоне технологий изготовления. Эти преимущества в полной мере отвечают современным тенденциям и требованиям к развитию высокопроизводительных вычислений.

На первой стадии реализации проекта предполагается позиционировать его на рынке элементной базы для высокопроизводительных вычислительных систем, включающем сегменты высокопроизводительных компьютеров и рабочих станций, топовых серверов и суперкомпьютеров, микросерверов и дата-центров, используемых для реализации «облачных» и распределённых вычислений.

Основные отличия между высокопроизводительными серверами и микросерверами дата-центров заключаются в разных типах вычислительной нагрузки, в уровнях производительности и стоимости обслуживания. Высокопроизводительные сервера ориентированы для решения небольшого количества очень сложных задач большой размерности, а микросерверы – для большого количества относительно простых задач. Уровни производительности микросерверов значительно ниже в силу использования менее производительной элементной базы. Стоимость эксплуатации микросерверов, существенную часть которой составляет стоимость электрической энергии, существенно ниже, чем для высокопроизводительных серверов.

Предлагаемый однокристальный компьютер ПС-2000М в силу своих свойств, потенциально может эффективно использоваться в обоих сегментах – и для высокопроизводительных вычислений, и для «облачных» распределённых вычислений.

С учётом сказанного, в дальнейшем рассмотрении выделим сегмент ПК и рабочих станций, сегмент высокопроизводительных вычислительных

систем и сегмент вычислительных систем для «облачных» и распределённых вычислений.

Кроме этого, однокристальный компьютер ПС-2000М может использоваться для создания широкой номенклатуры встраиваемых систем, систем управления реального времени, игровых приставок, высокопроизводительных мобильных компьютеров и др.

Первоначально предполагается обеспечить позиционирование разрабатываемого однокристального компьютера ПС-2000М на рыночном сегменте высокопроизводительных серверов и суперкомпьютеров, а также сегменте «облачных» и распределённых вычислений. В дальнейшем при выполнении ряда условий возможно проникновение на рыночные сегменты персональных компьютеров и рабочих станций и на другие сегменты рынка средств вычислительной техники, включая рынки с практически неограниченным потенциалом потребления, такие как мобильные и встраиваемые компьютерные устройства.

Для эффективного продвижения на все рыночные сегменты, перечисленные выше, необходимо установление партнёрских отношений с ведущими российскими коммерческими и государственными компаниями, а также с зарубежными производителями средств вычислительной техники, разработчиками программного обеспечения в целевых сегментах рынка и прикладных областях.

### ***8.1. Рынок высокопроизводительных вычислений***

Несмотря на расширение сфер использования, GPU в высокопроизводительных вычислениях, как уже отмечалось выше, обладают целым рядом ограничений, препятствующих их более активному применению. Несомненным положительным аспектом начала внедрения GPU в рынок высокопроизводительных вычислений является то, что рынок, с одной стороны, постепенно адаптируется к высокопараллельной

элементной базе и новым методам параллельного программирования, а с другой стороны - вынужден на настоящий момент использовать GPU, несмотря на его технические несовершенства, ввиду отсутствия превосходящих по совокупности потребительских свойств альтернатив.

При этом предлагаемый к разработке однокристалльный компьютер ПС-2000М обладает набором свойств, которые потенциально делают его более привлекательной элементной базой для высокопроизводительных вычислений. Он способен сформировать реальную альтернативу графическим процессорам GP GPU на рынке процессоров с массовым параллелизмом.

Использование ПС-2000М в данном сегменте призвано обеспечить возможности создания высокопроизводительных систем с улучшенными характеристиками по отношению к известным решениям, основанным на использовании стандартных микропроцессоров и процессоров GPU:

- повышение удельной производительности единицы объёма системы в широком диапазоне приложений;
- повышение энергетической эффективности вычислений;
- снижение стоимости удельной производительности в широком диапазоне приложений;
- снижение трудоёмкости разработки прикладного программного обеспечения.

Повышение удельной производительности обеспечит возможности достижения в том же объёме вычислительной системы более высокой производительности или уменьшения массо-габаритных размеров системы при сопоставимых уровнях производительности.

Повышение энергетической эффективности вычислений позволит с одной стороны обеспечить технические возможности создания более производительных систем, а с другой – снизить эксплуатационные

расходы вычислительной системы на электроэнергию при сопоставимых уровнях производительности, а также расширить сферы использования в мобильных компьютерных устройствах.

