

СТАНОВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

А.И. Акишин

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобелевича
119899, Москва, Воробьевы горы, akishin@hep.sinp.msu.ru*

History of development of space material science in SINP MSU in 1962-1961. The role in this science of S.N.Vernov, S.S.Vasiliev, I.B.Teplov is shown. Some methods of simulation of space irradiation on materials have been described.

Подготовка к первым экспериментам в НИИЯФ МГУ по имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы оборудования искусственных спутников Земли (ИСЗ) и, в частности, на терморегулирующие покрытия началась по инициативе директора НИИЯФ МГУ академика С.Н. Вернова в конце 1961 г. Испытания проводились в лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) НИИЯФ МГУ (заведующий лабораторией профессор С.С.Васильев) на электромагнитном сепараторе. Организация таких исследований в НИИЯФ МГУ была связана с обращением Главного конструктора космической техники С.П. Королева к С.Н. Вернову (Рис.1).

Необходимо было выявить наиболее устойчивые типы терморегулирующих покрытий для долгоживущих космических аппаратов (КА). Впоследствии, неоднократно приходилось выполнять срочные задания от С.Н. Вернова по исследованию и прогнозированию работоспособности различных материалов и элементов космических аппаратов: фотопреобразователей солнечных батарей ИСЗ "Электрон", элементов системы астронавигации и оптического оборудования, электронных приборов и пр.

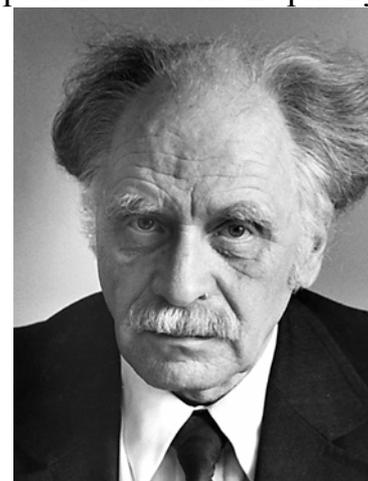


Рис.1 Академик
С.Н. Вернов (1908-1982)

Такие испытания проводились, как правило, в связи с личным обращением к С.Н. Вернову главных конструкторов космических аппаратов (В.Н. Челомей, М.Ф. Решетнева, Г.Н. Бабакина, Н.С. Лидоренко и др.).

В 1965 г. в институте была создана лаборатория космического материаловедения (ЛКМ) под руководством профессора А.И. Акишина. В 1981 г. ЛКМ вошла в состав Отдела ядерных и космических исследований (ОЯКИ), возглавляемого профессором И.Б. Тепловым, где проводимые исследования получили дальнейшее развитие. С 1993 г. руководителем ОЯКИ является профессор Л.С. Новиков. Благодаря созданному по замыслам заведующего лабораторией ядерных реакций (ЛКМ) профессора С.С. Васильева ускорительному комплексу НИИЯФ МГУ, на всех этих установках удалось развить исследования по радиационной стойкости материалов и элементов космической техники, и первыми научными

исследованиями, выполненными в НИИЯФ МГУ, были заложены основы нового научного направления – космического материаловедения. Уже ко второй половине 1960 –х годов были получены важнейшие результаты в этой новой области, признанные как у нас в стране, так и за рубежом. Предложены и осуществлены рекомендации по повышению радиационной стойкости материалов и элементов бортового оборудования КА. Результаты исследований, проведенных в 1962-1979гг. под руководством академика С.Н. Вернова, профессоров А.И. Акишина и И.Б. Теплова, вошли в цикл работ, удостоенных Государственной премии СССР (1979г.). Для этих работ в основном использовалась экспериментальная база ЛЯР НИИЯФ МГУ: циклотрон У-120 с энергией протонов до 6,3 МэВ, электростатический ускоритель ЭГ-8 с напряжением 4 МВ, каскадный генератор КГ-500 с энергией протонов 100-500 КэВ, электромагнитный сепаратор с энергией протонов до 30 КэВ. Для воздействия на материалы фотонных ионизирующих излучений использовалась кобальтовая пушка и рентгеновская установка РУП-400. Исследования также проводились на электронных ускорителях с энергиями 2 и 22 МэВ (ИМЕТ им. А.А. Байкова) (зав. лаб., Лауреат Государственной премии, проф. Л.И. Иванов) и на протонном инжекторе с энергией протонов 100 МэВ (ИФВЭ г. Протвино). В ЛКМ было создано и запущено несколько оригинальных имитационных установок:

- Плазмотроны для генерации и имитации потоков ионосферной кислородной плазмы с энергией ионов в 10 - 20 эВ.

