

Ю.Ф. Адамов^{1,2}, Н.М. Горшкова¹, А.Г. Сibaгатуллин¹

¹ Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

² Московский физико-технический институт (государственный университет)

Влияние полупроводниковой технологии на глобализацию электронной промышленности

В статье особо отмечена глобализация электронной промышленности и переход к системе контрактного производства. Глобализация процесса разработки микросхем возможна только на основе унификации технологических и проектных решений. Основой новой методологии является децентрализация процесса проектирования сложных изделий путём объединения заранее разработанных и многократно используемых схмотехнических блоков.

Ключевые слова: полупроводниковая микросхема, производство микросхем, глобализация, полупроводниковые наноразмерные приборы, разработка микросхем, средства проектирования.

I. Основы глобализации промышленности — унификация технологии

Кремниевая микроэлектроника сформировалась как отрасль промышленности около 40 лет назад. Все это время технология микроэлектроники развивалась согласно *закону Мура*, то есть минимальные размеры элементов микросхем уменьшались в $\sqrt{2}$ раз каждые 2,5 года, а число элементов на кристалле за этот же период удваивалось. Производительность технологического оборудования и его стоимость постоянно возрастали.

В конце 80-х годов XX века темпы роста полупроводникового производства несколько снизились. В это время ведущие производители микросхем в США объединились и разработали единую десятилетнюю программу развития технологии в микроэлектронике под названием «Национальная маршрутная карта для полупроводниковой промышленности» (National Technology Roadmap for Semiconductors, NTRS), которая получила поддержку правительства США и действовала с 1990 по 1999 гг.

Закон Мура стал методической основой NTRS, поскольку именно в 90-е годы полупроводниковая промышленность США достигла определённого превосходства над европейскими и японскими производителями. Однако в конце XX века стоимость комплекта технологического оборудования для производства микросхем превысила 1 млрд долларов. Дальнейшее поддержание темпов развития технологии оказалось тяжёлым бременем даже для экономики США. Поэтому новая программа развития стала международной, к ней подключились все ведущие мировые полупроводниковые компании. Программа получила название «Международная маршрутная карта для полупроводниковой промышленности» (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS).

Первая редакция разработана на 15 лет (2000–2014 гг.). Каждые два года выпускается новая редакция, которая также устанавливает рубежи развития микроэлектроники на 15 лет [1], последняя действующая редакция (2009 г.) рассматривает период с 2009 по 2024 гг. В промежутках между изданиями редакций выпускаются дополнения к ITRS.

Международная программа — это не директивный документ, а квалифицированный прогноз, составленный ведущими специалистами и членами экспертного совета. В течение года члены экспертного совета готовят материалы и передают их в организационный комитет. Раз в год экспертный совет собирается на конференцию, на которой утверждает очередную редакцию или дополнение к последней редакции. Состав направлений, по которым ведётся прогноз, постоянно расширяется. Кроме технологических рубежей рассматриваются возможности САПР и методы проектирования, средства контроля микросхем, организация производства и модели бизнеса.

II. Ограничение ресурсов — движущая сила развития глобализации

Первоначально производство изделий микроэлектроники осуществлялось только в крупных вертикально интегрированных компаниях (Integrated Device Manufacturers, IDM).

В начале 90-х годов XX века индустрия микроэлектроники впервые столкнулась с ресурсными ограничениями нового типа — нехваткой специалистов-разработчиков. Несомненно, производительность проектирования возросла в сотни раз за счёт использования новых аппаратных и программных средств разработки. Однако этого оказалось явно недостаточно для загрузки имеющихся производственных мощностей.

В 2001 году начался кризис перепроизводства. Старая номенклатура микросхем производилась в избытке, а для загрузки производственных мощностей новых разработок не хватало. И это при том, что уже были подготовлены спецификации и стандарты на новые системы интерактивного цифрового телевидения, цифрового радио, цифрового кинематографа, высокоскоростной цифровой радио- и оптической связи и другие. Крупные корпорации исчерпали резервы дополнительного привлечения квалифицированных специалистов-разработчиков. Мелкие компании не могли самостоятельно реализовать крупные современные проекты. Именно в период кризиса произошло осознание того факта, что не только технология, но и организация разработки современных проектов в области микроэлектроники требуют привлечения глобальных ресурсов. Началось ускоренное развитие дизайн-центров и кремниевых фабрик. Сейчас кремниевые фабрики располагают новейшими технологическими процессами и современной производственной базой.