Снижение трудоёмкости разработки прикладного программного обеспечения за счёт использования развиваемой в рамках проекта системы автоматизации программирования [26] обеспечит расширение круга потенциальных пользователей и соответственно увеличение объёмов сбыта основного продукта – однокристального компьютера ПС-2000М.

## **8.2. Рынок «облачных» и распределённых вычислений**

В сегменте облачных и распределённых вычислений использование элементной базы в виде ПС-2000М потенциально способно существенно увеличить производительность микросерверов по обработке данных и производительность баз данных. При этом микросерверы могут строиться на основе комплексирования ПС-2000М с «серверами-на-кристалле», выпускаемыми компаниями Calxeda или AppliedMicro.

Альтернативным возможным вариантом проникновения на данный сегмент рынка является использование собственно микрочипа однокристального компьютера ПС-2000М в качестве элементной базы для построения микросерверов.

В целом, использование ПС-2000М в данном сегменте призвано обеспечить улучшение основных характеристик продуктов рынка, перечисленных выше для сегмента высокопроизводительных вычислений.

Кроме того, использование ПС-2000М может обеспечить такие возможности существенного улучшения характеристик микросерверов дата-центров, которые позволят поднять их интегральную производительность на более высокий уровень, доступный в настоящее время только высокопроизводительным серверам (совершенно иной



ценовой класс) при обеспечении снижения энергопотребления и стоимости.

### **8.3. Рынок персональных компьютеров и рабочих станций**

В сегменте персональных компьютеров ПС-2000М являются дополняющим продуктом. Его использование позволит создать более мощные и при этом относительно недорогие компьютеры, в которых эффективно совмещается высокопараллельная обработка больших данных – настольные «суперкомпьютеры».

В сегменте рабочих станций возможно аналогичное применение ПС-2000М. При этом за счёт свойств его гибридной архитектуры и возможностей эффективного комплексирования нескольких микрочипов ПС-2000М возможно существенно повысить производительность рабочих станций, до производительности серверов начального уровня, при незначительном увеличении стоимости.

Использование ПС-2000М в качестве ускорителя в продуктах этих сегментов потенциально может обеспечить возможности выполнения сложных расчётов, ускорения моделирования разного рода процессов, ускорения моделирования физических эффектов в компьютерных играх, ускорения обработки мультимедийных данных и др.

### **8.4. Суммарный объем рынка для ПС-2000М**

В таблице 8.1 приведены предварительные оценки долей сегментов рынка, на которые может претендовать однокристалльный компьютер ПС-2000М. Эту оценку можно считать консервативной.

Оценки первичных долей сегментов рынка для ПС-2000М

Таблица 8.1

	Годовой объем, млн. единиц	% от рынка	Годовой объем, тыс. единиц	Среднее число чипов ПС2000М	Общее число чипов, тыс. штук	Возможная прибыль с одного чипа, \$	Ежегодная прибыль, млн. \$

ПК	150	0,03	50	1	50	100	5
РС	4	~0,1	15	4	60		6
ВВ	3	3	90	-	90		9
ОРВ	3	3	90	-	90		9
					ИТОГО:		~ 30

Здесь: ПК – персональные компьютеры, РС – рабочие станции, ВВ- количество процессоров для высокопроизводительных вычислений, ОРВ – количество процессоров для «облачных» и распределённых вычислений.

### **Заключение**

Фундаментальный характер новых решений в части однокристальных многопроцессорных архитектур и технологий их программирования требует в первую очередь интеллектуального ресурса и поэтапного вхождения в международное разделение труда. Для этого не требуются чрезмерные капиталовложения, что даёт шансы отечественным инвесторам и разработчикам.

Отечественная многопроцессорная архитектура ПС-2000, доказавшая в ходе десятилетнего промышленного применения, эффективность своих принципов управления массовым параллелизмом, архитектуры и системы команд, может быть положена в основу новой конкурентоспособной платформы однокристальных многопроцессорных компьютеров в классе систем с массовым параллелизмом общего назначения, что составит предпосылки партнёрства с обладателями передовых полупроводниковых СБИС-технологий.

Такова стратегия вывода на мировой уровень новых продуктов в области высокопроизводительных вычислений с опережающей архитектурой. Это необходимая база для последующего приобретения передовых технологий производства чипов глубокого нанометрового

диапазона с организацией собственного производства высококонкурентной ЭБ, что позволит уменьшать зависимость от импортных поставок в стратегически важной сфере народного хозяйства.

