



# Закономерности развития технологий вычислительной техники

Лев Баранов

В статье рассмотрены закономерности и тенденции развития технологий вычислительной техники в таких направлениях, как совершенствование и миниатюризация элементной базы, суперкомпьютерные архитектуры, границы пропорциональной миниатюризации микроэлектроники, тенденции развития суперкомпьютерных архитектур, а также кооперация в области технологий между ведущими фирмами РФ.

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Принятая классификация современных технических средств вычислительной техники основана фактически на смене поколений элементной базы. Далее будет изложена общая картина эволюции аппаратных средств ЭВМ за минувшие четыре десятилетия и последнего поколения за 10 лет. Что касается математического обеспечения ЭВМ, то оно развивается более или менее синхронно с элементной базой, но по более консервативному пути, поскольку каждую новую модель ЭВМ стремятся сделать программно совместимой с ранее созданными. Разрабатываемое программное обеспечение должно в максимальной степени сохранять преемственность с накопленным потенциалом математического обеспечения ЭВМ. Однако качественные переходы в области программных средств всегда являлись следствием обновления элементной базы. В то же время смена поколений элементной базы охватывает все сферы технологии её производства, включая оборудование. Главная причина такого развития элементной базы состоит том, что оно определяется изменением внутренней геометрии интегральных схем (ИС), что требует нового уровня общей культуры всего технологического производства. В рамках каждого поколения ЭВМ эволюция элементной базы также происходит этапами. Обычно новое «микрпоколение» созревает в недрах предыдущего и вы-

тесняет его, достигая экономически рентабельного уровня серийного производства [1].

Объединение элементно-технологической и аппаратно-конструкторской ветвей технических средств вычислительной техники произошло вместе с возникновением микроэлектроники, с которого начинается современная история вычислительной техники. Дальнейшая эволюция — это прогрессирующее слияние технологии и конструирования, технологии и системотехники, технологии и прикладной математики. Иными словами, с ростом степени интеграции в единое кристаллическое устройство переходят всё более высокие ранги проектирования и изготовления средств вычислительной техники. Результатом этих тенденций к настоящему времени явилось создание интегральных схем. Последние достижения демонстрирует 8-ядерный процессор «Эльбрус-8С», спроектированный по технологии 28 нм, с тактовой частотой 1300 МГц, имеющий площадь кристалла 321 мм<sup>2</sup> и количество транзисторов на кристалле 2,73 млрд.

Миниатюризация и интеграция приборов сказывались на их основных параметрах, таких как потребляемая мощность, энергетический фактор качества, задержка  $\tau$ , число выводов на корпус в стандартных приборах и в приборах с максимальным числом внешних контактов, цены основных серий простейших и наиболее сложных приборов.

Важная функциональная характеристика ИС — число внешних выводов.

Схемотехнически стремятся по возможности уменьшить его, особенно в ИС запоминающих устройств (ЗУ), где число выводов почти не растёт, несмотря на повышение степени интеграции. Однако в процессорных элементах число необходимых выводов находится в явной зависимости от степени интеграции, и технологический прогресс напрямую отражается и на числе выводов на корпус.

Существует единственный показатель, инвариантный по отношению даже к самым радикальным усовершенствованиям и усложнениям технологии, — цена одного кристалла (точнее, корпусированной ИС). Этот показатель остаётся неизменным и различается только для приборов разного уровня (простейших и более сложных). Причина этого достаточно проста: именно экономический фактор — главная движущая сила развития микроэлектроники; ни один кристалл не может завоевать широкого рынка сбыта, пока его цена остаётся существенно превышающей установившиеся для более ранних моделей значения. Соответственно цена одного транзистора в составе ИС находится в строгой обратной зависимости от степени интеграции.