В XXI веке продолжается экспоненциальный рост как стоимости производственных участков, так и их производительности. Размеры элементов в микросхемах уменьшились до нанометровых величин. Строительство и полную загрузку производственных участков могут осуществить самостоятельно только самые крупные IDM-компании. На сегодняшний день к таким можно причислить только компанию Intel. Остальные IDM производители осваивают новые технологии в составе научно-производственных объединений. Например, консорциум STI (Sony, Toshiba, IBM, Chartered, AMD) создал общие производственные мощности для производства микросхем с размерами элементов 65 и 45 нм. Консорциум Crolles 2 Alliance (STM, NXP Semiconductors, Freescale Semiconductors, TSMC и др.) совместно финансирует разработки новых технологий на кремниевой фабрике TSMC [2].

Наиболее вероятно, что освоение производства микросхем с минимальными размерами 32 нм будет осуществляться не IDM компаниями, а объединениями компаний при их добровольном участии. Это обусловлено тем, что по различным оценкам затраты на подготовку и освоение такого производства превысят 10 млрд долларов. Производственный участок должен выпускать не менее 30 тысяч пластин в месяц, при стоимости около 10 тыс. долларов за пластину [1].

Дезинтеграция процессов проектирования и производства интегральных и электронных технологий (ИЭТ) — это всего лишь проявление единого процесса глобализации электронной промышленности. Одновременно с дезинтеграцией управляющих структур происходит процесс добровольной консолидации разработчиков и производителей ИЭТ. Быстрая смена продуктов на рынке потребительской электроники требует координации

действий участников бизнес-процесса. Поэтому основной формой управления становится виртуальная корпорация — сообщество компаний, объединённых не только торгово-экономическими, но и долгосрочными технологическими связями [2].

Одновременно происходят два процесса: объединение производственных компаний и разделение компаний-разработчиков. Например, объединение малайзийской компании 1st Silicon и немецкой компании X-FAB, отделение Freescale Semiconductors от концерна Motorola.

Глобализация процесса разработки микросхем, которая возможна только на основе унификации технологических и проектных решений. Основой новой методологии является децентрализация процесса проектирования сложных изделий путём объединения заранее разработанных и многократно используемых схмотехнических блоков. Методология получила название «система на кристалле» (СНК), (system on chip, SOC), а составные части микросистемы получили название IP-блоки (от англ. intellectual property — интеллектуальная собственность). В отечественной литературе составные части микросистемы принято именовать сложнофункциональными блоками (СФ-блоками).

Развитие методологии требует единства проекта и совместимости СФ-блоков. Стандартизацией требований к блокам занимается ряд национальных и международных организаций [3]. Многократное использование СФ-блоков возможно только при технологической совместимости и масштабируемости схмотехнических решений. Документы ITRS предписывают преимущественное использование унифицированных решений. Для микронных и субмикронных микросхем требования технологической совместимости и масштабируемости хорошо согласуются как с возможностями технологии, так и с методологией проектирования «систем на кристалле». При переходе к нанометровым размерам необходим пересмотр методологии проектирования.

III. Проблемы развития нанoeлектроники

Нанoeлектроника — это общее определение ряда технологий, направленных на реализацию электронных приборов с нанометровыми размерами структурных областей [4]. К ним относятся эмиссионные приборы на основе углеродных трубок, полупроводниковые лазеры с квантовыми «ямами», наноразмерные электромеханические системы, полевые и биполярные транзисторы с размерами элементов менее 100 нм, другие полупроводниковые приборы с нанометровыми размерами. Объединяет эти приборы новый подход к характеристике их параметров. Классическая электродинамика не может описать все явления в нанометровых элементах. Для анализа в понятиях

квантовой физики нанометровые приборы слишком сложны. Для описания поведения таких приборов обычно применяются гибридные модели, в которых используются уравнения классической электродинамики и некие виртуальные (эффективные) значения параметров физической структуры.

