

# Опыт разработки и производства СВЧ-микросборок и модулей на основе СКМ – отечественной системы низкотемпературной совместно спекаемой керамики

В. Косевской<sup>1</sup>, М. Кваша<sup>2</sup>

УДК 621.3.049.776:666.651:004.312 | ВАК 05.27.06

СКМ – это российская система низкотемпературной совместно спекаемой керамики (LTCC), предназначенная для применения в производстве сверхвысокочастотных микросхем, гибридных СВЧ-микросборок и модулей. В ходе реализации масштабного совместного проекта АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» и АО «НПП «Исток» им. Шокина» установлено, что отечественная система не уступает, а по ряду характеристик превосходит наиболее распространенные системы LTCC зарубежных производителей. Кроме того, результаты работ показывают, что оба предприятия способны на базе СКМ производить СВЧ-устройства практически любой сложности. Выявлены проблемы, связанные с переносом изготовления устройства с одной производственной базы на другую и отработаны методические подходы для их решения.

**Д**ля отечественной электронной промышленности всегда было приоритетным производство изделий для авиакосмической и военной техники, и в области твердотельной СВЧ-электроники, предназначенной для этих отраслей, Россия занимает место в числе шести лидирующих государств. Однако многие отечественные компоненты изготавливаются с применением импортных материалов и комплектующих (в частности, кристаллов), а иногда и за рубежом. Таким образом, полная независимость по компонентам не обеспечена даже в наиболее ответственных секторах, не говоря уже о продукции гражданского назначения.

Одним из важных направлений в достижении целей импортозамещения является переход к изготовлению корпусов микросхем, микросборок и модулей из отечественных керамических материалов, обеспечивающих изделиям высокую надежность и стойкость при влиянии внешних воздействий и при этом имеющих высокие показатели технологичности. Применительно к СВЧ-электронике в качестве наиболее перспективного материала этой группы сегодня может рассматриваться LTCC – низкотемпературная совместно спекаемая керамика.

LTCC имеет КТР, близкий к этому показателю основных полупроводниковых материалов, на порядок большую теплопроводность, чем у печатных плат из полимерных материалов (2–4 против 0,1–0,5 Вт/м·К), высокую стабильность механических и электрических параметров при внешних воздействиях; корпуса из нее герметичны и влагоустойчивы, обеспечивают работоспособность устройств при температурах до 350 °С. Это технологичный материал, в цикле обработки которого отсутствуют химические процессы, пригодный как для макетирования, так и для массового производства.

Электрические свойства низкотемпературной керамики определили ее широкое применение для корпусирования СВЧ-устройств. Диэлектрическая проницаемость LTCC на гигагерцовых частотах лежит в пределах от 6 до 9, тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,001 до 0,006. Важнейшим фактором является применение для создания проводящего рисунка серебра, золота и их сплавов с палладием и платиной. Такие проводники имеют удельное сопротивление не более 0,005 Ом·м, что на порядок меньше значения этого параметра у проводников из вольфрама и молибдена, используемых в высокотемпературной совместно спекаемой керамике (HTCC). В целом комплекс электрических характеристик LTCC позволяет создавать СВЧ-устройства с рабочими частотами до 100 ГГц.

Конструктивно-технологические достоинства LTCC наиболее полно проявляются при изготовлении на ее

<sup>1</sup> АО «НПЦ «СпецЭлектронСистемы», директор по производству, kosevskoy@npc-ses.ru.

<sup>2</sup> АО «НПЦ «СпецЭлектронСистемы», начальник конструкторско-технологического отдела, kvacha@npc-ses.ru.