На переходе к новому этапу развития компьютеростроения глубинный внутрикомпьютерный кризис выравнивает стартовые позиции. В этом *уникальный* исторический шанс для новых игроков – не только разработчиков, но и инвесторов. При этом следует ясно осознавать, что пространственно-временная щель в будущее открывается лишь для тех, кто её увидит раньше других. И открыта она будет недолго.

### Список литературы

1. **Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.** Многопроцессорный компьютер ПС-2000 // Открытые системы. СУБД, 2007. № 9. С. 74-79. URL: <http://www.osp.ru/os/2007/09/4570286/>
2. **Затуливетер Ю.С.** Компьютерные архитектуры: неожиданные повороты // Hard 'n' Soft. 1996. № 2. С. 86-94. URL: [http://zvt.hotbox.ru/p2\\_z1.htm](http://zvt.hotbox.ru/p2_z1.htm).
3. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=10825&iid=436>
4. **Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.** Многопроцессорный компьютер ПС-2000 (Опыт создания и пути развития). Научное издание (Препринт). М.: Институт проблем управления РАН, 2012. 86с. URL: [http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16551/3477-препринт%20пс-2000\\_\\_2.pdf](http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16551/3477-препринт%20пс-2000__2.pdf)
5. **Wolcott P., Goodman S.E.** High-Speed computers of the Soviet Union // IEEE Computer. -1988. Vol. 21, -No 9. P. 32-41.
6. **Wolcott P., Goodman S.E.** International perspectives: under the stress of reform high-performance computing in the former Soviet Union // Communications of the ACM. -1993. Vol. 36, No 10. P. 21-24.
7. *The Cell* architecture. -URL: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/cellengine/>
8. URL: <http://techreport.com/review/17670/nvidia-fermi-gpu-architecture-revealed>
9. URL: [http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi\\_white\\_papers/NVIDIA\\_Fermi\\_Compute\\_Architecture\\_Whitepaper.pdf](http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi_white_papers/NVIDIA_Fermi_Compute_Architecture_Whitepaper.pdf)

10. URL:<http://www.nvidia.com/content/PDF/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-Architecture-Whitepaper.pdf>.
11. <http://www.intel.ru/content/dam/www/public/us/en/documents/product-briefs/high-performance-xeon-phi-coprocessor-brief.pdf>,  
<http://www.intel.ru/content/www/ru/ru/processors/xeon/xeon-phi-coprocessor-block-diagram.html>
12. URL:  
[http://www.tilera.com/sites/default/files/productbriefs/TILEPro64\\_Processor\\_PB019\\_v4.pdf](http://www.tilera.com/sites/default/files/productbriefs/TILEPro64_Processor_PB019_v4.pdf).
13. **Прангишвили И.В., Затуливетер Ю.С., Смирнов А.Д., Томилин А.Н.** Москва компьютерная // Развитие инженерного дела в Москве. Исторические очерки. -М.: Российская инженерная академия, 1998. С.338-354.
14. **Затуливетер Ю.С, ФищенкоЕ.А.** Многопроцессорная вычислительная система ПС-2000 (история создания) // В кн.: Ивери Варламович Прангишвили: более полувека в науке управления. – М.: ИПУ РАН, 2007.-С.52-58.
15. **Прангишвили И. В., Виленкин С. Я., Медведев И. Л.** Многопроцессорные вычислительные системы с общим управлением. - М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
16. **Трапезников В.А., Прангишвили И.В., Новохатний А.А., Резанов В.В.** Экспедиционные геофизические комплексы на базе многопроцессорной ЭВМ ПС-2000 // Приборы и системы управления. 1981. № 2. С. 29-31.
17. **А.с. 751238 СССР.** Многопроцессорная вычислительная система / Бирюков А.Я, Виленкин С.Я., Жуков В.А., Затуливетер Ю.С., Медведев И.Л., Прангишвили И.В., Голован Н.И., Итенберг И.И., Костелянский В.М., Набатов А.С., Пивоваров Г.Ю., Резанов В.В., Фищенко Е.А. // Бюллетень изобретений. -1983. -№ 22.
18. **Фищенко Е. А.** Выбор системы команд для многопроцессорной вычислительной системы с общим потоком команд // Многопроцессорные вычислительные системы с общим потоком команд: Сб. науч. тр. №19 -М.: Ин-т пробл. упр., 1978. -С. 33-39.
19. **Fisher J.** Very long instruction word architectures and the ELI512 // Proc. of the 10-th Annual International Symposium on Computer Architecture. Stockholm, Sweden, 1983.-P. 140-150.

