

Настоящее и будущее космического материаловедения

Л. С. Новиков

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: novikov@sinp.msu.ru*

Статья поступила 30.01.2010, подписана в печать 18.02.2010

Приведены сведения о формировании и развитии космического материаловедения, главными задачами которого являются изучение физико-химических механизмов воздействия космической среды на материалы и разработка методов повышения стойкости материалов и элементов оборудования космических аппаратов к ее воздействию. Рассмотрены основные направления проводимых работ, сформулированы наиболее важные задачи современных и будущих исследований, показаны перспективы применения нанотехнологий и наноматериалов в космической технике.

Ключевые слова: космический аппарат, материалы, космическая среда, воздействие, моделирование, защита, нанотехнология.

УДК: 551.5:539.104. PACS: 94.05.-a, 81.70.-q, 62.23.Pq.

Введение

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы космических аппаратов (КА) играет стойкость используемых при их создании материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. Согласно имеющимся экспертным оценкам, более половины отказов и сбоев в работе бортовых систем КА обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства (ФКП): потоков электронов и ионов высокой энергии, космической плазмы, солнечного электромагнитного излучения, метеорных частиц и других. В результате такого воздействия в материалах, входящих в состав конструкции КА, протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их свойств.

Начавшиеся в 1960-е гг. интенсивные исследования, направленные на повышение стойкости материалов и оборудования КА к воздействию ФКП, привели к созданию нового научного направления — космического материаловедения, в задачи которого входят экспериментальное и теоретическое изучение процессов, протекающих в материалах и элементах оборудования КА под действием ФКП, и связанных с ними изменений свойств материалов, разработка методов и технических средств защиты КА от неблагоприятного воздействия ФКП, создание новых материалов [1]. Самостоятельным крупным разделом космического материаловедения является изучение влияния невесомости на протекание физико-химических процессов в материалах в разных агрегатных состояниях и создание технологий получения материалов в условиях космического пространства [2].

Становление и начальные этапы развития космического материаловедения во многом связаны с именем выдающегося ученого, Героя Социалистического Труда академика Сергея Николаевича Вернова, который более 20 лет, с 1960 по 1982 г., являлся директором Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скobelцына МГУ (НИИЯФ МГУ). По инициативе С. Н. Вернова и под его руководством в НИИЯФ

МГУ начались исследования стойкости материалов КА к воздействию космической радиации (1961) [3], а в последующие годы и к ряду других факторов. При этом благодаря активной организационной деятельности С. Н. Вернова было сформировано несколько государственных научно-технических программ в области космического материаловедения, в выполнении которых НИИЯФ МГУ сыграл большую роль.

Несмотря на достигнутые к настоящему времени значительные успехи в обеспечении стойкости КА к воздействию космической среды, исследования в этой области остаются весьма актуальными, поскольку, как отмечено выше, большая часть аномалий в работе КА является следствием такого воздействия. Имеется также ряд объективных причин, вызывающих необходимость непрерывного обновления и расширения наших знаний о процессах воздействия ФКП на материалы и оборудование КА: разработка принципиально новых конструкций КА, использование в их составе новых материалов и элементов оборудования, в том числе созданных с помощью нанотехнологий, повышение требований к надежности и долговечности КА.

В настоящей статье приведены сведения о формировании и развитии космического материаловедения, рассмотрены основные направления проводимых работ, сформулированы наиболее важные задачи современных и будущих исследований, показаны перспективы применения нанотехнологий и наноматериалов в космической технике.

1. Механизмы воздействия космической среды на материалы

Изменения свойств материалов, вызываемые воздействием ФКП, зависят в первую очередь от физической природы воздействующих факторов и характера инициируемых ими процессов. Естественной средой, в которой происходит воздействие ФКП на КА, является космический вакuum, оказывающий самостоятельное влияние и на материалы, и на оборудование КА. В окрестности Земли вакуумные условия определяются характеристиками верхней атмосферы. В интервале высот 200–1000 км значения давления в атмосфере лежат

в диапазоне 10^{-4} – 10^{-8} Па, а на высотах 30–50 тыс. км давление составляет лишь около 10^{-11} Па.

В вакууме из материалов выделяются газы, примеси и добавки, находящиеся на поверхности или в объеме, а также происходит сублимация (переход вещества из твердой фазы непосредственно в газообразную) самих материалов. Процессы газовыделения и сублимации существенно изменяют состояние поверхности и приповерхностных слоев материалов, что приводит к изменению их механических, оптических и электрофизических характеристик.