- Ускорители потоков заряженных металлических микрочастиц, с массой 10^{-10} - 10^{-12} г, имитирующих потоки космической пыли и микрометеоров с $v \sim 0,1-20$ км/с.

- Установка комплексного воздействия на материалы (электроны с $E = 30$ КэВ, имитатор солнечного излучения, вакуум 10^{-6} Па).

Методика имитации радиационных одиночных сбоев (РОС) в микросхемах с использованием осколков деления радиоактивного изотопа калифорния-252 и лазерных импульсных пучков.

С.Н. Вернов много внимания уделял постановке исследований по радиационной стойкости кремниевых фотопреобразователей солнечных батарей ИСЗ на ускорителях заряженных частиц НИИЯФ МГУ.

В реальной обстановке типичным проявлением радиационного повреждения кремниевых фотопреобразователей солнечной батареи является снижение напряжения и тока короткого замыкания, что выявилось при запуске в 1964 году ИСЗ "Электрон-1" в течение первого месяца его полета. Как показали последующие имитационные радиационные испытания фотопреобразователей на циклотроне и каскадном ускорителе НИИЯФ МГУ снижение рабочих характеристик солнечных батарей ИСЗ "Электрон-1" было вызвано в основном протонами с энергией менее 1 МэВ, т.к. солнечные батареи эксплуатировались без радиационной защиты. Последующая экранировка фотопреобразователей солнечных батарей искусственных спутников Земли "Электрон-3,4" тонким слоем лака непосредственно перед запуском на стартовой площадке позволила уменьшить скорость

снижения тока и напряжения солнечных батарей и таким образом продлить ресурс их работы до года.

В дальнейшем совместно с научно-производственным объединением "Квант" был проведен большой объем исследований радиационной стойкости различных типов кремниевых фотопреобразователей при облучении протонами и ионами гелия в интервале 0,1-30 МэВ.

Материалы и элементы оборудования ИСЗ подвергаются воздействию тяжелых одиночных ядер космических лучей высокой энергии. Плотность потока таких ядер низка по сравнению с плотностью потока протонов, однако, из-за высокого ядерного заряда линейные потери энергии, например в треке ядра железа с $E \sim 1$ МэВ/нуклон в кремнии составляют около $27 \text{ МэВ см}^2 \text{ мг}^{-1}$. Время релаксации ионизационной составляющей трека $\sim 10^{-12}$ с, диаметр трека менее 0,1 мкм. Доза излучения в центре трека 10^5 Гр. При воздействии таких ядер на микросхемы с высоким уровнем интеграции возникают радиационные одиночные сбои (РОС), которые являются одной из причин радиационных аномалий искусственных спутников Земли.

В 1979 г. автор этих строк ознакомил С.Н. Вернова с проблемой радиационных сбоев больших интегральных схем, возникающих в бортовом электронном оборудовании американских ИСЗ. С.Н. Вернов заинтересовался этой проблемой, т.к. он сразу понял, что появился новый аргумент для расширения исследований химического состава ядер космических лучей галактического происхождения на борту ИСЗ в виду его научного и прикладного значения. С.Н. Вернов рекомендовал как можно быстрее организовать в лаборатории изучение физических основ радиационных одиночных сбоев микросхем.