В сфере ЭВМ имеется аналогичная закономерность: диапазон стоимости ЭВМ данного класса остаётся неизменным во времени, хотя производительность машин со временем возрастает на порядки. Изменение номенклатуры и стоимости ЭВМ определяют такие факторы, как число кристаллов, относительная стоимость и расширение номен-

клатуры ЭВМ с ростом степени интеграции (однокристалльные, микроЭВМ, мини-ЭВМ, среднего класса, большие, суперЭВМ, многомашинные комплексы, распределённые сети), рост аппаратной сложности ЭВМ, относительная стоимость аппаратных и программных средств, относительная стоимость расчёта сложных моделей на различных ЭВМ с сохранением алгоритма и при совершенствовании алгоритма на одной и той же ЭВМ. Обратное утверждение столь же справедливо: класс машины формально определяется её стоимостью. Номенклатура ЭВМ многократно расширилась благодаря росту интеграции. По мере роста надёжности и снижения габаритных размеров элементов, усовершенствования методов монтажа верхнее предельное число кристаллов в системе увеличилось на два порядка.

Обратимся теперь к собственным показателям производительности ЭВМ:  $\tau_T$  – время такта суперЭВМ и микропроцессоров;  $B$  – быстродействие суперЭВМ, максимальное быстродействие микропроцессоров и однопроцессорных ЭВМ по [2];  $N$  – ёмкость оперативной памяти суперЭВМ и однопроцессорных ЭВМ максимальной производительности;  $R$  – рост разрядности микропроцессоров. При этом будем по возможности сопоставлять две предельные ветви вычислительной техники – суперЭВМ, которые проектируются на предельно быстрых для своего времени элементах и содержат максимально возможное число таких элементов сравнительно невысокой степени интеграции, и микропроцессор – один кристалл максимальной степени интеграции.

К сказанному следует добавить, что асинхронно с формальными показателями прогресса микроэлектроники – ростом быстродействия и степени интеграции элементов – имеется скрытая тенденция функциональной интеграции – перевода в кристалл цифроаналоговых, аналого-цифровых и множества специализированных функций и постепенной «вторичной» интеграции гетерогенных по своим функциям устройств в одном кристалле сверхбольших ИС.

Можно заключить, что основные тенденции развития ЭВМ сохраняются не только в качественном, но и в количественном отношении, однако механизм эволюции претерпевает серьёзные изменения. Если её начало было связано исключительно с уменьшением линейных размеров приборов, то продолжение сложившихся тенденций в будущем пол-

ностью определится развитием согласованного системного подхода к технологии и проектированию элементной базы и аппаратных средств ЭВМ в целом.

### Границы пропорциональной миниатюризации

Действие любой вычислительной системы основано на трёх видах функций: хранение, преобразование и обмен информацией. Для их реализации необходимы элементы памяти, активные преобразующие элементы (в цифровых устройствах – логические вентили) и каналы связи. Очевидно, что для реализации всех трёх функций требуется внутрисхемная изоляция. В течение 20 лет, примерно до 1980 года развитие микроэлектроники происходило в соответствии с принципом пропорциональной миниатюризации [3].

Однако уже к концу 1960-х годов начали сказываться, а в 1970-х стали всё более существенными многочисленные нелинейные эффекты: «шнурование» тока в  $p-n$ -переходах, локальный пробой тонких слоёв диэлектрика, поверхностные процессы рассеяния носителей заряда, электромиграция, явления, вызываемые «горячими» электронами, и т.д. На протяжении двух-трёх первых поколений ИС эти нежелательные явления удавалось компенсировать совершенствованием технологии материалов и приборов, что и обеспечило жизнеспособность принципа пропорциональной миниатюризации. По мере приближения к микронному рубежу линейных размеров активной области транзисторов нелинейные эффекты, а также краевые явления рассеяния носителей, «короткий» и «узкий» каналы, насыщение скорости и изменение подвижности носителей и другие эффекты сильного поля приобрели принципиальный характер. Последовали радикальные изменения методики расчёта и оптимизации приборов: линейные модели заменены двумерными, частично начинается переход к трёхмерным моделям, аналитические методы решения уравнений заменяются численным моделированием на ЭВМ.