За счет газовыделения и сублимации материалов в окрестности КА образуется газовое облако, называемое собственной внешней атмосферой (СВА) аппарата. Поэтому давление в непосредственной близости от КА может на 2–3 порядка превышать давление в окружающем космическом пространстве. Заметный вклад в формирование СВА вносят также утечки газов из внутренних отсеков КА и выбросы малых реактивных двигателей, используемых для коррекции орбиты и ориентации КА. Появление СВА приводит к загрязнению поверхности КА осаждающимися продуктами, увеличению светового фона в окрестности аппаратов из-за процессов рассеяния света на частицах СВА и люминесценции, а также к снижению электрической прочности электротехнического оборудования в результате ухудшения вакуума.

Для КА, функционирующих на высотах от 300 до 800 км, в частности для пилотируемых станций, высота орбит которых составляет 350–400 км, важнейшим механизмом повреждения поверхности является так называемое «химическое распыление» материалов набегающим потоком атомарного кислорода, доминирующего в составе атмосферы Земли на указанных высотах. Химическая активность атомарного кислорода дополнительно усиливается за счет кинетической энергии (~ 5 эВ) сталкивающихся с поверхностью атомов, обусловленной орбитальной скоростью КА. При такой энергии атомов возрастает эффективность их взаимодействия с материалами, результатом которого является образование летучих соединений, легко покидающих поверхность. В наибольшей степени воздействию атомарного кислорода подвержены полимерные материалы, широко применяемые на современных КА [4]. Для них наблюдается интенсивная эрозия поверхности, сопровождаемая формированием на ней характерного рельефа (рис. 1, а), а толщина распыленного слоя может достигать нескольких десятков и даже сотен мик-

метров в год. Одним из способов уменьшения потерь массы полимеров является нанесение на их поверхность различных защитных покрытий, однако и они могут разрушаться атомарным кислородом (рис. 1, б).

Продукты распыления полимеров, входящие в состав СВА, наиболее сильно загрязняют поверхность КА, поскольку оседающие на нее тяжелые фрагменты полимерных цепей достаточно прочно закрепляются. Процесс образования пленок загрязнений на поверхности может интенсифицироваться солнечным ультрафиолетовым (УФ) излучением за счет фоторадиационного сшивания полимеров. Однако УФ-излучение, в особенности с длинами волн $\lambda < 200$ нм, может вызывать и разрушение полимерных пленок. Преобладание того или иного процесса зависит от состава пленок, свойств подстилающей поверхности и окружающей газовой среды [5].

Во всех областях космического пространства КА подвергаются воздействию плазмы с различными характеристиками. На низких околоземных орbitах — холодной ионосферной плазмы с температурой $T \sim 10^3$ К и концентрацией частиц $n = 10^{10}$ – 10^{12} м⁻³, а на высоких орбитах, например в области используемой для создания спутниковых систем радиовещания и телевидения геостационарной орбиты, которая лежит в экваториальной плоскости на высоте 36 тыс. км, — горячей магнитосферной плазмы с характерными энергиями частиц 1–50 кэВ и концентрацией $n = 10^5$ – 10^6 м⁻³. За пределами магнитосферы Земли на КА действует плазма солнечного ветра ($T \sim 10^5$ К, $n \sim 10^6$ – 10^7 м⁻³), поток которой движется в окрестности Земли со скоростью 500–1000 км/с.

При полете КА в плазме на его поверхности образуется электрический заряд и соответственно некоторый потенциал относительно невозмущенной плазмы. Это явление называют электризацией (заряжением) КА. Величина потенциала непосредственно связана с температурой плазмы. Поэтому явление электризации наиболее опасно для высокоорбитальных КА (в частности, геостационарных), для которых потенциал достигает 10–20 кВ. В результате на КА могут возникать электрические разряды, создающие интенсивные электромагнитные помехи работе бортового оборудования и приводящие в некоторых случаях к его необратимым повреждениям [6].

Помимо поверхностной электризации диэлектрических материалов КА, при которой электроны горячей плазмы проникают в диэлектрик на глубину порядка

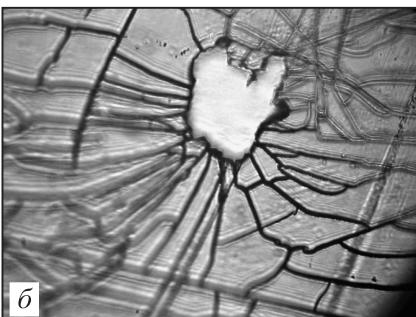
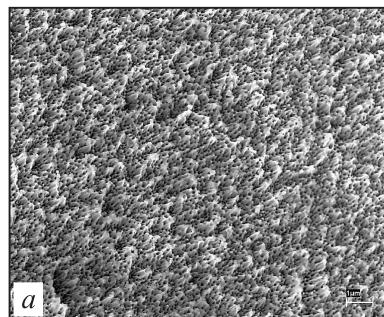


Рис. 1. Результаты испытаний на магнитоплазмодинамическом ускорителе НИИЯФ МГУ полимерной пленки без покрытия (а) и с защитным покрытием SiO_2 (б) на стойкость к воздействию атомарного кислорода

20–30 мкм, возможна их объемная электризация, вызываемая электронами радиационных поясов Земли (РПЗ) с энергией порядка 1–10 МэВ, для которых глубина проникновения составляет 0.5–2 см [7].