В лаборатории космического материаловедения для изучения радиационных сбоев микросхем развивались две методики. Первая была основана на имитации РОС микросхем с помощью радиоактивного изотопа калифорний-252, в котором за счет спонтанного деления ядер образуются осколки деления со средней энергией около 80 и 110 МэВ с высоким ядерным зарядом и с линейной потерей энергии $40\text{-}45 \text{ МэВ см}^2 \text{ мг}^{-1}$, что выше, чем у ядер железа космических лучей. Этот метод позволяет оценить верхний предел сечения радиационных одиночных сбоев микросхем, однако критический заряд РОС измерить невозможно. Другая методика имитации радиационных сбоев микросхем была основана на применении остророфокусированного импульсного лазерного пучка.

Исследование электроразрядных процессов в диэлектриках, находящихся в радиационно-заряженном состоянии, были начаты в лаборатории космического материаловедения в 1963г. Интерес к этому явлению в космическом материаловедении сильно возрос после образования в 1962г. мощного искусственного радиационного пояса Земли в результате проведения США в южной части Тихого океана, на высоте около 400 км термоядерного взрыва. Под действием электронов искусственного радиационного пояса Земли ряд ИСЗ США уменьшили свой ресурс. Стало ясно, что диэлектрические элементы бортового оборудования, микросхемы и ИСЗ в целом могут быть

также подвержены сильной радиационной электризации в зоне такого образования, поскольку интенсивность и средняя энергия электронных потоков в них заметно выше по сравнению с естественными радиационными поясами Земли. С.Н. Вернов проявлял исключительный интерес к физике формирования искусственного радиационного пояса Земли и воздействия его излучений на аппаратуру ИСЗ.

С проблемой значительного влияния радиационной электризации от электронов радиационного пояса Земли на работоспособность геостационарных и высокоэллиптических советских ИСЗ типа "Горизонт", "Радуга" и "Молния" пришлось столкнуться в конце 70-х годов, хотя в США интерес к этому явлению возник на несколько лет раньше. С.Н. Вернов, понимая значимость этой задачи, активно подключился к ее решению. Секция №2 Межведомственного координационного научно-технического совета (МКНТС) под руководством С.Н. Вернова подготовила общесоюзную научно-техническую программу по радиационной электризации ИСЗ и разработке методов борьбы с ней. Согласно решению Совета Министров СССР НИИЯФ МГУ стал головной организацией по этой проблеме.

В течение последующих нескольких лет была разработана физико-математическая модель радиационной электризации геостационарных ИСЗ. Исследовано влияние электромагнитных помех, возникающих в процессе электроразрядных явлений облученных диэлектрических материалов, на сбои оборудования ИСЗ. Исследован механизм электроразрядного разрушения твердых диэлектриков при воздействии пучка протонов с энергией 100 МэВ. Эти данные могут быть полезны при использовании направленных пучков атомарных частиц в космосе.

В результате проведенных исследований (1961-1991гг.) коллективом ЛКМ получены следующие основные результаты:

1. Разработаны методы имитации воздействия различного вида космических корпускулярных излучений на материалы и элементы космических аппаратов. Даны рекомендации по ускоренным испытаниям, обоснован коэффициент ускоренности 10 – 1000 раз. Разработан и внедрен метод трансформации моноэнергетических пучков протонов (p) и электронов (e) с энергией 2-6,3 МэВ, получаемых на ускорителях, в пучки со сплошными энергетическими спектрами. Испытан метод комплексного воздействия различных факторов космического пространства (e, p, ультрафиолетовое излучение Солнца, $T=77-600\text{ K}$) на космические материалы .
2. Совместно с НПО «Квант» исследована радиационная стойкость кремниевых фотопреобразователей, используемых в солнечных батареях КА, к воздействию пучков (p, альфа-частицы) в интервале энергий 0,1-30 МэВ. Даны рекомендации по повышению радиационного ресурса солнечных батарей КА, в частности ИСЗ «Электрон».
3. Совместно с НПО «Квант» исследован механизм воздействия электроразрядных процессов, вызванных радиационной электризацией электронами с энергией 10-30 кэВ покровных защитных стекол

фотопреобразователей на работоспособность солнечных батарей. В процессе электризации внешней поверхности стекла может возникнуть электрический пробой на фотопреобразователь или дуговой разряд между соседними солнечными элементами, имеющими разность потенциалов, превышающем 30-40В.