основе СВЧ-микросборок и модулей класса СвК. Подложки из 20 и более слоев позволяют спроектировать оптимальную структуру межсоединений и назначить любое расположение внешних выводов – последнее делает возможной установку СвК на посадочное место, где ранее стояла импортная СБИС, а также модернизацию СвК без переработки платы. Низкотемпературная керамика обладает широкими возможностями в области 3D-интеграции, особенно ценными для СВЧ-устройств. Подложка модуля может иметь несколько монтажных уровней, в ней могут быть выполнены углубления различной формы для монтажа разновысотных элементов и их групп с выравниванием по высоте их лицевых поверхностей. Пассивные элементы и кристаллы могут быть размещены во внутренних слоях подложки, там же можно сформировать индивидуальные системы теплоотвода. Таким путем достигается сокращение длины внутрисхемных связей, оптимизация их структуры и соответствующее повышение электрических характеристик СВЧ-модуля, а также улучшение его тепловых и массо-габаритных параметров.

Важно отметить, что в конфигурацию СВЧ-СвК могут входить не только собственно СВЧ-схемы, но и НЧ-микросхемы различного назначения, так что в одном корпусе может быть собрана полнофункциональная система – например, приемо-передающий модуль (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР).

Производство модулей для АФАР сегодня становится весьма перспективным направлением бизнеса, и связано это с бурным расширением применения АФАР в радиолокационных и коммуникационных системах гражданского назначения.

Приемники спутниковой связи с АФАР, установленные на самолетах, автомобилях, поездах, кораблях, обеспечивают устойчивую связь в движении, непрерывно удерживая основной луч диаграммы направленности на спутнике. Сами спутники-ретрансляторы с помощью АФАР формируют независимые лучи управляемой конфигурации, направленные на разные области земной поверхности. Так называемые смарт-антенны станций сотовой связи 3G/4G представляют собой АФАР, формирующие отдельный луч для каждого абонента. А компания Qualcomm в 2018 году презентовала QTM052 – самый маленький в мире модуль с фазированной решеткой, предназначенный для установки в 5G-смартфоны; утверждается, что это уменьшит влияние рук, близких предметов, отражающих объектов на качество связи, в результате чего скорость передачи данных составит 1,4 Гбит/с в городской среде и до 5 Гбит/с вне плотной застройки.

АФАР применяются в системах управления воздушным движением, комплексах наземного и воздушного контроля за движением транспортных средств, в службах метеонаблюдения и системах безопасности. Они

**ПРОИЗВОДСТВО МИКРОСБОРОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

УМЕНЬШЕНИЕ В **10-ки** РАЗ!



**71** в **6-12** месяцев  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СВРАЧИВАНИЕ

СОКРАЩЕНИЕ СРОКОВ ЗАПУСКА НОВОГО ИЗДЕЛИЯ В СЕРИЮ **ДО 6-12** месяцев

**СпецЭлектронСистемы**  
научно-производственный центр  
г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5  
Тел.: +7 (495) 663-21-65  
E-mail: info@npc-ses.ru  
[www.npc-ses.ru](http://www.npc-ses.ru)

находят всё более широкое применение на борту БПЛА гражданского назначения. Во многих случаях этим аппаратам приходится работать в стесненных условиях, например доставлять почту в городе или грузы для экспедиции в труднодоступном горном районе. Такие БПЛА нуждаются в радиолокаторе, сочетающем достаточные в каждом случае мощность и функционал с минимальными массо-габаритными характеристиками.

Наконец, радиолокация всё активнее внедряется в автомобильные системы беспилотного вождения и помощи водителю (ADAS), вытесняя видеокамеры и лидары или занимая место рядом с ними: согласно агентству Research and Markets, на данный момент рынок радаров для ADAS и автономных транспортных средств превышает 2,15 млрд долл. и достигнет 7,68 млрд долл. в 2026 году.

В свете сказанного становится понятно, что производители ППМ для АФАР сегодня располагают исключительно широким кругом потребителей. Одно из важных преимуществ самой архитектуры АФАР состоит в том, что их модули допускают объединение в антенные решетки любых размеров. Это означает, что в принципе из одних и тех же модулей можно построить и локатор системы управления воздушным движением, и миниатюрную РЛС

для небольшого беспилотника. А технология LTCC обеспечивает компактность, надежность, стойкость при воздействиях внешней среды и низкую стоимость – в частности, за счет возможности применения относительно недорогих микросхем, ведь гетерогенная интеграция, реализованная в СвК, позволяет обойти закон Мура.