Следствием объемной электризации диэлектриков также является возникновение электрических разрядов с образованием внутри диэлектриков разветвленных каналов. Разряды происходят спонтанно, если напряженность электрического поля, создаваемого в объеме диэлектрика внедренным зарядом, превысит электрическую прочность материала, либо могут быть инициированы каким-то внешним воздействием, приводящим к локальному увеличению напряженности поля или проводимости диэлектрика. На рис. 2 показаны результаты лабораторного эксперимента, в котором образец оптического стекла заряжался электронами с энергией 1 МэВ при флюенсе $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а затем подвергался бомбардировке частицами алюминия с поперечными размерами порядка 1 мкм и скоростями около 3.0 км/с [8]. В результате такого воздействия в образце возникли обособленные разрядные фигуры с выходом центрального канала на поверхность в точку удара микрочастицы. Такое совместное воздействие на диэлектрики электронов РПЗ и твердых микрочастиц может являться причиной более значительного ухудшения характеристик защитных стекол солнечных батарей, линз и других оптических элементов оборудования КА по сравнению с обычными повреждениями за счет образования кратеров на поверхности (рис. 3).

Заряженные частицы высокой энергии, входящие в состав упоминавшихся выше РПЗ, а также в состав галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ), основные характеристики которых представлены в таблице, вызывают в материалах КА различные радиационные эффекты, приводящие к ухудшению параметров материалов и элементов оборудования. Происходящие обратимые и необратимые изменения материалов зависят от полной поглощенной дозы космической радиации и мощности дозы. Наименее стойки к радиационным воздействиям полупроводниковые материалы и приборы. Для них заметные изменения параметров наблюдаются при величине поглощенной дозы 10^3 – 10^4 Гр [9].

Весьма критичны для бортового электронного оборудования КА обратимые сбои, вызываемые отдельными заряженными частицами ГКЛ, СКЛ и РПЗ. Появление этой проблемы явилось, как ни парадоксально, след-

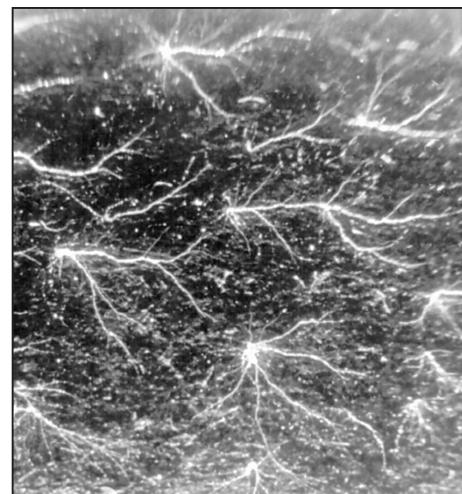


Рис. 2. Электрические пробои в радиационно-заряженном стекле, вызываемые ударами микрочастиц

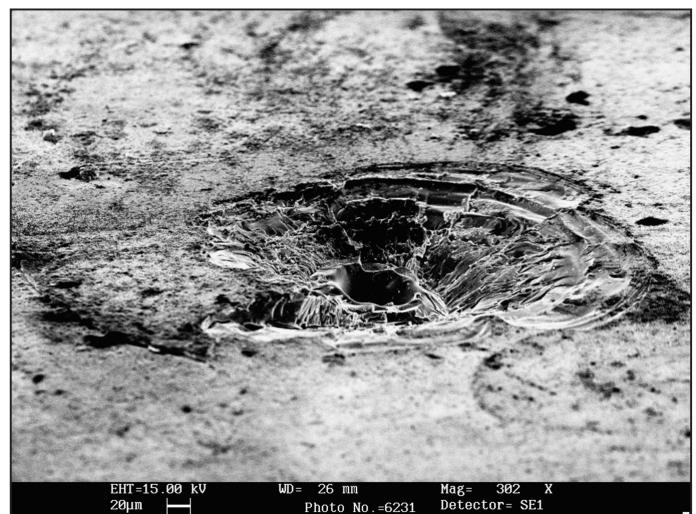


Рис. 3. Кратер в защитном стекле солнечной батареи, образованный ударом космической частицы