Нелинейные эффекты ограничивают миниатюризацию всех структурных элементов вычислительных систем. Однако если в пассивных элементах нелинейные явления – лишь нежелательное побочное следствие миниатюризации, в активных они играют фундаментальную роль. Действительно, любая логи-

ческая функция нелинейна и её реализация основана на нелинейных физических явлениях, которые возникают на границах раздела полупроводник–полупроводник ( $p-n$ - и гетеропереходы), металл–полупроводник, металл–полупроводник–диэлектрик и т.д. Реальные функции прибора определяются некоторой протяжённой областью в окрестности границы того или иного типа, и принцип пропорциональной миниатюризации оправдывается до тех пор, пока ширина активной пограничной области мала по сравнению с абсолютными размерами прибора. Отсюда ясно, что характер ограничений размеров пассивных и активных элементов различен, и их надо рассматривать отдельно.

В той же степени, в какой физические явления обеспечивают реализацию информационных функций, технология обеспечивает реализацию необходимых физических структур и протекающих в них явлений. С точки зрения технологии существует принципиальное различие между топологическими размерами (то есть геометрическими размерами элементов в плоскости интегральной схемы) и толщиной отдельных слоёв структуры. Минимальный размер элементов топологического рисунка (минимальная ширина линий) служит абсолютным показателем уровня развития технологии и называется проектной нормой. Далее будем обозначать проективную норму символом  $l_0$ , а минимальную толщину функциональных слоёв (например, подзатворного диэлектрика, наиболее мелких  $p-n$ -переходов) –  $d_0$ . Эти параметры связаны соотношением  $l_0 \approx 10 d_0$ , которое хорошо сохраняется с течением времени, несмотря на то что проблемы минимизации топологических размеров и толщин существенно различны. Однако при любом подходе (с позиций нелинейных эффектов в приборах, принципов их проектирования или производства) развитие микроэлектроники можно разбить на следующие этапы.

- 1960-е годы:  $l_0 \geq 5-7$  мкм; конструкторский подход к проектированию приборов; традиционные оптические методы фотолитографии и гидрохимические процессы формирования топологии.
- 1970-е годы:  $7 \geq l_0 \geq 3$  мкм; учёт отдельных пассивных (ухудшение параметров) и активных (взаимное влияние приборов) нелинейных эффектов при проектировании приборов и схем; разработка новых проекцион-

ных и квазиконтактных методов фотолитографии; переход к «сухой» технологии формирования топологии.

- 1980-е годы (с учётом имеющихся достижений):  $3 \leq l_0 \leq 1,5$  мкм; переход к системным принципам проектирования, «сухой» литографии и низкотемпературным процессам синтеза структур, электронолитографическому синтезу фотошаблонов.
- 1990-е годы:  $1,5 \geq l_0 \geq 0,5$  мкм; полностью системное проектирование; фотолитография достигает пределов и частично вытесняется в наиболее ответственных топологических слоях электронолитографией и рентгенолитографией.

- 2000-е годы: геометрические пределы миниатюризации элементов в серийном производстве; высокопроизводительные системы электронно- и рентгенолучевого синтеза топологии; проектирование элементов на квантово-механическом уровне с использованием современных технологий.

ЭВМ М-13 представляла собой четвёртое поколение программно-совместимых многопроцессорных вычислительных систем, узлы и устройства которых строились по модульному принципу с реализацией основных технологий, изложенных в этом и предыдущем разделе. К этому периоду можно отнести законченный цикл работ по созданию семейства ЭВМ М-10, М-13. ЭВМ М-13 обладала гибкостью в организации вычислений и комплексирования, повышенной производительностью и сопряжением с источниками обрабатываемой информации. Техническим заданием на вычислительный комплекс дополнительно к ЭВМ М-13 предусматривалась разработка специального процессора для цифровой обработки сигналов — процессора обработки функций, который в дальнейшем был включён непосредственно в состав ЭВМ М-13. Это решение дало отчёт развитию направления цифровой обработки сигналов в НИИВК, которое с учётом накопленного многолетнего опыта активно развивается по сей день. По оценкам Института прикладной математики АН СССР, быстродействие ЭВМ М-10 в 64-разрядном формате превосходило БЭСМ-6 в 3,6–4,6 раза, ЭВМ ЕС-1060 — в 3–5,6 раза, ЭВМ «Эльбрус-1-1» в 2,4 раза. Основные характеристики М-13 обоснованы в материалах трудов Б.А. Головкина, являющегося одним из авторов ТЗ [4].