4. Совместно с ГОИ им. С.И.Вавилова исследована радиационная стойкость и уровень радиолуминесценции более 100 марок оптических стекол и покрытий при воздействии различных типов ионизирующих излучений. Дана инженерная оценка изменения оптических свойств стекол при эксплуатации их в радиационном поясе Земли (РПЗ) в течение 1-10 лет.
5. Совместно с НПО «Энергия», НПО завода им. Лавочкина, НПО ПМ проведены исследования изменения коэффициентов поглощения, α_s , и излучения, ϵ , различных типов терморегулирующих покрытий (ТРП) КА при имитации воздействия факторов космического пространства.
6. Исследован механизм объемной радиационной электризации разных диэлектриков (оптические стекла, полимеры) при воздействии пучков электронов и протонов с энергией 1-100 МэВ. Электризация диэлектрических материалов КА может вызываться также электронами РПЗ с энергиями 1-10 МэВ. Электроны такой энергии проникают в диэлектрик до 1 см., создавая внутри внедренный электрический заряд. Изучен механизм электрического пробоя в радиационно-заряженных диэлектриках. При этом мощность разряда составляла 10^6 - 10^7 Вт при длительности 10^{-7} - 10^{-6} с, а плотность тока и удельная мощность в разрядном канале достигали 10^7 А·см⁻² и 10^{11} - 10^{12} Вт·см⁻³ соответственно. Такие эксперименты позволяют изучать состояние вещества в экстремальных условиях при воздействии концентрированного потока энергии.
7. Изучен механизм инициирования электрического пробоя в радиационно-заряженных диэлектриках с помощью импульсного лазерного излучения, что позволило измерить временные и другие характеристики электрического разряда. Возникающая в объеме диэлектрика лазерная искра приводит к развитию электрического пробоя внедренного заряда.
8. Созданы и внедрены методы имитации радиационных одиночных сбоев (РОС) в микросхемах с помощью осколков деления радиоактивного изотопа Cf^{252} и импульсного лазерного излучения.
9. Разработан метод электростатического ускорения (электростатический генератор ЭГ-8, каскадный генератор КГ-500) заряженных, металлических макрочастиц ($m \sim 10^{-10} - 10^{-12}$ г) в интервале $v \sim 0,1$ -20 км/сек. Исследовано воздействие таких частиц, имитирующих потоки микрометеоров, на космические материалы, в частности, по заданию НПО «Звезда», на материалы космических скафандров. Обнаружено явление инициирования локальных разрядов в радиационно-заряженных стеклах при ударах одиночных макрочастиц с массой 10^{-10} - 10^{-12} г. при $v \sim 2$ -10 км/сек. Изучена морфология поверхности облученных оптических материалов и характеристики образующейся ударной плазмы.
10. Совместно с ГОИ им. С.И.Вавилова проведены имитационные

испытания воздействия ветропылевых потоков частиц марсианской пылевой бури с $v \sim 10-100$ м/сек. на аналоги оптических элементов, установленных на космическом аппарате «МАРС-3». Установлено, что воздействие таких потоков на оптические элементы приводит к снижению их прозрачности и значительному росту коэффициента яркости при засветке Солнцем. Эти эксперименты косвенно подтверждают возможную версию потери визуальной связи с аппаратом «МАРС-3» из-за ветропылевого воздействия.