ствием технологического прогресса в микроэлектронике. В современных полупроводниковых микросхемах с высокой степенью интеграции электрические заряды, управляющие их работой (10^{-13} – 10^{-12} Кл), оказались сопоставимыми с зарядами, образующимися в материале микросхемы при прохождении тяжелых ядер ГКЛ

Усредненные параметры потоков частиц ГКЛ, СКЛ, РПЗ

Вид корпускулярного излучения	Состав излучения	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
ГКЛ	протоны	10^2 – 10^{15} (для всех групп ядер)	$1.5 \cdot 10^4$
	ядра гелия		$1.0 \cdot 10^3$
	более тяжелые ядра		$1.2 \cdot 10^1$
СКЛ	протоны	1 – 10^4	10^7 – 10^8
РПЗ	протоны	1 – 30	$3 \cdot 10^{11}$
		> 30	$2 \cdot 10^8$
	электроны	0.1 – 1.0	$1 \cdot 10^{12}$
		> 1.0	$1 \cdot 10^{10}$

или высокоэнергетических протонов РПЗ и СКЛ. Эти внесенные электрические заряды при перемещении их в электрических полях внутри микросхемы и приводят к сбоям, например к изменению состояния полупроводниковых ячеек памяти бортовых компьютеров.

Возникновение обратимых сбоев связано с двумя механизмами образования заряда в веществе микросхемы. Первый обусловлен прямым процессом ионизации атомов тяжелыми ионами ($Z > 10$) ГКЛ, а второй — ионизацией продуктами ядерных взаимодействий протонов с веществом микросхемы, которые эффективно происходят при энергии протонов выше 30–50 МэВ [10].

Необходимо отметить, что совместное воздействие на материалы нескольких ФКП, причем необязательно одновременное, может приводить к возникновению различных синергетических эффектов, которые способны как усиливать, так и ослаблять происходящие изменения свойств материалов подобно упоминавшемуся влиянию УФ-излучения на процесс загрязнения поверхности продуктами СВА. К синергетическим эффектам можно отнести и рассмотренное выше инициирование ударами твердых микрочастиц электрических разрядов в облученных электронами стеклах.

НИИЯФ МГУ является одним из пионеров и признанных мировых лидеров в изучении космической радиации и механизмов ее воздействия на материалы и оборудование КА [9, 10].

2. Экологические аспекты космического материаловедения

Уже к середине 1970-х гг. стало ясно, что ракетно-космическая техника оказывает заметное воздействие на околоземную среду. Наиболее опасным глобальным проявлением такого воздействия является накопление на околоземных орbitах тел искусственно го происхождения, не выполняющих полезных функций, — так называемого «космического мусора», к которому относят прекратившие работу КА, остающиеся на орбитах последние ступени ракет-носителей, сбрасываемые защитные крышки и т. п., а также мелкие частицы, отделяющиеся от поверхности КА, образующиеся при разрушении аппаратов и выбрасываемые ракетными двигателями. Общая масса космического мусора оценивается в настоящее время в 3500–4000 т [11].

В непосредственной близости от КА наблюдаются самые разнообразные возмущения окружающей космической среды: газодинамические эффекты, сопровождающие полет КА в области низких орбит, изменение состояния окружающей плазмы электрическим полем КА при накоплении на нем заряда, формирование вокруг КА упоминавшейся выше собственной атмосферы и т. д. Учет этих возмущений очень важен при измерениях параметров космической среды с помощью приборов, устанавливаемых на КА. Таким образом, в общем случае правильнее говорить о взаимодействии КА с окружающей космической средой. Этот термин более точно отражает физическую сущность процессов, протекающих на аппарате и в его окрестности [12].

Принято выделять следующие техногенные воздействия на космическую среду, или, как их еще называют,

загрязнения космического пространства: механическое, химическое, радиоактивное и электромагнитное [13].

Механическое загрязнение — это обсуждавшееся накопление в околоземном пространстве космического мусора. Химическое загрязнение обусловлено работой ракетных двигателей, которые выбрасывают в околоземную среду водород, окислы углерода, азота, хлора, а также ионы Ar^+ , Xe^+ и твердые частицы Al_2O_3 . При запусках мощных ракет суммарная масса таких веществ измеряется сотнями тонн.

Радиоактивное загрязнение околоземного космического пространства может быть обусловлено используемыми в составе некоторых КА источниками энергии, содержащими радиоактивные вещества. Находящиеся на околоземных орбитах КА с ядерными энергетическими установками могут создавать повышенный радиационный фон в окрестности КА и загрязнение радиоактивными веществами атмосферы и даже поверхности Земли при аварийном разрушении КА.