- 2010-е годы: создание и развитие отечественной аппаратно-программной

платформы, отвечающей требованиям технологической независимости и информационной безопасности. Разработанные решения по созданию аппаратно-программной платформы опираются на использование отечественного семейства ЭВМ «Эльбрус» и его модификаций. Дорожная карта микропроцессоров «Эльбрус» предполагает развитие двух направлений. Первое — это создание высокопроизводительных многоядерных микропроцессоров с использованием для изготовления зарубежных технологических производств. Второе — освоение производства ранее выпущенных микропроцессоров на отечественных полупроводниковых фабриках. В это время в АО «НИИВК» начаты работы по созданию высокопроизводительной платформы двойного назначения с использованием отечественного семейства «Эльбрус» и российской элементной базы.

Согласование функциональной, физической и технологической основ микроэлектроники, конечно, не случайно. Оно означает, что дальнейшее развитие микроэлектроники будет носить системный характер. Пределы здесь должны формулироваться в виде соотношений, а не абсолютных величин (подобно тому, как в теоретической физике предельные соотношения даются с помощью принципа неопределённости).

### РАЗВИТИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ АРХИТЕКТУР

Основную задачу суперкомпьютерной отрасли можно сформулировать как необходимость объединения большого числа вычислительных элементов для синхронизированной работы с общими данными, то есть для решения научно-технических задач с использованием массового параллелизма при решении прикладных задач. В 1990-е годы обсуждение развития суперкомпьютерных технологий велось в терминах выбора между двумя типами систем. SMP (*Symmetric Multiprocessing*) — архитектура многопроцессорных компьютеров, в которой два или более одинаковых процессоров подключаются к общей памяти и, следовательно, имеют доступ к общим данным. Альтернативой была массивно-параллельная архитектура MPP (*Massive Parallel Processing*) — класс архитектур параллельных вычислительных систем, состоящих из отдельных узлов, память которых физически разделена, и

поэтому в процессе решения задачи необходим обмен данными между узлами. В результате развития обе технологии перестали конкурировать и заняли каждая своё место в архитектуре современных суперкомпьютеров.

Технологические возможности наращивания производительности SMP-систем ограничены проблемой доступа к общей памяти. Однако развитие подобных устройств — современных многоядерных процессоров и графических процессоров (GPU) — проходит достаточно интенсивно. Ранее речь шла о десятках ядер, работающих с общими данными, сегодня (с появлением GPU) речь идёт уже о тысячах. В результате подобная многоядерная комбинация процессора и специального ускорителя образует высокопроизводительный вычислительный элемент.

Дальнейший путь наращивания производительности — а сегодня это путь к эксафлопсу — лежит на следующем масштабном уровне объединения сотен тысяч отдельных вычислительных элементов (узлов) в системы, содержащие миллионы вычислительных ядер. Для решения этой задачи определяющим является использование адекватной коммутационной сети (интерконнекта), объединяющей систему в единое целое.

«Сердце» современного суперкомпьютера — коммутационная сеть (или интерконнект) — проявляется на трёх уровнях:

- оборудование и топология сети, то есть принцип физического объединения узлов каналами обмена данных;
- системное программное обеспечение, реализующее стандартные процедуры обмена данными (один—одному, один—всем, все—всем и т.п.);
- алгоритмы параллельного решения математической задачи, основанные на указанном системном программном обеспечении.

Возможные варианты аппаратного оборудования сети можно с некоторой долей огрубления разделить на два класса:

- объединение узлов коммутатором или единой шиной данных;
- объединение узлов непосредственно друг с другом, коммутация осуществляется самими узлами.

По возможной топологии эти классы представлены следующими наиболее распространёнными вариантами:

- топология «толстое дерево»;
- топологии типа «решётка» и «многочисленный тор».