Компания АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» (далее – АО «СЭС») совместно с АО «НПП «Исток» им. Шокина» (далее – АО «Исток») – одним из ведущих российских разработчиков и производителей СВЧ-электроники – ведет работы по проектированию и изготовлению изделий СВЧ-электроники на основе СКМ – отечественной системы низкотемпературной совместно спекаемой керамики.

Система СКМ является наиболее завершенной разработкой отечественной низкотемпературной керамики. Входящий в нее керамический материал создан в АО «Исток», а совместимые с ним по обжиговой усадке проводниковые пасты на основе Ag, Au и сплавов Ag/Pd и Ag/Pt, Au/Pd производятся ООО «НПП «Дельта-Пасты». Основные электрофизические параметры СКМ, а также других типов керамики, используемых большинством российских производителей LTCC-изделий, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Электрофизические характеристики основных систем LTCC отечественных и зарубежных производителей

| Производитель<br>и марка материала                              | Электрофизические характеристики |                                   |   |                               |                     |                            |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|---------------------|----------------------------|
|   | Электрические                    |                                   | Тепловые  |                               | Механические        |                            |
|   | $\epsilon$                       | $\text{tg}\delta, \times 10^{-3}$ | ЛКТР ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),<br>$\times 10^{-6}$ | Теплопроводность,<br>Вт/(м·К) | Модуль Юнга,<br>ГПа | Прочность на изгиб,<br>МПа |
| DuPont GreenTape 951  | 7,5<br>при $f=10$ ГГц            | 6<br>при $f=3$ ГГц                | 5,8<br>(5–300 $^{\circ}\text{C}$ )                    | 3,3                           | 120                 | 320                        |
| DuPont GreenTape 9K7  | 7,1<br>при $f=10$ ГГц            | 1,0<br>при $f=10$ ГГц             | 4,4<br>(5–300 $^{\circ}\text{C}$ )                    | 4,6                           | 145                 | 230                        |
| Ferro A6M-E   | 5,9<br>при $f=10$ ГГц            | <2,0                              | 7,0<br>(5–300 $^{\circ}\text{C}$ )                    | 2,0                           | 92                  | 170                        |
| Ferro L8  | 7,3<br>при $f=10$ ГГц            | <2,0                              | 5,8<br>(5–300 $^{\circ}\text{C}$ )                    | 3,0                           | –                   | 275                        |
| ООО «КЕКО-Р»<br>Кеко SK47<br>ТУ 6365-001-05717914-2019          | 7,1<br>при $f=10$ ГГц            | 3                                 | 6,9<br>(5–300 $^{\circ}\text{C}$ )                    | 2,9                           | –                   | 200                        |
| ООО «АЛЬКОНТ»<br>ЛСК<br>ТУ № АЯСП.07622667.001-011ТУ            | 7,5<br>при $f=10$ ГГц            | 4<br>при $f=10$ ГГц               | 5,9   | 3,2                           | 125                 | 230                        |
| АО «НПП «Исток» им. Шокина»<br>СКМ<br>ТУ 6366-001-07622667-2008 | 7,18<br>при $f=10$ ГГц           | 1,2<br>при $f=10$ ГГц             | 6<br>(10–400 $^{\circ}\text{C}$ )                     | 3                             | –                   | 260                        |

Кроме систем LTCC, приведенных в табл. 1, на рынке присутствуют системы керамики от производителей из Японии (Kyocera, KOA Group) и Китая, но сведения об их параметрах в открытых источниках информации крайне ограничены.