11. Разработан метод имитации воздействия потоков ионосферного атомарного кислорода с энергией 5 эВ на космические материалы с помощью высокочастотной кислородной плазмы. Показано, что эмалевые ТРП КА, предоставленные НПО «Энергия» и другими организациями, имеют аномально высокие потери массы связующего ТРП и мало пригодны для использования на КА с высотой орбиты 300-500 км. Это явление было обнаружено в 1965 г., т.е. на 7-8 лет раньше, чем аналогичные явления, наблюдаемые при первых полетах КА США «Спейс Шаттл» в 1992-1993 гг.
12. Создан плазменный ускоритель с энергией ионов 10-20 эВ для имитации воздействия на космические материалы потоков ионосферных частиц. Исследован механизм плазмохимического распыления углеродных, полимерных материалов и терморегулирующих покрытий при ускоренных методах испытания.
13. Исследовано распыление кандидатных материалов (нержавеющие стали, графит, углеродные материалы) первой стенки термоядерного реактора ионами кислорода и аргона с энергией 10-100 эВ.
14. Рассмотрено влияние продуктов собственной внешней атмосферы (СВА) КА на работоспособность материалов и астронавигационного оборудования (КБ Марс) в результате загрязнения поверхности оптических элементов и свечения СВА. Максимальный расчетный уровень яркости свечения СВА КА может достигать $V/V_0 \sim 5 \cdot 10^{-12}$, где V_0 -яркость Солнца.
15. Создана первая версия физико-математической модели радиационной электризации космических аппаратов. НИИЯФ МГУ стал лидером в нашей стране по этому направлению в части расчетов на стадии проектирования КА.

С.Н. Вернов много внимания уделял научно-организационным вопросам. С.Н. Вернов с 1965 г. по 1982 г. являлся председателем секции №2 Межведомственного координационного научно-технического совета (МКНТС), с 1983 г. по 1991 г. председателем секции №2 был. И.Б.Теплов. Ученым секретарем секции №2 был А. И. Акишин (1965-1991). В 1965 г. С.Н. Вернов предложил автору этих строк организовать в НИИЯФ МГУ Всесоюзный семинар по тематике: «Имитация воздействия космической среды на материалы и элементы космических летательных аппаратов», с 1965-1991 гг. было проведено 79 заседаний. С 1995 г. семинар возобновил работу под руководством профессора Л.С.Новикова. Под редакцией акад. С.Н. Вернова вышло семь изданий сборника НИИЯФ МГУ "Модель околоземного космического пространства" ("Модель космоса") (1964-1983).

Проблематика секции №2 МКНТС была связана с анализом надежности космических аппаратов к воздействию космической среды, в первую очередь различных видов космических ионизирующих излучений. Будучи ведущим, в СССР специалистом в области космических корпускулярных излучений С.Н. Вернов пользовался непререкаемым авторитетом на заседаниях Совета и секции №2. Председатель Совета генерал-полковник Р.П. Покровский при встрече с С.Н. Верновым любил в шутливой манере отмечать, что для него С.Н. Вернов - маршал. С.Н. Вернов был единственным академиком среди членов Совета. В период с 1965 по 1982 годы секция №2 при личном участии С.Н. Вернова подготовила ряд важнейших всесоюзных научно-технических программ. С.Н.Вернов лично докладывал о научно-технических программах, подготовленных секцией №2, на Военно-промышленной комиссии Совета министров СССР.

В 1962-1963 годах был период стремительного взлета ЦКБМ, где генеральным конструктором космической техники был В.Н. Челомей. В 1963 году С.Н. Вернов принял предложение В.Н. Челомея об участии НИИЯФ МГУ в разработке научно-технического задания проекта создания на возглавляемом им предприятии имитационного центра для испытаний стойкости изделий космической техники к воздействию космических корпускулярных излучений. Ответственным исполнителем реализации этого проекта был определен Физико-технический институт низких температур АН УССР (г.Харьков). Рабочая группа НИИЯФ МГУ, созданная С.Н. Верновым (Акишин А.И., Васильев С.С., Воробьев Ю.А., Горчаков Е.В., Теплов И.Б.), должна была выработать научно-техническое задание проекта и осуществлять его сопровождение. Рабочая группа НИИЯФ отстаивала развернутое техническое задание проекта, включая строительство в имитационном центре ЦКБМ циклотрона. ФТИНТ, по-видимому, был не в состоянии реализовать проект на базе задания НИИЯФ МГУ, возникли осложнения, согласование проекта затягивалось. Развязка наступила неожиданно. В 1964г. Н.С. Хрущев был освобожден с поста Первого секретаря ЦК КПСС. В последующие годы на предприятии был смонтирован разработанный Физико-техническим институтом низких температур по техническому заданию НИИЯФ МГУ электронно-протонный инжектор с энергией частиц 200 кэВ с вакуумной камерой, который работает, и по сей день.