Электромагнитное загрязнение околоземного пространства вызывается излучениями различных наземных устройств и оборудования КА. К этому виду загрязнения можно отнести и проникновение в плазму электрического поля заряженного КА, а также электромагнитного излучения происходящих на КА разрядов. Если в холодной и достаточно плотной ионосферной плазме дальность распространения поля не превышает 3–5 см из-за сильного дебаевского экранирования, то в горячей разреженной плазме, характерной, например, для геостационарной орбиты, она достигает нескольких километров.

Нетрудно видеть, что практически все техногенные воздействия на околоземную среду в той или иной степени зависят от свойств материалов КА. Поэтому при выборе и создании новых материалов для ракетно-космической техники необходимо помимо их основных эксплуатационных характеристик принимать во внимание свойства, оказывающие влияние на процессы загрязнения околоземной среды.

3. Применяемые методы исследований

Для решения задач, связанных с анализом взаимодействия КА с окружающей космической средой, используют три группы методов: наземные лабораторные эксперименты и испытания образцов материалов, теоретические исследования и компьютерное моделирование, натурные эксперименты в космосе на борту КА. Эти методы тесно связаны между собой и часто используются совместно, что может быть проиллюстрировано с помощью рис. 4 на примере изучения радиационной стойкости материалов и оборудования КА [14].

Исходными данными для формулировки задач и выбора методов исследований являются: модели и стандарты космической радиации (1); типы орбит и время жизни КА (2); конструкция КА, используемые материалы и бортовое оборудование (3).

На основании указанных данных формулируются требования к лабораторным испытательным установкам, математическим моделям и программам, которые должны использоваться для исследования воздействия космической радиации (4). Затем с учетом этих требований выбираются наиболее подходящие эксперимен-



Рис. 4. Схема организации исследований воздействия космической радиации

тальные методы и установки (5) и/или математические модели и программы (6). Часто экспериментальные и математические методы используются совместно и дополняют друг друга: выбор параметров лабораторных установок производится с использованием результатов математического моделирования, а результаты лабораторных исследований радиационных эффектов являются входными данными для моделирования. Комплексные космические эксперименты (7), в которых одновременно изучаются характеристики внешней космической среды, радиационные условия внутри КА и радиационные эффекты в различных материалах, организуются с учетом результатов как лабораторных исследований, так и математического моделирования. Совокупность данных, получаемых всеми методами, используется для построения моделей деградации материалов и элементов оборудования КА в различных условиях эксплуатации (8) и разработки на их основе методов прогнозирования надежности и срока активного существования КА (9), а также рекомендаций по его защите от радиационных воздействий (10).

При проведении наземных испытаний материалов используют два основных подхода. В первом из них стремятся наиболее полно воспроизвести в лабораторных установках условия космического пространства. Такой подход не требует каких-либо исходных предположений и дополнительных данных о характере исследуемых процессов. Однако очевидно, что в полной мере он практически нереализуем, а кроме того, требует значительных материальных затрат.

По указанным причинам обычно используется иной подход, при котором на основании тех или иных исходных предположений и сведений о физических

механизмах повреждения исследуемого объекта производится выбор одного или нескольких ФКП, оказывающих наибольшее повреждающее воздействие. Испытания в этом случае проводятся, как правило, ускоренно при сокращении их длительности в 100–1000 раз по отношению к периоду эксплуатации материалов и аппаратуры в космосе. Часто практикуется также применение моноэнергетических источников излучений и замена излучений одними видов другими. Данный подход помимо выигрыша во времени дает значительный экономический эффект. Однако он требует знания специфики физических механизмов воздействия ФКП на испытуемые объекты, поскольку недостаточная научная обоснованность ускоренных испытаний и указанных выше замен может привести к получению ошибочных результатов [15]. В НИИЯФ МГУ созданы уникальные лабораторные установки для изучения воздействия космической среды на материалы: электростатический ускоритель твердых микрочастиц, позволяющий разгонять их до 10–20 км/с, магнитоплазмодинамический ускоритель, обеспечивающий получение пучков нейтральных и ионизованных атомов кислорода с энергией 10–100 эВ, и другие.

В последние годы в связи с резким ростом вычислительных мощностей персональных компьютеров и расширением возможностей использования суперкомпьютеров интенсивно развиваются методы математического моделирования процессов взаимодействия КА с окружающей средой. Они позволяют детально задавать исходные характеристики ФКП, моделировать совместное воздействие нескольких факторов и т. д. Однако и в этом случае необходимо привлечение исходных данных о физических механизмах воздействия ФКП.

Установленные ранее в МГУ суперкомпьютеры Blue Gene/P и СКИФ МГУ «Чебышев» с производительностью 28 и 60 Тфлопс соответственно и новый суперкомпьютер «Ломоносов» с производительностью до 420 Тфлопс позволяют успешно решать сложные вычислительные задачи космического материаловедения.

