

УДК 629.78

## Внедрение новых микроэлектронных технологий в бортовую космическую аппаратуру — системы в корпусе

Н. С. Данилин<sup>1</sup>, И. Ю. Булаев<sup>2</sup>, Д. А. Белов<sup>3</sup>, И. А. Морозов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>д. т. н., проф., ОАО «Российские космические системы»

<sup>2,3,4</sup>ОАО «Российские космические системы»

e-mail: n\_danilin@rambler.ru

**Аннотация.** Впервые в России разработаны теория и методические основы, подходы и принцип создания, развития и целевого использования инновационных космических микросистем в корпусе как основы макроуровня перспективных микроспутников. Прогрессивная технология позволяет снизить массогабаритные характеристики изделия, его энергопотребление, повысить функциональность в единице объема, сократить цикл «разработка–выпуск» новых космических аппаратов.

**Ключевые слова:** наноспутники, системы в корпусе, космические аппараты

## Introduction of New Microelectronic Technologies into On-Board Space Equipment — System in Package

N. S. Danilin<sup>1</sup>, I. Yu. Bulaev<sup>2</sup>, D. A. Belov<sup>3</sup>, I. A. Morozov<sup>4</sup>

<sup>2</sup>doctor of technical science, professor, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

<sup>2,3,4</sup>Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: n\_danilin@rambler.ru

**Abstract.** For the first time in Russia the theory and methodological basis, approaches and principles of creation, development and proper use of innovative space microsystems in package were developed as the foundation of the macrolevel of advanced microsatellites. Innovative technology allows to reduce the product weight-size parameters and power consumption, increase the functionality per unit volume, and shorten the “development–production” cycle of new spacecraft.

**Key words:** nanosatellites, System in Package (SiP), spacecraft

## Введение

Ведущие мировые фирмы космического и оборонного сегментов уже несколько лет используют в своих изделиях так называемые системы в корпусе (СвК) (System in Package), где на смену электронно-компонентной базы (ЭКБ) пришли микросистемы в корпусе. Система в корпусе — это технология, которая позволяет интегрировать КМОП, КНИ, КНС, биполярные и пленочные структуры с СВЧ, МЭМС оптоэлектронными и дискретными компонентами в одном корпусе. Уникальность этой технологии определяется соотношением между ценой реализуемых изделий и их функциональностью в единице объема корпуса.

Нами впервые в РФ разработаны теория и методические основы, подходы и принцип создания, развития и целевого использования инновационных космических микросистем в корпусе как основы макроуровня перспективных микроспутников. Эта прогрессивная технология позволяет снизить массогабаритные характеристики изделия, его энергопотребление, повысить функциональность в единице объема, сократить цикл «разработка–выпуск» новых космических аппаратов.

Результаты указанных исследований одобрены на коллегии Минэкономразвития (июль 2011 г.), вошли в проект «Сколково», а также в межправительственную Программу РФ–США по развитию космической техники [1].

Электронная компонентная база (ЭКБ) относится к критически важным высоким технологиям, оказывая определяющее влияние на технический облик и темпы развития космических систем (рис. 1). По результатам проведенных исследований в этом сегменте получена следующая информация.

Западные партнеры предпочитают создавать новые космические системы на основе типовых гибридных узлов, т. н. системы в корпусе (СвК). Выбор кристаллов для них осуществляется по технологии «Known to Good» — заведомо хорошие кристаллы, прошедшие квалификационные испытания на производстве с нормами проектирования 0,25–0,5 МКР, в будущем — 65 нм и 10–22 нм и имеющие срок хранения до 40 лет. СвК — это новые поколения реализации многокристалльных гибридных узлов. Основу СвК для космических систем

составляет интеграция полифункций на кристаллах цифровой, аналоговой и радиочастотной техники, активных и пассивных элементах (рис. 2). Программный продукт для них (Soft), что очень важно, на уровне системных достижений космического приборостроения, а это является существенным преимуществом для приборостроительных фирм. Достигнуто резкое увеличение функциональных возможностей в единице объема и массы при минимальном потреблении энергии. Происходит значительное уменьшение себестоимости проектов и сроков реализации за счет сокращения циклов проектирования и квалификационных испытаний. Создаются интегрированные аналого-цифровые системы с новыми качественными показателями. Основой для применения перспективных кремниевых пластин в СвК могут стать достижения отечественных фирм «Микрон» (академик Г. Я. Красников), НИИСИ РАН (академик В. Б. Бетелин), НИИСИ им. Ю. Е. Седакова (г. Нижний Новгород).