До начала работ с СКМ специалистам АО «СЭС» уже довелось разрабатывать и выпускать для заказчиков изделия из всех других систем низкотемпературной керамики, представленных в табл. 1. В результате сформировалось понимание того, что в ходе проектирования необходимо проводить тщательный анализ специфических свойств материалов и параметров режимов работы оборудования, занятого в технологическом процессе. Целью анализа является прогнозирование влияния операций технологического процесса на поведение элементов конструкции создаваемого устройства – таких как изменение габаритных размеров, искажение геометрии полостей, нарушение топологических размеров, растрескивание и расслоение керамики, нарушение проводниковых свойств внутренних и внешних соединений. Анализ дает информацию для поиска оптимальных конструктивно-технологических решений, гарантирующих проектирование и изготовление изделий с повторяемыми характеристиками, а также экономическую эффективность процесса изготовления за счет высокого процента выхода годных. Более того, детальное знание характеристик материалов (анизотропии усадок, влияния металлических включений и пр.) открывает перед разработчиком новые возможности при проектировании LTCC-изделия как объемного объекта. Понимание характера поведения используемых материалов позволяет создавать микромодули и СВК с уникальными конструктивными параметрами и показателями надежности, не достижимыми при использовании традиционных «плоскостных» подходов к проектированию.

Значение комплексного учета характеристик материалов и технологических нюансов производства для достижения требуемого результата настолько велико, что имеет смысл остановиться на нем подробнее.

По данным, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод, что представленные в ней системы керамики в целом близки по своим параметрам. В качестве существенного исключения можно выделить диэлектрические свойства материалов, определяющие максимальные частоты, при которых их можно применять. У системы СКМ, изначально разрабатывавшейся для использования в производстве изделий СВЧ-электроники, они значительно лучше, чем у материалов универсального применения, и близки к показателям высокочастотной системы DuPont 9K7. Обе эти системы LTCC позволяют конструировать широкую номенклатуру СВЧ-изделий, начиная от пассивной электроники до сложных приемо-передающих модулей АФАР в наиболее востребованных диапазонах частот до 10 ГГц.

Опыт конструкторов и технологов обеих участвующих в проекте компаний показывает, что при всей схожести основных электрофизических свойств систем LTCC, приведенных в табл. 1, вопрос обеспечения идентичности конструктивных и функциональных параметров изделия требует детальной проработки для каждой системы в отдельности. В подтверждение можно привести значения усадки керамики после проведения операции обжига ламинированного многослойного пакета. Этот параметр не всегда можно узнать из общедоступной документации производителя керамики, однако данные, приведенные в табл. 2, убедительно говорят о важности его учета при проектировании конструкции LTCC-изделия. Еще один аспект: различные системы включают разное число паст металлизации, используемых для одних и тех же элементов конструкции и топологии – проводников, экранов, полигонов, питающих шин, переходных и тепловых отверстий (табл. 3). Каждая

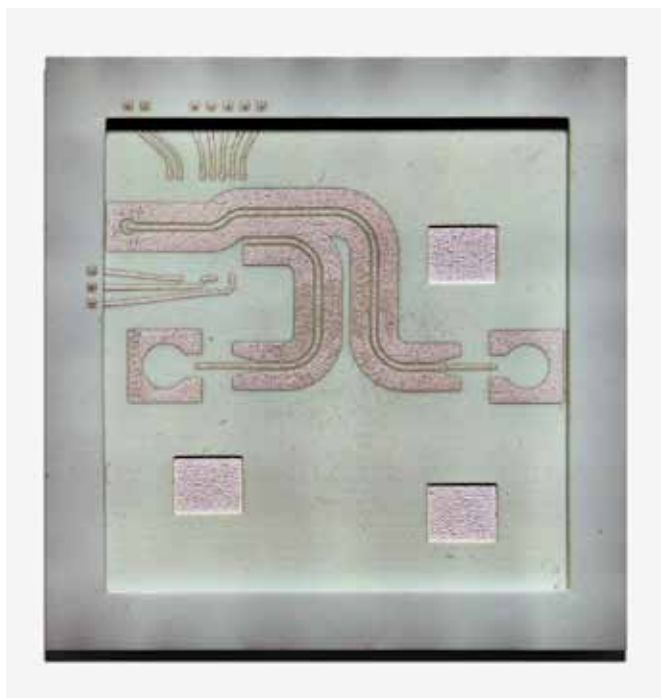
**Таблица 2.** Параметры усадок керамических материалов при обжиге