С.Н. Вернов с 1965 г. начал активно интересоваться организацией в СССР подготовки студентов по профилю «Космическое и радиационное материаловедение» (КРМ). В начале 1971 г. с помощью известного мне Д.Б. Зворыкина, который заведовал кафедрой в МИЭМ, удалось наладить контакт с ректором Московского института электронного машиностроения профессором Е.В. Арменским, который активно подключился к решению поднятой проблемы. Подготовка инженеров по профилю КРМ в МИЭМ осуществлялось на факультете «Электроника» на кафедрах: «Материаловедение электронной техники» и «Физические основы электронной техники». Большой вклад в подготовке учебного процесса внесли: Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Вышков В.А., Епифанов Г.И., Иванов Л.И., Лысенко А.П. С 1971 г. в Московском

институте электронного машиностроения начались занятия студентов по специализации «Космическое и радиационное материаловедение». Ежегодная потребность в СССР в 1970 -1975 г. специалистов по новому профилю составляла около 100 человек. МИЭМ ежегодно готовил около 50 человек.

Академик С.Н. Вернов с 1971 по 1982 г. для студентов МИЭМ читал курс лекций "Основы космической и ядерной физики", а с 1982 г. по 1991 г. эту дисциплину вел профессор И.Б. Теплов. Профессор А.И. Акишин с 1971г. по н/в читает курс лекций «Радиационная техника и методы имитации воздействия космической среды на материалы и оборудования КА». Профессор МИЭМ Л.С. Новиков, Ю.И. Тютрин, Л.И. Цепляев также активно участвовали в педагогическом процессе. С 1975 г. по 1985 г. по инициативе С.Н. Вернова кафедра отделения ядерной физики физического факультета МГУ "Физика космоса и космических лучей" также начала подготавливать студентов по индивидуальным планам по профилю космического и радиационного материаловедения. Студенты и аспиранты МГУ и МИЭМ, специализирующиеся по профилю «Космическое и радиационное материаловедение», выполняли свои исследования на учебной экспериментальной базе НИИЯФ МГУ. С 1971г. в ОЯКИ около 40 студентов МГУ и МИЭМ выполнили свои дипломные работы по этому профилю.

По просьбе ряда ведущих предприятий Министерств общего машиностроения и электронного приборостроения СССР (КБ «Салют», ЦКБМ и ряд других организаций), МИЭМ в рамках специализации «Космическое и радиационное материаловедение» в 1978 г создал специальный факультет по переподготовке специалистов этих предприятий. За 12 лет работы был осуществлен выпуск более 100 специалистов по этому профилю.

С.Н. Вернов посвятил развитию космического материаловедения и подготовке специалистов в этой области в СССР более 20 лет своей жизни. Хотя эта проблема и не была ведущей в его научных интересах, но удивительно, как много он успел сделать. Большой вклад в период становления космического материаловедения в НИИЯФ МГУ внесли также профессора С.С. Васильев и И.Б. Теплов.

1. Акишин А.И. С.Н.Вернов и проблема воздействия космической среды на материалы. В кн. «Воспоминание об академиках Д.В.Скобельцыне и С.Н. Вернове» Изд-во МГУ М: 1995, с.107-111.
2. Акишин А.И. Развитие космического материаловедения в НИИЯФ МГУ. Препринт №96-1/408, М.: НИИЯФ МГУ, 1996, 42 с.
3. Акишин А.И., Развитие космического материаловедения в НИИЯФ МГУ. В кн. «50 лет научно-исследовательскому институту ядерной физики им. Д.В.Скобельцына. Доклады на заседаниях ученого совета НИИЯФ И ОЯФ физического факультета МГУ в 1995-1997гг». М.: НИИЯФ МГУ, 1997 с.187-233
4. Акишин А.И.- С.Н. Вернов и проблема радиационных сбоев в оборудовании космических аппаратов. В кн. «Сергей Николаевич Вернов – ученый, педагог и популяризатор науки (к 90-летию со дня рождения, 1910-2000 гг.) - М.: НИИЯФ МГУ, 2000, с.21-25.