На основании результатов исследований разрабатываются разнообразные методы защиты КА и повышения стойкости их материалов к воздействию ФКП. При защите от каждого фактора предъявляются специфические требования к используемым методам и техническим средствам. Конструкторы стараются по возможности их сочетать, чем обеспечиваются наиболее высокие уровни защиты.

4. Важнейшие задачи современных и будущих исследований

Как уже отмечалось, в процессе развития космической техники необходимо постоянное обновление и дополнение имеющихся данных практически по всем видам взаимодействия КА с окружающей космической средой. Когда какие-то задачи успешно решаются, их острота на некоторое время снижается, но появляются другие задачи, требующие их серьезного изучения и решения.

В качестве главных задач текущего периода можно рассматривать:

- точное определение и прогнозирование поглощенных доз космической радиации в материалах и оборудовании КА с детализацией его структуры вплоть до отдельных элементов микроэлектроники (задача микродозиметрии) и изучение механизмов возникновения одиночных сбоев;
- изучение синергетических эффектов, возникающих при взаимодействии КА с окружающей космической средой;
- исследование процессов формирования и характеристик собственной атмосферы негерметизированных КА;
- комплекс работ по снижению уровня техногенных воздействий на околоземную космическую среду.

Порядок перечисления этих задач не следует связывать со степенью их важности. Все они весьма актуальны на современном этапе исследований.

Формулируя задачи перспективных исследований, необходимо отметить, что решение многих из этих задач ведется и в настоящее время, а некоторые из них частично уже решены. Однако здесь важно подчеркнуть, что от решения именно этих задач зависят в ближайшем будущем успехи в совершенствовании космической техники.

В число таких ключевых задач входят:

- создание обновленных моделей космической среды и экспертных систем для анализа и прогнозирования ее воздействия на КА;
- разработка научных основ и технологий создания новых материалов космической техники на основе композитов иnanoструктур;
- создание новых элементов электроники и сенсоров для космической техники с широким применением нанотехнологий;
- разработка эффективных методов защиты перспективных КА от воздействия ФКП применительно к дли-

тельным полетам КА на околоземных орбитах и межпланетным полетам;

- экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование стойкости наноматериалов и изделий на их основе к воздействию космической среды.

Решение этих задач позволит создать научно-техническую базу для широкого применения новых материалов и технологий при разработке перспективных КА и осуществлении крупнейших космических проектов XXI столетия.

5. Перспективы применения наноматериалов в космической технике

Специалисты космической отрасли многих стран уделяют огромное внимание анализу и прогнозированию разнообразных возможностей применения нанотехнологий и наноматериалов в космических системах [16]. Уже созданы и реализуются конкретные долгосрочные программы развития космической техники с использованием нанотехнологий и наноматериалов [17]. Эти программы в значительной степени ориентированы на разработку новых поколений негерметизированных КА и малых спутников, включая наноспутники массой 1–10 кг и пикоспутники, масса которых не превышает 1 кг. Предполагается и уже подтверждено некоторыми реально созданными конструкциями, что такие КА могут обладать весьма высокими функциональными возможностями, приближающимися к возможностям тяжелых КА. Очевидно, что для достижения этого уровня необходимо широкое использование при создании малых КА нанотехнологий, наноматериалов и изготовленных с их применением элементов оборудования. Без использования нанотехнологий и наноматериалов немыслимо и создание пионируемых космических кораблей нового поколения.

Обобщенный прогноз развития космических нанотехнологий представлен на рис. 5. На этом рисунке горизонтальная шкала отражает рост потенциальных возможностей космических систем на разных временных этапах, а движение вверх по вертикальной шкале показывает повышение уровня сложности и интеграции систем. Каждый новый шаг по шкале времени, приведенной в верхней части рисунка, предполагает появление более сложных nanoобъектов, а также возникновение и развитие новых областей знаний и технологий или функций.

Как можно видеть из приведенной прогностической схемы, в ближайшие годы (до 5 лет) ожидается появление и даже начало практического применения нескольких классов наноматериалов. Прежде всего речь идет о новых конструкционных материалах на основе наночастиц и углеродных нанотрубок, которые позволяют резко снизить вес КА. Другим успешно развивающимся направлением является наноэлектроника с использованием нанотрубок и иных nanoструктур. В дальнейшем планируется создание стойких к воздействию космической радиации молекулярных компьютеров и биокомпьютеров, реализация известного проекта строительства «космического лифта» [18] на основе сверхпрочного троса протяженностью от земной поверхности до геостационарной орбиты, разработки биосенсоров, использующих эффект «молекулярного