| Система           | DuPont GreenTape |          | Ferro    |        | SK-47  | ЛСК      | СКМ      |
|-------------------|------------------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|
|                   | 951              | 9K7      | A6M-E    | L8     |        |          |          |
| Усадка по X, Y, % | 12,7±0,3         | 9,1±0,3  | 15,4±0,3 | 13±0,3 | 13±0,5 | 12,6±0,5 | 9,1±0,3  |
| Усадка по Z, %    | 15±0,5           | 11,8±0,5 | 24±0,3   | 17±0,3 | 17±2   | 17,1±0,5 | 16,5±0,4 |

**Таблица 3.** Проводниковые пасты, применяемые в различных системах LTCC

| Система                                   | DuPont GreenTape |     | Ferro |    | SK-47 | ЛСК | СКМ |
|---|------------------|-----|-------|----|-------|-----|-----|
|   | 951              | 9K7 | A6M-E | L8 |       |     |     |
| Количество применяемых проводниковых паст | 28               | 9   | 11    | 11 | 7     | 28  | 12  |





**Рис. 1.** Пример корпуса микромодуля из керамики СКМ

из этих паст обладает своими индивидуальными свойствами, которые должны быть учтены при проектировании. На основании практического опыта было отмечено, что на усадку керамики особенно сильно влияют поля металлизации, выполненные различными пастами (например, серебро или золото), хотя состав паст в различных системах LTCC сходный.

На примере упомянутого выше параметра – усадки при обжиге – хорошо прослеживается влияние на результат процесса такого фактора, как конструкция изделия. Неоднородное распределение полей металлизации проводниковых слоев, разная плотность размещения переходных и теплоотводящих отверстий различного диаметра на участках подложки, наличие полостей и окон различного размера – всё это ведет к тому, что реальная усадка обжигаемого изделия может сильно отличаться от заявленной производителем величины. Фактический коэффициент усадки конкретной керамической платы определяют на этапе ее макетирования, и в дальнейшем он учитывается в расчетах топологии проводников опытных образцов, а также координат центров отверстий межслойных переходов.

Еще одно важное замечание. При конструировании и последующем изготовлении опытных партий изделий чаще всего в расчет берутся ограничения и технологические возможности производственной линейки одного конкретного предприятия. Но, даже обладая в целом сходным оборудованием, изготовители LTCC-изделий работают с отличающимися режимами техпроцессов,

обусловленными различными характеристиками технологического инструментария (объемом камер обжига, распределением воздушных потоков, различной технологической оснасткой и т. д.). Если не учесть это еще на этапе конструирования, не провести отработку опытных образцов, то при одинаковой исходной КД с выхода двух близких по оснащению линий выйдут изделия с существенными, иногда критическими различиями.

Целью совместного проекта АО «СЭС» и АО «Исток» является изучение всего приведенного выше комплекса проблем применительно к системе СКМ. В ходе работ по проекту было выпущено несколько опытных партий СВЧ-модулей разного типа. Часть из них изготавливалась в АО «Исток», а затем была воспроизведена в АО «СЭС» на системе СКМ; другая часть представляет собой новые разработки, сразу изготовленные в АО «СЭС» из отечественной керамики. Ряд позиций произведенной номенклатуры прошел испытания в АО «Исток», подтвердив расчетные характеристики, другие еще находятся на этапе тестирования. В настоящее время прорабатывается вопрос о запуске некоторых изделий в серийное производство на мощностях АО «СЭС».

Практические результаты, полученные в ходе выполнения совместных работ, позволяют сделать обоснованный вывод о том, что в России создана система низкотемпературной совместно спекаемой керамики с повторяемыми характеристиками. Подтверждена способность АО «СЭС» работать не только с импортными материалами, но и с отечественной системой СКМ, а также возможность использования этого материала широким кругом российских производителей для изготовления изделий СВЧ-электроники любой сложности, не уступающих, а в некоторых позициях превосходящих по характеристикам изделия из материалов таких компаний, как DuPont, Ferro и других, поставки которых могут быть заблокированы. Результаты планируемого запуска в серию нескольких типов изделий должны дать окончательное подтверждение высокого качества системы СКМ.