Наибольшее распространение и влияние на технический прогресс имеют полупроводниковые наноразмерные приборы. В лабораторных условиях сейчас уже реализованы полупроводниковые приборы с размерами элементов в единицы нанометров [5]. Причём такие приборы используются в микросхемах с миллиардами транзисторов на одном кристалле [6]. В литературе обсуждаются проблемы развития нанотехнологий, и эти проблемы очень серьезные [7, 8]. Дискуссия развернулась вокруг экономической программы развития нанотехнологий. Прогнозы предсказывают убыточность производства наноразмерных микросхем. Комплект оборудования для одного производственного модуля стоит до 10 миллиардов долларов США. Разработка и подготовка производства одной микросхемы с миллиардами элементов обходится от десятков миллионов до миллиарда долларов. Если учесть, что срок востребованности на рынке для изделий электронной техники очень ограничен (4–6 лет), то продукты окажутся очень

дорогими. Вызывает большие сомнения наличие платежеспособного спроса. Проблема экономики в полупроводниковой наноэлектронике волнует не только менеджеров корпораций, но и высокопоставленных государственных чиновников [8, 9].

Рентабельное производство предписывает превышение стоимости реализованной продукции над затратами на её разработку и производство. Стоимость производства единицы продукции определяется минимальными размерами элементов, размером кристалла микросхемы, числом технологических операций в производственном процессе, коэффициентом выхода годных изделий (КВИ) и временем контроля изделия. В среднем стоимость единицы площади обработанной кремниевой пластины увеличивается обратно пропорционально минимальному размеру элементов, а число элементов на этой площади возрастает обратно пропорционально квадрату минимального размера. Затраты на разработку микросхемы в первом приближении пропорциональны числу элементов. При пересчёте на единицу площади затраты на разработку обратно пропорциональны квадрату минимального размера. Следовательно, с увеличением сложности выпускаемых микросхем и уменьшением размеров их элементов увеличивается и минимальный объём рентабельного производства (рис. 1).

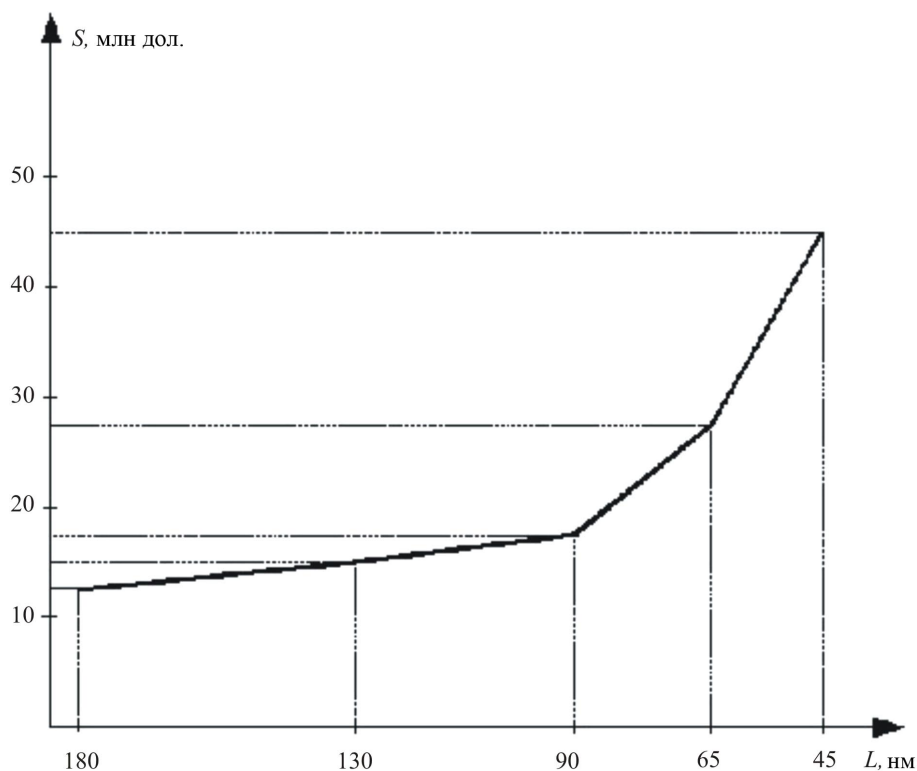


Рис. 1. Увеличение стоимости разработки (S) при уменьшении минимальных размеров элементов микросхем (L)

Экономической основой развития рынка информационных технологий должно стать изменение структуры этого рынка. Прибыль будет создаваться не в системе сбыта электронных систем, а в сфере предоставления информационных услуг.