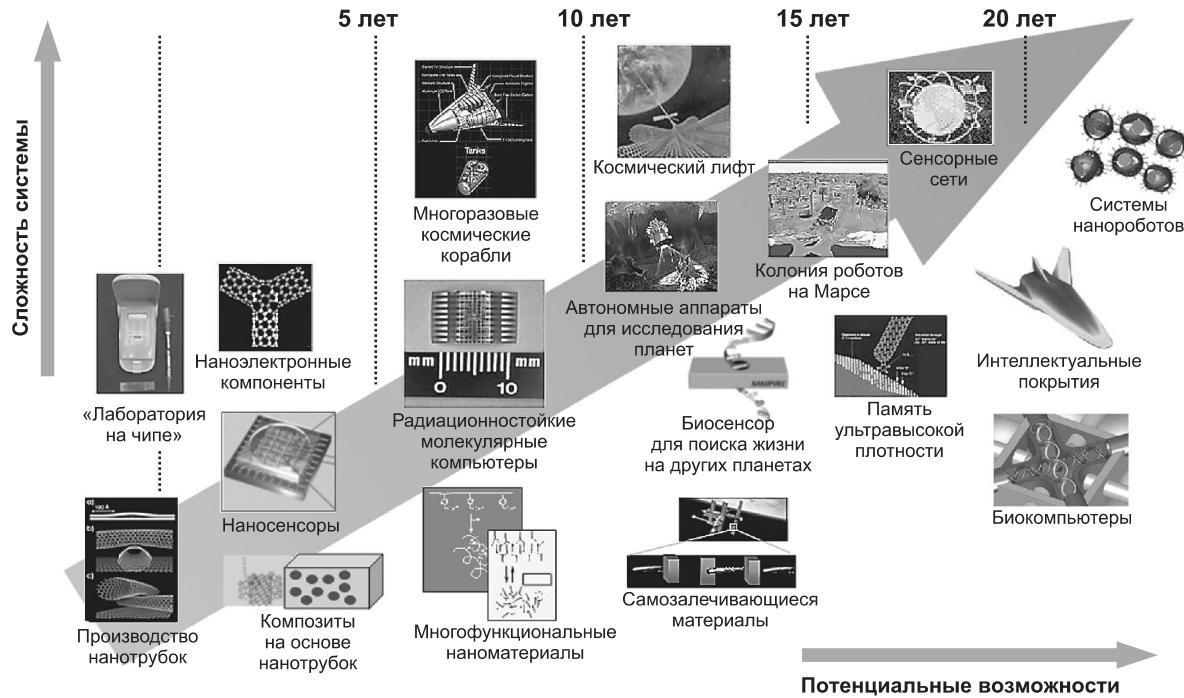


Рис. 5. Прогноз развития космических нанотехнологий

распознавания» [19], создание сенсорных сетей для диагностики состояния космической среды в окрестности Земли и других планет, а также систем нанороботов, способных выполнять масштабные работы, в том числе направленные на улучшение окружающей среды.

Однако внедрение наноматериалов и изготовленных из них элементов оборудования в изделия ракетно-космической техники сопряжено с необходимостью всестороннего изучения их поведения в экстремальных условиях космоса, пересмотром многих физических представлений о процессах воздействия ФКП на материалы и создания новых методов исследования этих процессов. Например, при радиационных воздействиях на наноматериалы и наноструктуры уход продуктов ядерных взаимодействий из области столкновения частиц существенно меняет количество вещества в рассматриваемой структуре и пространство выделения энергии первичного излучения. Следовательно, в данном случае отчасти утрачивает физический смысл понятие «поглощенная доза» в традиционной его трактовке, и требуется на основании исследования специфики протекающих процессов разработать новые физические понятия и термины, которые могут быть использованы в «нанодозиметрии». Аналогичные замечания можно сделать в отношении ионного распыления наноматериалов, их распыления нейтральным атомарным кислородом верхней атмосферы Земли, ударного воздействия частиц космической пыли и других процессов.

С учетом специфики воздействия ФКП на наноматериалы необходимо разработать новые методы экспериментального и математического моделирования процессов, вызываемых таким воздействием в наноструктурах. При создании экспериментальных методов требуется определить оптимальные характеристики используемых источников излучений: вид частиц или квантов, их энергию, плотность потока, угловые распределения.

Математическое моделирование воздействия ФКП

на наноматериалы и изготовленные из них элементы конструкции и оборудования КА имеет целый ряд особенностей. Вызываемое воздействием внешних факторов изменения свойств материалов определяются структурными параметрами и процессами, относящимися к различным пространственным масштабам: от размеров атомов и молекул до размеров рассматриваемых изделий. При этом для наноматериалов определяющую роль в указанной размерной последовательности играют входящие в их состав наночастицы и наноструктуры. Следовательно, при математическом описании свойств и поведения в условиях космического пространства объектов, созданных с использованием наноматериалов, необходимо принимать во внимание и уметь моделировать процессы, протекающие в наноразмерных структурах, а также выявлять и учитывать в моделях разнообразные связи указанных процессов с процессами, характерными для других пространственных масштабов.