СвК — это новый реальный путь инновационного применения достижений современной микроэлектроники для целей создания наноспутников [2].

Радиационная стойкость новых космических систем не может быть обеспечена классическими пассивными методами (экранирование и защита с помощью титановых и алюминиевых пластин) — слишком мала активная масса спутника, чтобы защита превосходила ее в несколько раз. Поэтому основу радиационной стойкости составляет специальный подбор полупроводниковых пластин, в том числе и кремний на изоляторе (КНИ) и кремний на сапфире (КНС). Вторичным эшелоном радиационной защиты является корпус для СвК — керамический или металлокерамический, типа изготавливаемого фирмой «Киосера» (Япония). Нами во взаимодействии с отечественными специалистами проработан комплекс вопросов по физической архитектуре систем в корпусе, системным требованиям к ним, по специфике проектирования для космических объектов, включая наноспутники, по сборке СвК, по их надежности и радиационной стойкости, эффективности, по тестированию систем в корпусе. В данной работе сделан акцент на выборе некорпусированных кристаллов.

Системы в корпусе (СвК) являются одним из самых перспективных и экономически обоснованных

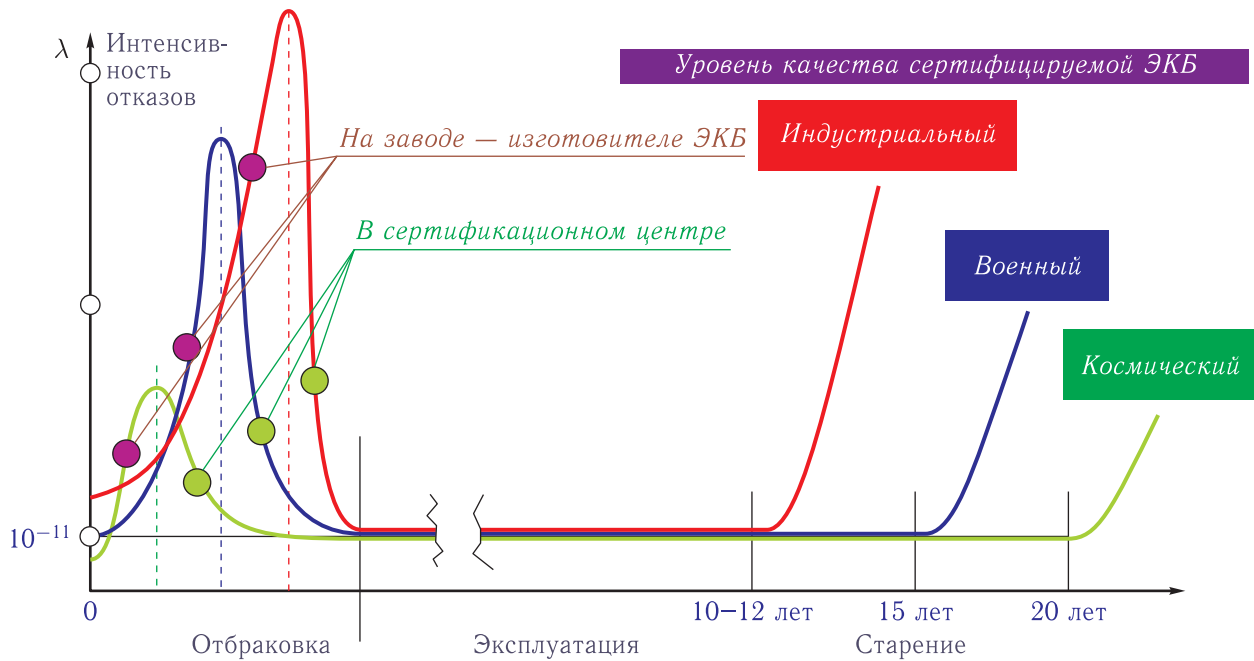


Рис. 1. Качество ЭКБ космических систем

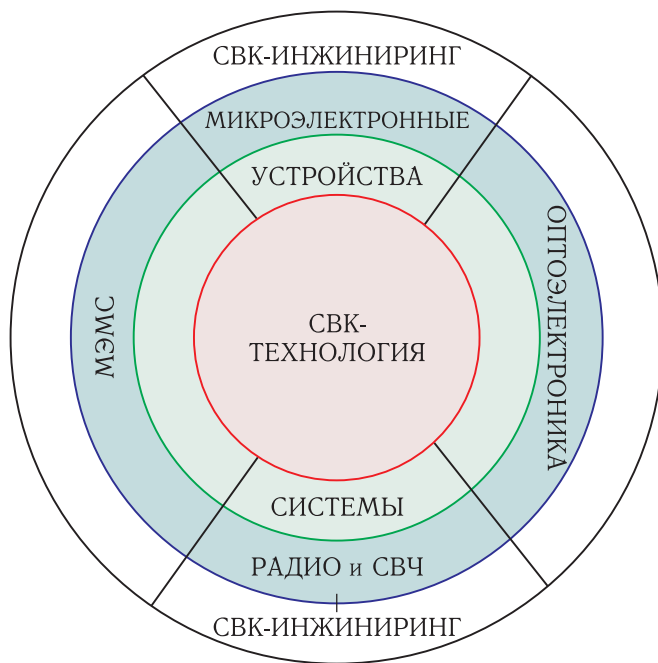


Рис. 2. Обобщенная концептуальная модель систем в корпусе

путей создания микроминиатюрных электронных систем сегодня (рис. 3).

Применение СВК в ряде стратегических направлений, как, например, космическая и военная

промышленность, определяется следующими факторами (табл. 1):

- необходимость в интеграции цифровых, аналоговых и СВЧ-подсистем с МЭМС модулями и тонко/толстопленочными схемами с целью получения максимальной функциональности в единице объема;
- требования к уменьшению габаритных размеров изделий и снижению их веса;