Таблица 1

Оценка производительности вычислительных систем

Область применения	2011 год	2015 год	2018 год
<b>Высокотехнологичные отрасли промышленности:</b>			
• авиа- и судостроение	0,3 Пфлопс	3 Пфлопс	1 Эфлопс
• автомобилестроение	0,1 Пфлопс	1 Пфлопс	0,5 Эфлопс
• космическая отрасль	0,1 Пфлопс	2 Пфлопс	1 Эфлопс
<b>Атомная энергетика</b>	1 Пфлопс	100 Пфлопс	10–20 Эфлопс
<b>Нефтегазовая отрасль</b>	1 Пфлопс	100 Пфлопс	1–10 Эфлопс
<b>Новые материалы на основе нанотехнологий</b>	1 Пфлопс	100 Пфлопс	1–10 Эфлопс
<b>Биотехнологии</b>	1 Пфлопс	10 Пфлопс	1–2 Эфлопс

Топология является ключевым фактором, определяющим возможность роста (масштабирования) размера суперкомпьютера.

### Общие потребности в экзафлопных вычислениях

Уровень и качество разрабатываемой продукции напрямую зависят от развития науки и технологий. Принципиальное повышение качества промышленной продукции в современных условиях может быть достигнуто лишь на основе внедрения технологии предсказательного моделирования как самих материалов, так и сложных технических систем в целом.

Выделяются следующие отрасли и области знаний, требующие, в первую очередь, экзафлопных вычислений: фундаментальные исследования, ядерно-оружейный комплекс, машиностроение, материаловедение, атомная и традиционная тепловая энергетика, медицина и фармакология.

В таблице 1 приведены экспертные оценки производительности вычислительных систем, необходимых для разработки наукоёмкой продукции. Уровень и качество разрабатываемой про-

дукции напрямую зависят от развития науки и технологий.

Применение суперЭВМ пета- и экзафлопного класса позволит использовать существенно более точные модели и приближения, повысить детализацию расчётов, проводить комплексное моделирование в связной постановке с одновременным учётом различных физических процессов.

Основные этапы построения суперЭВМ включают в себя разработку и оптимизацию архитектуры, разработку аппаратных компонентов, системного и инструментального программного обеспечения.

### Средства реконфигурации топологии мультипроцессорных сред

Задействование в составе процессоров и вычислительных модулей принципиально различных по дисциплине обработки MIMD- (*Multiple Instruction stream, Multiple Data stream*) и SIMD-компонентов (*Single Instruction, Multiple Data*), а в перспективе, возможно, FPGA-компонентов (*Field-Programmable Gate Array*), обуславливает необходимость оптимизации состава вычислителя, применяемого для выполнения заданного вычислительного процесса. Варьирование составом и производи-

## ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ ОТВЕТСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ



ЗАО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ДОЛОМАНТ»



### КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

#### Контрактная сборка электронного оборудования

- ОКР, технологические консультации
- Макеты, установочные партии
- Полное комплектование производства, поддержание складов
- Серийное плановое производство
- Гарантийный и постгарантийный сервис

### ЗАКАЗНЫЕ РАЗРАБОТКИ

#### Разработка электронного оборудования по ТЗ заказчика в кратчайшие сроки

- Модификация КД существующего изделия
- Разработка спецвычислителя на базе СОМ-модуля
- Конфигурирование модульного корпусированного изделия
- Сборка магистрально-модульной системы по спецификации заказчика
- Разработка изделия с нуля

ТЕЛ.: (495) 739-0775 / PRODUCT@DOLOMANT.RU / WWW.DOLOMANT.RU

Реклама

тельностью MIMD- и SIMD-компонентов позволяет, исходя из первичных свойств процесса, получить максимальное для заданных условий ускорение вычислений. В результате исследования необходимо разработать и реализовать средства анализа свойств вычислительного процесса и логической реконфигурации структуры вычислительных модулей, обеспечивающие наибольшее для заданных условий ускорение вычислений.

С 2010 года и по настоящее время можно выделить работы АО «НИИВК» по созданию комплексов системы передачи, обработки и хранения больших объёмов информации, так называемые облачные технологии, на основе современных вычислителей и программного обеспечения, которые позволяют строить системы реального времени. Развитие облачных технологий дало возможность по-новому взглянуть на проблему безопасности полётов гражданских воздушных судов, что привело к созданию информационного аппаратно-программного комплекса «Спутниковый контроль авиационных систем» для решения задач аэропортов и их наземных служб. Комплекс является законченным оригинальным элементом российской части внедряемой ИКАО единой информационной системы SWIM (*System Wide Information Management*). Обладая универсальными возможностями,

комплекс может эксплуатироваться как самостоятельный высокоэффективный и экономически оптимальный продукт для решения широкого круга задач национальных аэропортов, а также в виде элемента собственной разработки РФ, предназначенного к встраиванию в международную систему SWIM. Указанные комплексы входят в суперкомпьютерную систему управления воздушным движением, прошли испытания, эксплуатируются в транспортном узле московского авиационного региона.