\* \* \*

Российскими учеными и инженерами создан и освоен в производстве LTCC-материал для работы на сверхвысоких частотах, то есть в наиболее сложных условиях. Этот факт дает основания надеяться, что будут разработаны и системы низкотемпературной керамики с не столь высокими характеристиками и умеренной стоимостью, на базе которых станет возможным развитие производства современной LTCC-электроники для самых разных применений, число которых велико сегодня и увеличивается с каждым годом.

Для АО «СЭС» значение проекта в значительной степени определяется тем, что доказана способность

предприятия работать на разных материалах, как зарубежных, так и отечественных. Подтверждение соответствия заданным требованиям характеристик образцов, изготовленных в АО «СЭС», предприятием-разработчиком, обладающим собственной производственной базой и опытом изготовления данных изделий, указывает на высокий уровень компетентности конструкторов, технологов и управляющего персонала АО «СЭС», позволяющий выполнять отработку опытных образцов и постановку на серийное производство заказных изделий на основе LTCC-керамики, в том числе отечественной системы СКМ.

АО «СЭС» открыто для сотрудничества с производителями электроники, которые заинтересовались этим перспективным российским материалом, и готово оказывать помощь в разработке конструкции с учетом эксплуатационных и технологических требований к изделию, выполнять изготовление и испытания прототипов и производить изделия серийно с гарантированным качеством, а также оказывать содействие для корректного переноса отработанной технологии на производственную линию предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ляпин Л. В., Осипов А. В., Далингер А. Г.** Низкотемпературная керамика в технологии изготовления многослойных керамических плат LTCC // Электронная техника. 2017. Сер. 1, СВЧ-техника. Вып. 4 (535). С. 28–43.
2. [https://ostec-materials.ru/tech\\_lib/technology/lccc-tekhnologiya.php](https://ostec-materials.ru/tech_lib/technology/lccc-tekhnologiya.php)
3. **Иовдальский В. А.** Новая парадигма развития техники ГИС СВЧ-диапазона // Электронная техника. 2017. Сер. 1, СВЧ-техника. Вып. 4 (535). С. 54–63.
4. **Куликова А. И., Кузнецова А. С., Тушнов П. А.** Структура и характеристика модулей АФАР для систем радиосвязи и радиолокации // Сборник трудов XIV молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии» – М.: ООО «Издательство «Мир науки», 2017. 107 с.
5. <https://kramtp.info/novosti/interesnoe/full/76009>
6. **Викюлов И.** Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 5. С. 126–134.
7. [https://bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/4087725](https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4087725)
8. <https://bespilot.com/news/670-cognitive-mini-radar>

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 760 руб.

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп.

**Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В.**

С развитием высоких технологий становится реальным выпуск трехмерных электронных устройств (ТЭУ). Решением данной задачи являются еще только разрабатываемые гибридные технологии, названные в данной работе квази-4D-технологиями формирования ТЭУ. В то же время создана классификация 4D-объектов (способных менять свою форму или структуру после их создания в зависимости от внешних условий, например при изменении температуры, при механическом воздействии и т.д.) ТЭУ и технологий для их формирования.

Данное учебное пособие является первой книгой по технологиям изготовления, сканирования и визуализации трехмерных электронных устройств. Во второй книге будут рассмотрены технологии сканирования трехмерных электронных устройств различных диапазонов, в том числе нанометрового диапазона. Отдельный раздел второй книги будет посвящен возможностям изготовления трехмерных электронных устройств нанометрового диапазона с применением методов сканирующей микроскопии. Третья книга будет посвящена технологиям визуализации (средствам отображения информации) для контроля параметров ТЭУ, создания новых ТЭУ и технологий реинжиниринга ТЭУ.

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 210 с.,  
ISBN 978-5-94836-504-6

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)