- тенденция реализовать тестопригодные системы еще на уровне разработки проекта за счет соответствующего применения функциональной декомпозиции по всем уровням системной иерархии и использовании унифицированных и уже апробированных технических решений;
- необходимость в повышении технологичности и надежности выпускаемых изделий;
- требования к существенному снижению расходов разработки, испытаний и производства электронных микросистем (рис. 4).

Важнейшее значение при разработке и реализации СВК имеет выбор квалифицированных полупроводниковых кристаллов, или known good



Рис. 3. Эволюция надежности радиоэлектронных космических систем на базе применения СвК

Таблица 1. Соотношение параметров Систем в Корпусе (СвК) и Систем на Кристалле (СнК)

Параметры	СвК	СнК
Стоимость проекта	X\$	(7–10)X\$
Время реализации до прототипа	6–9 мес	18–36 мес
Коллектив	Любой, для разработки системных электронных изделий	Высококвалифицированный специализированный
Отладка прототипа	1–2 мес	> 12 мес
Серийность	> 10 000	Малая
Радиационная стойкость	(100–1000) Крад	Не всегда достижима
Повторяемость производства	В течение 20 лет	С большими затратами

die (KGD), а также технология их установки в СвК. Монтаж полупроводниковых бескорпусных элементов (*baredie* — кристаллов) совместно с другими компонентами на общей подложке начался с 2005 г. Эта технология оставалась на исследовательском и экспериментальном уровне вплоть до начала 2000-х гг., когда с появлением новых подходов к корпусированию промышленность двинулась к созданию микросистем в корпусе. Сегодня в перечень микроэлектронных изделий, которые постав-

ляются потребителям, входят следующие типы квалифицированных кристаллов:

- (1) бескорпусной кристалл с алюминиевыми или золотыми контактными площадками (сигнальные и питания), готовый к разварке (*bondabledie*);
- (2) бескорпусной кристалл, распаянный на подложке (или микроплате) COB (*chip-on-board*);
- (3) полупроводниковые пластины (*wafervlevelpackagedie*) с механической защитой поверхности