### КООПЕРАЦИЯ В СФЕРЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сложившийся в обществе технологический уклад, опирающийся на достижения в области микроэлектроники, информатики, новых видов энергии, материалов, мобильной связи, Интернета, повлек за собой переход от разрозненных научных сообществ, научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, производственных предприятий к связанным друг с другом крупным и мелким компаниям, соединённым информационной сетью, которые осуществляют тесное взаимодействие в области технологий, исследований, разработок, производства, контроля качества продукции. Это выразилось в объединении научно-технических и производственных предприятий в корпорации, концерны, холдинговые груп-

пы, технопарки. Таким образом, при сохранении организациями определённой самостоятельности и независимости это создаёт условия для повышения конкурентоспособности на рынке высокотехнологического оборудования.

Такие тенденции коснулись и НИИВК. Имея собственную школу создания радиоэлектронной и вычислительной техники, научный коллектив, способный решать сложнейшие алгоритмические, математические и технические задачи, а также накопленный опыт в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, НИИВК к концу XX века наладил кооперацию и сотрудничество с другими российскими инженерными и производственными компаниями, что позволяет институту предлагать наиболее передовые и эффективные прикладные системы и решения. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Randell B., Treleaven P. C. VLSI Architecture. — USA : Prentice Hall Int., 1983.
2. Pohn A.V., Agrawal O.P. High Speed Memory Systems. — USA : Reston, 1983.
3. Dennard R.H., Gaenselen F. H., Yu H.N., Rideout V.L. Design of Ion-Implanted MOS-FET's with Very Small Physical Demensions // IEEE J. of Solid-State Circuits. — 1974. — V. SC-9. — No. 5. — P. 256–268.
4. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. — М : Наука, 1980.

### 70 лет Льву Дмитриевичу Баранову

Баранов Лев Дмитриевич родился 15 мая 1946 года в г. Москве. В 1969 году окончил Московский институт электронного машиностроения, кандидат технических наук, специалист по вычислительной технике.



С 1969 г. — инженер объединённого конструкторского бюро «Вымпел» Минрадиопрома СССР, с 1970 г. — ведущий инженер филиала РТИ ЦНПО «Вымпел».

С 1976 г. работает в НИИ вычислительных комплексов: начальник лаборатории, заместитель главного инженера, главный инженер, технический директор, первый зам. генерального директора ОАО «НИИВК им. М.А. Карцева».

Участвовал в проектировании и авторском сопровождении ввода в эксплуатацию вычислительных комплексов на базе ЭВМ М-10, М-13. Внёс значительный вклад в разработку, настройку и ввод в эксплуатацию на объектах Минобороны СССР устройств управления для ЭВМ М-10, М-13. Основное направление научной работы — развитие методов построения вычислительных комплексов и схемотехники цифровой обработки сигналов для устройств селекции движущихся целей.

В 2010 году организовал работу по облачной технологии, с созданием вычислительной платформы для обработки больших мас-

сивов информации для крупной компьютерной системы управления воздушным движением.

В июне 2015 года назначен генеральным директором АО «НИИВК им. М.А. Карцева».

В 2015 году начаты работы по созданию высокопроизводительной вычислительной платформы двойного назначения с использованием отечественной элементной базы.

Помимо научно-исследовательской и производственной деятельности Лев Дмитриевич активно участвует в подготовке молодых специалистов. В НИИВК функционирует научно-технический совет, аспирантура, успешно работают базовая кафедра Института информационных технологий Московского технологического университета МИРЭА, центр обучения современным информационным технологиям, Совет молодых специалистов.

Л.Д. Баранов — автор более 40 научных статей и 3 изобретений, награждён орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почёта», медалями, знаком «Почётный радист». ■