Основы нового бизнеса уже заложены в системах телефонной сотовой связи и Интернете. В обозримом будущем автоматические информационные сети должны внедриться почти во все сферы человеческой деятельности. Это развлечения и связь,

медицина и образование, бизнес и торговля, системы безопасности и навигация, а также многое другое [1, 7]. Информационные сети будут построены по принципу повсеместного, фонового (невидимого) информационного окружения. Информационные сети должны быть «невидимы» не в том смысле, что они незаметны, а в смысле — привычны. Повсеместное информационное окружение должно изменить качество и стиль жизни, характер трудовой деятельности, многократно увеличить производительность труда.

Изменение качества жизни людей — это объявленная цель прогресса. Однако исследования ведутся и в других направлениях, связанных с национальной безопасностью и международной политикой:

- влияние на общественное сознание населения через средства массовой информации, в том числе и в других государствах;
- создание международного имиджа;
- увеличение военного потенциала путём создания автоматического высокоточного оружия, а также глобальной системы выявления явных и скрытых угроз.

IV. Источники финансирования нанотехнологий

Успешное функционирование полупроводникового производства в современных условиях возможно только при организации сбыта продукции на международном рынке. Затраты на подготовку производства сложных микросхем очень велики и оправдываются только при очень больших объёмах их сбыта. Технические характеристики аппаратуры улучшаются при использовании более сложных и более специализированных микросхем. Рынок сбыта сложных специализированных микросхем сужается. В эпоху наноэлектроники проблема объёмов сбыта микросхем станет ключевой.

Международным сообществом уже определены основные пути развития информационных технологий и возможности снижения неоправданных затрат.

Первое направление — это глобальная унификация технических решений, например, международная система стандартизации (International Standard Organization, ISO) или ITRS.

Второе направление — создание глобальных альянсов, целью которых является раздел секторов рынка и обмен техническими достижениями, например, альянс STI (Sony, Toshiba, IBM) [2].

Третье направление — разработка национальных программ развития информационных технологий, объединяющих усилия государства и частного сектора, например, программа IT 839 Strategy, действующая в Южной Корее [7].

Финансовые ресурсы, принадлежащие частным корпорациям или государственным структурам, используются в соответствии с местными

условиями. Например, в США в секторе информационных технологий занято более 20% трудоспособного населения. Собственных ресурсов сектора достаточно для устойчивого развития. Следует отметить, что большая часть средств, направляемых на развитие информационных технологий, сосредоточена в инвестиционных и научных фондах корпораций, которые получают налоговые льготы от государства.

Например, фонд Билла Гейтса объявил программу, согласно которой в ближайшие годы планирует потратить 38 миллиардов долларов на развитие информационных технологий в образовании и медицине, в том же русле направлена деятельность Фонда Сороса, хорошо известного в России. Роль государства состоит в стимулировании новейших перспективных разработок как путём прямого финансирования, так и формированием госзаказа. Однако в процентном отношении государственные средства невелики. Корпорации сами озабочены сохранением технологического лидерства в секторе информационных технологий.

Проблема США в том, что в стране практически исчерпаны ресурсы для увеличения численности квалифицированных специалистов в этой области. Активная миграционная политика, проводимая США, также имеет серьёзные ограничения. Поэтому американские корпорации создают филиалы по всему миру, в том числе и в России.

В Китае политика государства направлена на привлечение иностранных инвестиций в производство электронных компонентов и изделий бытовой техники. Уже сейчас Китай является крупнейшим в мире производителем бытовой электроники и занимает второе место по объёму производства электронных компонентов, включая и интегральные микросхемы. Уровень полупроводникового производства соответствует современным достижениям. Рубеж 100 нм китайская промышленность уже преодолела. Однако развитие электронного комплекса в Китае происходит неравномерно. Уровень разработок электронной аппаратуры и компонентов сравнительно низкий. Иностранные инвесторы не вкладывают деньги в подготовку китайских специалистов, а собственной школы в стране нет. Поэтому правительство выделяет значительные средства на обучение китайских студентов и аспирантов за рубежом, активно содействует возвращению образованных китайцев на Родину. Постоянно возрастает и уровень подготовки специалистов в самом Китае.