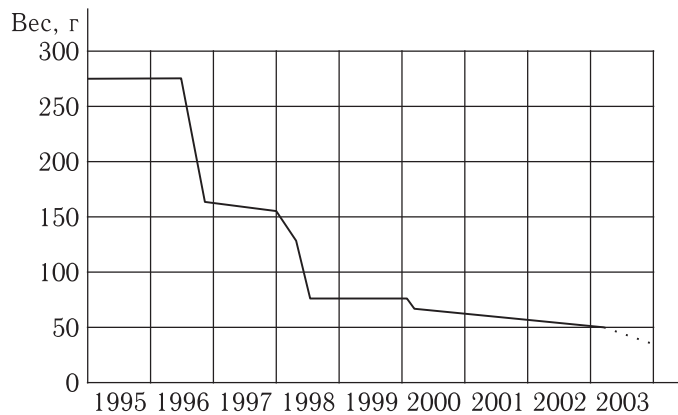


Рис. 4. Тенденция уменьшения веса бортовых управляющих устройств на базе СвК

кристаллов, с встроенными межсоединениями между портами ввода/вывода и площадками питания либо с возможностями модификации этих соединений.

Целью настоящего исследования является выявление основных вопросов применения KGD в СвК для нужд космической промышленности:

- производители, приобретение и особенности KGD;
- вопросы стандартизации KGD;
- вопросы технологий сборки и тестирования KGD.

## Производители, приобретение и особенности KGD

Ввиду недостаточной информации и опыта по вопросам приобретения KGD в отечественной промышленности в работе приводится практика NASA и МО США [4].

В США к настоящему времени KGD предлагают AMI Semiconductor, Aeroflex, Avago Technology, Infineon Technology, NXP, Intel, Freescale, IBM, LSI Logic, Samsung Electronics, Texas Instruments, Analog Devices, Linear Technology, AMD, Catalyst, National Semiconductor, Maxim, Signal Process и др. Проблемы приобретения связаны с тем, что, во-первых, большинство предлагаемых KGD не соответствуют квалификациям QML Q/V

и, во-вторых, коммуникация с производителями достаточно сложна по ряду причин.

Следует отметить, что в 2005 г. для нужд ВПК США была создана ассоциация производителей KGD под названием Die Product Consortium (DPC), в которую входит большинство указанных производителей. До 2005 г. вся KGD-инфраструктура была связана только с программой DARPA (Defense Advanced Project Agency) МО США. В 2005 г. появилась программа DPC по расширению рынка многокристалльных сборок, а с 2006 г. DPC превратилась в орган стандартизации в области KGD. Дорожная карта DPC построена на двухгодичных циклах. В ней отдельное место занимает практическое развитие технологии СвК. Для этой цели в консорциуме создана SiP Project Team (Группа по развитию СвК). В ее задачи входит работа в области методологического и технологического развития СвК, обмен СвК-информации между членами консорциума, работа с партнерами вне консорциума в области технологии и рынка и др.

Первым шагом до приобретения KGD является выбор потенциального производителя, который проводится либо по методике Jet Propulsion Laboratory — Electronic Parts Engineering Office (для NASA), либо по методике МО США MIL-STD 1388-1A Logistic Support Analysis и IEC 62258 Semiconductor Die Products: Requirements for Procurement and Use. Выбор сводится к следующим основным процедурам:

- первоначальный выбор производителя на базе предварительных соображений о коммуникативности, технологичности, цене изделия и др.;
- определение изделия в продуктовой гамме производителя;
- ознакомление с технологическими особенностями производства пластин, из которых или на которых поставляется изделие;
- ознакомление с особенностями разработки изделия;
- анализ параметров системы качества, действующей на предприятии;
- анализ системы обеспечения надежности изделия;

- анализ тестовой среды и технология тестирования изделия;
- анализ системы отбраковки.

В продуктовой гамме предлагаемых на рынке кристаллов KGD самый большой класс составляют так называемые кристаллы на подложке, или COB (*chip-on-board*). Это бескорпусные кристаллы, которые распаяны (проводами или BGA) на подложке для межсоединений. Они отличаются следующими характеристиками:

- кристалл установлен на подложке (или на микрореплате);
- кристалл приклеен к подложке при помощи токопроводящей или изоляционной эпоксидной пасты с соответствующим составом;
- кристалл электрически присоединяется к подложке разваркой траверсов;
- кристалл капсулирован защитным покрытием.

В связи с этим процесс сборки COB достаточно простой и включает три базовых шага: закрепление кристалла на подложке, разварка электрических проводов и капсулирование. Одновременно следует отметить, что разработка COB достаточно критична как к области применения кристалла, так и к компонентам поверхностного монтажа, которые также требуется установить на той же подложке.