20. **Амелина Е.Г., Затуливетер Ю.С., Лазебник Е.Р., Медведев И.Л., Нейман А.В., Фищенко Е.А.** Миграция временного разреза земли на параллельной ЭВМ ПС-2000 (Быстрое сейсмологографическое преобразование Кирхгофа) -М.: Институт проблем управления, 1992. - 36с.
21. **Васильев, С.А., Перехватов В.В.** Быстрое сейсмологографическое преобразование Кирхгофа // Геология и геофизика.- 1981.-№ 8.
22. **Медведев И.Л.** Проектирование ядра структуры параллельных процессоров. – М., 1992 (Препринт/Институт проблем управления), 60с.
23. **Patterson D.** The Top 10 Innovations in the New NVIDIA Fermi Architecture, and the Top 3 Next Challenges, 30.09.2009. -URL: [http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi\\_white\\_papers/D.Patterson\\_Top10InnovationsInNVIDIAFermi.pdf](http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi_white_papers/D.Patterson_Top10InnovationsInNVIDIAFermi.pdf)
24. **Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.** Предпосылки к созданию однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М производительностью 1-10 Tflops // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта-1 апреля 2011г.). С.402–410. URL: [http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/talks/012\\_zatuliveter\\_talk.pdf](http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/talks/012_zatuliveter_talk.pdf), Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 730с. URL: <http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/short/012.pdf>.
25. **Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Артамонов С.Е., Козлов В.А.** К разработке отечественной элементной базы для вычислений с массовым параллелизмом. Элементы стратегии опережения / Труды 6-й международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2012. М.: ИПУ РАН, 2012. Т.2. С. 375-387.
26. **Затуливетер Ю.С.** Введение в проблему параметризованного синтеза программ для параллельных компьютеров /-М.: Ин-т пробл. упр, 1993. - 88с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРТАМОНОВ Сергей Евгеньевич** - технический директор,  
 ООО "ИДМ"(InternationalDesign&Marketing, Ltd.), г. Зеленоград.  
 URL: <http://idm.ru>

Область интересов – современный дизайн в области микроэлектроники и информационных технологий, в том числе в области разработки специализированных и параллельных вычислительных архитектур и микропроцессорных микросхем с ориентацией на изготовление на современных технологиях нанометрового диапазона.

E-mail: [Sergey.Artamonov@idm.ru](mailto:Sergey.Artamonov@idm.ru)

**ЗАТУЛИВЕТЕР Юрий Семенович**- кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

Сферы профессиональных интересов: параллельные и распределённые вычисления, многопроцессорные компьютерные архитектуры и системы, сетевые вычислительные среды, включая проблемы формирования в них свободно масштабируемого и бесшовно программируемого алгоритмического пространства распределённых вычислений и сетецентрического управления, социальные аспекты кибернетической глобализации.

Автор более 160 публикаций.

E-mail: [zvt@ipu.rssi.ru](mailto:zvt@ipu.rssi.ru)

**КОЗЛОВ Владимир Алексеевич**- директор, ООО "ИДМ" (InternationalDesign&Marketing, Ltd.), г. Зеленоград.

URL: <http://idm.ru>

Область интересов - разработки в области микроэлектроники и информационных технологий. Компания более 20 лет успешно работает на рынке научно-технических разработок мирового уровня по реализации цифровых, аналоговых, смешанных и радиочастотных микросхем, как для отечественных, так и для зарубежных компаний.

E-mail: [Vladimir.Kozlov@idm.ru](mailto:Vladimir.Kozlov@idm.ru)

**ФИЩЕНКО Елена Алексеевна** - кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Области профессиональных интересов: многопроцессорные архитектуры, системы команд многопроцессорных систем, ассемблеры параллельных компьютеров, распараллеливание алгоритмов, программирование на параллельных ассемблерах, оценка эффективности параллельных компьютеров, кодеры качественного сжатия цифрового видео в реальном времени,

распределенные вычисления, сетевые системы управления.

Автор более 70 публикаций.

E-mail: [fish@ipu.ru](mailto:fish@ipu.ru)