Комплексная программа развития информационных технологий объявлена правительством Южной Кореи. Программа называется IT 839 Strategy [7]. Целью программы является построение материальной базы информационного общества. Для этого в стране должны быть проведены работы по созданию инфраструктуры, во-первых, для единой системы цифровой радиосвя-

зи, во-вторых, для автоматической сенсорной сети; в-третьих, для сети Интернет, поддерживающей протокол версии 6.

Создание и поддержка этих инфраструктур потребует развития девяти новых производств: микросхем с нанометровыми размерами элементов, встроенного программного обеспечения, компьютеров на их основе, аппаратуры мобильной связи, сенсорной аппаратуры, робототехники, аппаратуры дистанционного управления, аппаратуры для цифрового телевидения, производства цифровых медиа-продуктов (кино, телевидение, игры, музыка).

На этой базе должны быть развернуты восемь новых информационных сервисов: беспроводная цифровая связь, цифровое радио, цифровое телевидение и доставка медиа-продуктов, домашняя информационная сеть, дистанционное управление объектами, радиочастотная идентификация, голосовая и видео связь через сеть интернет.

Нанотехнологии в программе рассматриваются только как средство достижения конечных целей. Производство микросхем может быть и убыточным. Деньги должны принести информационные сервисы.

Из приведённых примеров видно, что государственные структуры принимают активное участие в деятельности корпораций и целенаправленно влияют на создание новых организационных структур как национального, так и международного масштаба. Основное отличие новых организационных структур состоит в добровольном участии и коммерческой заинтересованности входящих в них компаний.

V. «Экономика знаний» в нанoeлектронике

Современное производство рентабельно, если сбыт продукции осуществляется в глобальном масштабе. Номенклатура востребованной продукции включает десятки тысяч наименований. Ни одна страна не в состоянии обеспечить себя всеми типами микросхем. Конкурентоспособность полупроводникового производства — это условие его выживания и развития. Конкурентоспособность определяется как уровнем технологии, так и качеством подготовки проектов.

Разработка современных микросхем осуществляется в сложной информационной инфраструктуре, включающей средства автоматизированного проектирования (САПР), характеризованные библиотеки логических элементов (ЛЭ) и функциональных блоков, средства для расчёта коррекций на фотошаблонах, подготовку встроенного программного обеспечения, средства и методы подготовки изделий к производственному контролю. В России есть основные элементы этой инфраструктуры, но они пока не вовлечены в процесс подготовки нового производства. Возможно-

сти привлечения зарубежных предприятий к решению инфраструктурных задач очень ограничены.

В последние годы произошли коренные изменения в организации мировой электронной промышленности. Производственные центры переместились в страны Юго-Восточной Азии. Мелкие центры проектирования и филиалы крупных компаний рассеяны по всему миру. Есть они и в России. Центры корпоративного управления сосредоточены в офисах транснациональных корпораций. Производство ведётся на контрактной основе. Даже министерство обороны США покупает микросхемы, произведённые в Юго-Восточной Азии. И эта система называется «экономикой знаний». Основную прибыль получают не производители, а разработчики микросхем и информационных систем. Ограничение доступа к информации — это основа бизнеса и благосостояния информационного общества. Законодательство США и стран Евросоюза ограничивает доступ к информации, которая может быть использована в коммерческих целях.

Какая конкретная информация обеспечивает прибыль корпораций в электронной промышленности? В первую очередь — это методология и средства проектирования для возможностей производства (ПДВП). Совершенно очевидно, что проекты, не соответствующие возможностям производства, не реализуются. Проблема в эффективности использования этих возможностей. Разработка микросхем всегда ведётся в рамках конструктивно-технологических и электрофизических ограничений.

Традиционная методология проектирования предполагает одностороннее действие ограничений и отсутствие связей между разными граничными значениями. Методология ПДВП допускает превышение граничных значений параметров для одних элементов проекта при наличии запасов в других элементах. Перераспределение ограничений между элементами обеспечивает улучшение технических и производственных показателей. Средства ПДВП позволяют в несколько раз улучшить быстродействие, энергетическую эффективность и выход годных изделий. Возможность применения ПДВП обеспечивает конкурентоспособность продукции.