## Вопросы стандартизации

В 2003 г. программа МО США DARPA поручила разработку первого стандарта по приобретению и распространению KGD-изделий, который теперь является индустриальным стандартом JESD 49 Procurement Standard for Known Good Die (KGD). К моменту написания статьи список KGD стандартов дополнен:

- J-STD-12 Implementation of Flip Chip and Chip Scale technology;
- J-STD-26 Semiconductor Design Standard for Flip Chip Applications;
- J-STD-28 Performance Standard for Construction of Flip Chip Scale Bumps;

- EDR-4703 Quality assurance quide lines for bare die including KGD;
- ES 59008 Data requirements for semiconductor die;
- IEC 62258 Semiconductor Die Products: Requirements for Procurements and Use.

Все эти стандарты требуют детального ознакомления, но необходимо обратить внимание на два из них в связи с небольшим опытом в области СвК и KGD в отечественных разработках. ES 59008 Data requirements for semiconductor die определяет, какие данные о KGD должен предоставлять производитель потребителю для принятия решения по применению выбранного KGD, а именно:

- данные по идентификации продукта и прослеживанию его создания;
- технические характеристики продукта;
- конструктивные параметры кристалла;
- данные по тестированию, качеству и надежности кристалла;
- требования к условиям работы с кристаллом, его хранению и установки в сборках;
- термодинамические и электрические характеристики кристалла в различных режимах его эксплуатации и в различной окружающей среде в соответствии с техническими условиями его применения.

IEC 62258 Semiconductor Die Products: Requirements for Procurements and Use рассматривает вопросы поставки и применения KGD-изделий следующих типов: пластины, кристаллы, готовые к разварке, кристаллы и пластины с подсистемой межсоединений и частично капсулированные кристаллы. Стандарт определяет минимальные требования к:

- данным, сопутствующим поставляемых KGD;
- условиям и процедурам по работе, хранению и транспортировке KGD.

## Вопросы технологии сборки и тестирования KGD

Кристаллы, применяемые в СвК, могут быть расположены как в планарном монтаже, так



и в 3D-сборках на общей подложке. При этом высота таких сборок — весьма критический параметр конструкции СвК. При стыковке до 8–10 кристаллов современная технология позволяет сборку с высотой прядка 1,2 мм, но требования миниатюризации уже ставят требование к высоте в 1–0,8 мм. Это, в свою очередь, ставит ряд ограничений по размерам шариков пайки и петель электропроводов для распайки, по толщине подложки и капсулирующего покрытия. Все кристаллы производятся на пластинах толщиной около  $350\text{E-}6$  мм. Чтобы реализовать сборку из 8 кристаллов, пластина изначально утончается до  $50\text{E-}6$  мм. Для этого применяются несколько методов: механическое полирование, химико-механическое полирование, мокрое или сухое травление и плазменная обработка. После такой обработки механическая прочность пластины (и кристалла в частности) сильно уменьшается и при дальнейших обработках весьма вероятно появление трещин и зон с внутренними напряжениями. По этой причине тестирование и отбраковка после утончения обязательны и сфокусированы на производственных процессах для KGD.

В 3D-компановках кристаллы могут быть одного или разных размеров. Поэтому и применяется непосредственная пирамидальная стыковка (при кристаллах разного размера) или стыковка с прокладками (*interposer*) при кристаллах одного размера. Точность стыковки ухудшается из-за разных коэффициентов адгезии отдельных кристаллов.

Разварка электрических соединений для KGD также отличается существенными ограничениями. Так, например, стандартный изгиб разварки имеет высоту  $150\text{--}170\text{E-}6$  мм, а в случае KGD этот размер меньше  $100\text{E-}6$  мм.

Технология сборки KGD, хотя достаточно точно определена, требует внимательной проработки в каждом отдельном случае и является всегда проблемно ориентированной.

Тестирование KGD — это часть общего тестирования СвК-изделий, что определяет и ряд особенностей при создании тестового подхода. Если тестирование и отбраковка прошли успешно на уровне пластины и/или кристалла на фабрике производителя и соответствующие тестовые данные переданы потребителю, то тестовая технология для собираемого на базе KGD-изделия должна

использовать эти данные, а конструкция СвК должна быть тестопригодной с учетом ее функционально независимых блоков (KGD).