Поэтому в общем случае приходится использовать так называемое «многомасштабное моделирование», основанное на применении в различных пространственных и временных интервалах совокупности расчетных методов, начиная от методов квантовой механики и заканчивая методами макромоделирования, используемыми для анализа характеристик законченных изделий и систем [20]. Поскольку подобные расчеты весьма трудоемки, особое место в их реализации отводится суперкомпьютерам.

В НИИЯФ МГУ уже ведутся работы по созданию экспериментальных и расчетных методов изучения процессов воздействия ФКП на наноструктурированные материалы.

Заключение

Космическое материаловедение, возникшее как самостоятельное научное направление около 50 лет назад,

продолжает динамично развиваться, опираясь на новейшие достижения атомной и ядерной физики, физики плазмы, физики конденсированного состояния вещества, химии, электроники и других наук. В свою очередь космическое материаловедение обогащает новыми идеями и разработками многие смежные области науки и техники.

Мощным стимулом для появления и быстрого развития новых разделов и направлений космического материаловедения является начинающееся широкомасштабное внедрение в космонавтику нанотехнологий, сопряженное с необходимостью детального изучения поведения в условиях космического пространства наноматериалов и изготовленных из них изделий.

Современные достижения космического материаловедения и результаты будущих исследований в этой области, безусловно, станут прочным фундаментом для дальнейшего совершенствования космической техники и успешной реализации уникальных космических проектов XXI столетия: строительства обитаемых баз на Луне, осуществления пилотируемого полета на Марс и полета группы автоматических КА к Юпитеру с посадкой на некоторые его спутники, создания крупных энергетических и производственных комплексов на околосолнечных орbitах.

Список литературы

1. Акишин А.И., Новиков Л.С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М., 1983.
2. Захаров Б.Г., Стрелов В.И., Осилюн Ю.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 2. С. 3.
3. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С. и др. // Proc. XVII Congr. YAF, Noth. Holl. Publ. Co. 1968. Р. 279.
4. Новиков Л.С., Черник В.Н. Применение плазменных ускорителей в космическом материаловедении. М., 2008.
5. Милинчук В.К., Клинишонт Э.Р., Тупиков В.И. Основы радиационной стойкости органических материалов. М., 1994.
6. Новиков Л.С. // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 15.
7. Акишин А.И., Новиков Л.С., Маклецов А.А., Милев В.Н. // Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. проф. Л.С. Новикова. М., 2007. С. 315.
8. Novikov L.S., Akishin A.I., Semkin N.D., Voronov K.E. // Proc. of the 7th Int. Symp. on «Materials in Space Environment», France. SP 399. 1997. Р. 493.
9. Новиков Л.С., Панасюк М.И. // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып. 4. С. 3.
10. Новиков Л.С., Милев В.Н., Воронина Е.Н. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 3. С. 32.
11. Новиков Л.С. Высокоскоростные соударения в космосе. М., 2003.
12. Novikov L.S. // Radiation Measurements. 1999. **30**. Р. 661.
13. Новиков Л.С. Основы экологии околоземного космического пространства. М., 2006.
14. Novikov L.S. Space radiation effects simulation methods. SINP MSU Preprint 2003-9/722.
15. Акишин А.И., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г. // Новые научные технологии в технике: Энциклопедия. Т. 16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Л. С. Новикова, М. И. Панасюка. М., 2000. С. 164.
16. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. М., 2008.
17. Nanotechnology in Space Exploration. Rep. of the National Nanotechnology Initiative Workshop. USA, 2006.
18. Edwards B.C. The space elevator development program // 55th Int. Astronautical Congr. Vancouver, Canada, 2004.
19. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. М., 2007.
20. Multiscale Simulation Methods for Nanomaterials / Ed. by S. Mohanty, R. Ross. J.Wiley & Sons, 2008.

Space material science in the present and in the future

L. S. Novikov

D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia.
E-mail: novikov@sinp.msu.ru.

The information on the formation and development of space material science is presented. The main goals of this field are studying the physicochemical mechanisms of the space environment influence on spacecraft materials and developing methods for improvement of spacecraft materials and equipment durability to this impact. The main topics of the research are presented, the most important tasks of current and future investigations are formulated, and the perspectives of the applications of nanotechnology and nanomaterials for cosmonautics are discussed.

Keywords: spacecraft, materials, space environment, impact, simulation, protection, nanotechnology.

PACS: 94.05.-a, 81.70.-q, 62.23.Pq.

Received 30 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторе

Новиков Лев Симонович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-10-07, e-mail: novikov@sinp.msu.ru.