Применение методологии проектирования для возможностей производства имеет два информационных ограничения. Первое — это наличие программного обеспечения. Второе — характеристика производственного процесса и элементной базы в соответствии с требованиями методологии и систем проектирования. Ни того, ни другого в России сейчас нет и в ближайшее время не планируется. Можно с уверенностью утверждать, что доступ к средствам САПР для методологии ПДВП будет очень ограничен. Базы данных, характеризующие зарубежный производственный участок,

окажутся почти бесполезными. Новое современное производство останется незагруженным. России много однотипных микросхем не потребуется, за рубежом они востребованы не будут, а иностранные заказчики без поддержки средств ПДВП не появятся.

VI. Задачи развития отечественных структур электронной промышленности

В России необходимо создать собственную «экономику знаний» в сфере информационных технологий. Развитие методологии и средств проектирования конкурентоспособных микросхем должно занимать в этом процессе не последнее место. Во всем мире развитие информационной инфраструктуры проектирования управляется квалифицированным прогнозом типа «дорожной карты» (ITRS). Прогноз является методической основой и средством координации усилий участников контрактного производства. Создание отечественной информационной инфраструктуры должно начинаться с формирования экспертного совета. Целью работы совета должна стать подготовка и обновление прогноза развития российской электронной промышленности и средств проектирования микросхем.

Сейчас в России нет предприятий, способных создать конкурентоспособный массовый продукт в области нанoeлектроники. Препятствия к этому не финансовые, а информационные. Никто не готов вкладывать деньги в формальные методики и программы моделирования микросхем, которые не дают прямого увеличения доходов. Если не начать создание инфраструктуры проектирования сейчас, то со временем проблема информационного обеспечения обострится и средства найдутся. Однако время будет упущено, производство микросхем станет убыточным.

Важной составляющей «экономики знаний» является сосредоточенность на развитии отдельных приоритетных направлений. Специализация охватывает не только корпорации, но и континенты. Лучшие процессоры разработаны в США, лучшие схемы памяти — в Юго-Восточной Азии, лучшее телевидение — в Европе. В России также должны быть определены приоритетные направления развития информационных технологий.

Сейчас ни одна страна не в состоянии конкурировать с глобальным альянсом транснациональных корпораций. Сотрудничать с этим альянсом

на принципах равноправия и взаимной выгоды можно только обладая мировым приоритетом и конкурентными преимуществами в отдельных областях знаний и производства.

В качестве базовых направлений можно предложить следующие:

- разработка программного обеспечения. Во всем мире ценятся российские математики и программисты. Математические школы сохранились в вузах. Направление не требует больших капитальных вложений;

- полупроводниковая оптоэлектроника, где Россия имеет высокий научный потенциал;

- сенсорная техника имеет хороший потенциал в Российской академии наук, практически во всех естественно-научных институтах РАН имеются оригинальные разработки мирового уровня, связанные с измерениями физических величин.

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2009 Edition. www.itrs.net.
2. *Макушин М.* Мировая микроэлектроника: чем меньше размеры, тем крупнее игроки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — № 6. — С. 104–112.
3. *Немудров В., Мартин Г.* Системы на кристалле. Проектирование и развитие. — М.: Техносфера, 2004.
4. Нанотехнологии в электронике / под редакцией Ю.А. Чаплыгина. — М.: Техносфера, 2005.
5. *Choi Y., Lindert N., Xuan P. [et al.]*. Sub-20 nm CMOS Fin FET Technologies // International Electron Device Meeting Technical Digest. — 2001. — P. 421–424.
6. *Kyung K., Kim C., Lee J., Kook J. [et al.]*. A 800Mb/s/pin 2Gb DDR2 SDRAM using an 80 nm triple metal technology // IEEE International Solid-State Circuits Conference. — 2005. — P. 468–469.
7. *Chin D.* Nanoelectronics for an Ubiquitous Information Society // IEEE International Solid-State Circuits Conference. — 2005. — P. 22–26.
8. *Адамов Д.Ю.* Нанoeлектроника: путь к информационному обществу // Электросвязь. — 2008. — № 7. — С. 7–11.
9. *Chou D.* Integration and Innovation in the Nanoelectronics Era // IEEE International Solid-State Circuits Conference. — 2005. — P. 36–41.

Поступила в редакцию 01.02.2010.