## Заключение

Применение KGD-кристаллов в СвК — эффективный путь к инновационным разработкам в микроэлектронике. Технология KGD используется повсеместно в космических технологиях. Многие мировые производители предлагают KGD-продукты (рис. 5).

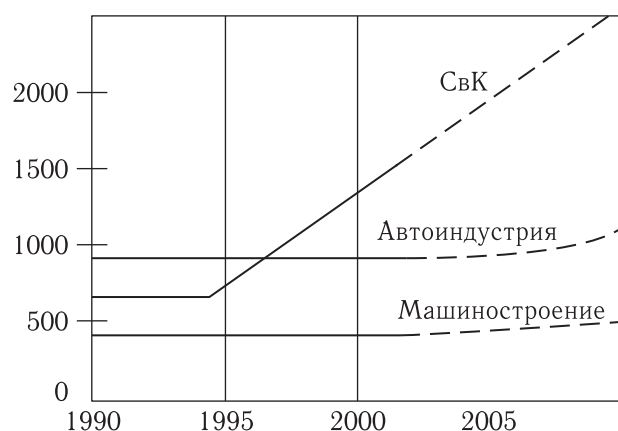


Рис. 5. Сравнительная тенденция рынка СвК в США

Требования к ним, к работе с ними, а также к условиям их приобретения, хранения и транспортировки стандартизованы в США и Европе.

Технология их применения в СвК-изделиях достаточно хорошо апробирована и ведущими производителями, накоплен уже 15-летний опыт.

Несмотря на достаточно хорошую обусловленность задачи применения квалифицированных кристаллов в СвК, от потенциального потребителя требуется достаточный опыт и необходимый уровень коммуникаций с производителями KGD и СвК.

Таким образом, СвК является стратегической технологией для мировой и отечественной космической промышленности и полностью определяет возможности по эффективному занятию рынка микроспутниковых систем (табл. 2). Доля СвК в космических аппаратах США за 2010 г. составляет 39% от общего объема ЭКБ — 0,5 млрд. долл. [3].

Эта тенденция стала практикой потому, что расходы на проектирование конечных изделий

Таблица 2. Зависимость стоимости микроспутников от степени внедрения систем в корпусе (СвК)

Реализация проекта с или без СвК	50–100 кг	10–50 кг	1–10 кг
Условная стоимость проекта в % без СвК	100	100	100
Условная стоимость проекта в % с СвК до 50 %	70	60	50
Условная стоимость проекта в % с СвК до 75 %	55	40	30
Условная стоимость проекта в % с СвК > 85 %	45	30	25

удешевились на 15–20 %. Процесс проектирования сокращен по времени на 40 %. Комплектация и построение изделий на базе заведомо исправных кристаллов known good die и типовых узлов в виде микросистем в корпусе сократила производственные расходы на 30 %. Тестирование изделий заняло не более 10 % от общего времени реализации изделий. В 2010 г. доля проектов с применением микроспутников составила 90 % от общего объема космических проектов США [5].

## Список литературы

1. Прокопьев В. Ю., Кусь О. Н., Оссовский А. В. Малые космические аппараты стандарта CubeSat. Современные средства выведения // Вестник науки Сибири, Томск, 2014, № 2(12), с. 71–80.
2. Филонин О. В., Белоконов И. В., Гиранов З. Г. Микропроцессорная магнитноиндукционная система для запуска микро- и наноспутников на заданные орбиты // Авиакосмическое приборостроение. М.: Научтехлитиздат, 2015. № 1. С. 60.
3. Данилин Н. С., Димитров Д. М., Сабиров И. Х. Системы в корпусе — магистральный путь развития ЭКБ для авиации, космоса, ВПК // Вестник электроники, 2009, № 2.
4. Данилин Н. С., Димитров Д. М., Сабиров И. Х. Применение квалифицированных полупроводниковых некорпусированных кристаллов при разработке систем в корпусе // Современная электроника, 2010, № 3.
5. Данилин Н. С., Димитров Д. М., Сабиров И. Х. Электронная компонентная база систем в корпусе при разработке и реализации космической бортовой аппаратуры // Интеграл, 2011, № 1.