

К 60-ЛЕТИЮ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АО «НПО ЛАВОЧКИНА»: ГОДЫ СОТРУДНИЧЕСТВА С НИИЯФ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА МГУ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ON THE 60TH ANNIVERSARY OF THE SPACE ACTIVITIES OF LAVOCHKIN ASSOCIATION: YEARS OF COOPERATION WITH THE SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS OF LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

В.И. Оседло¹,
кандидат физико-
математических наук,
osedlo@mail.ru;
V.I. Osedlo

В.В. Калегаев¹,
доктор физико-
математических наук,
klg@dec1.sinp.msu.ru;
V.V. Kalegaev

В.И. Тулупов¹,
кандидат физико-
математических наук,
ikt0840@mail.ru;
V.I. Tulupov

Н.М. Хамидуллина²,
кандидат физико-
математических наук,
*khamidullinanm@
laspace.ru;*
N.M. Khamidullina

П.А. Климов¹,
кандидат физико-
математических наук,
pavel.klimov@gmail.com;
P.A. Klimov

С.И. Свертилов¹,
доктор физико-
математических наук,
sis@coronas.ru;
S.I. Svertilov

М.Е. Артемов²,
кандидат
технических наук,
ArtemovME@laspace.ru;
M.E. Artemov

В статье рассказывается о достижениях в изучении космической радиации с помощью приборов НИИЯФ МГУ на космических аппаратах, созданных в АО «НПО Лавочкина»; о совместных работах в прогнозировании радиационных условий полёта; в исследованиях радиационной стойкости элементов космических аппаратов.

Ключевые слова:
космические аппараты;
космическая радиация;
межпланетная среда;
программный комплекс;
одиночные сбои и отказы;
прогноз радиационных условий и эффектов.

The article presents the achievements in study of space radiation using instrumentation by Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics onboard spacecraft developed by Lavochkin Association; in forecasting of flight radiation environment; in studies of spacecraft elements radiation hardeness.

Key words:
spacecraft;
space radiation;
interplanetary space;
program complex;
single event setups and failures;
radiation environment and effects forecast.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.003

Многолетнее плодотворное творческое сотрудничество коллективов АО «НПО Лавочкина» (НПОЛ) и НИИЯФ МГУ, которое продолжается и поныне, началось в 1965 году. Именно к этому году относится начало «космической» эры НПОЛ, когда произошла передача тематики «Исследование Луны и планет Солнечной системы автоматическими космическими

аппаратами» из ОКБ-1 С.П. Королёва в ОКБ «Машиностроительный завод им. С.А. Лавочкина», как тогда называлось НПОЛ.

НПОЛ во главе с главным конструктором Георгием Николаевичем Бабакиным и его последователями создало космические аппараты (КА), размещение на борту которых современных научных приборов

¹ НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобелцына, МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Россия, г. Москва.
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (MSU SINP), Russia, Moscow.

² АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

составило целую эпоху в российских исследованиях межпланетного и околоземного космического пространства (ОКП).

Конструкторам космических аппаратов крайне необходимы были сведения о характеристиках космической среды, в том числе ионизирующих излучений космического пространства, которые, как к тому времени было установлено, весьма агрессивно воздействуют на технику и экипажи космических миссий. Поэтому радиационный контроль непосредственно на борту КА во время полёта был необходим. Учёные НИИЯФ МГУ, естественно, были заинтересованы в исследовании фундаментальных основ космической радиации с научной точки зрения.

Для выдающегося учёного, директора НИИЯФ МГУ академика Сергея Николаевича Вернова (1910–1982), добившегося значительных достижений в области изучения космических лучей галактического и солнечного происхождения с помощью наземных установок и запускаемых на аэростатах приборов, был вполне очевидным переход к исследованиям космических излучений на КА без их искажения атмосферой Земли.

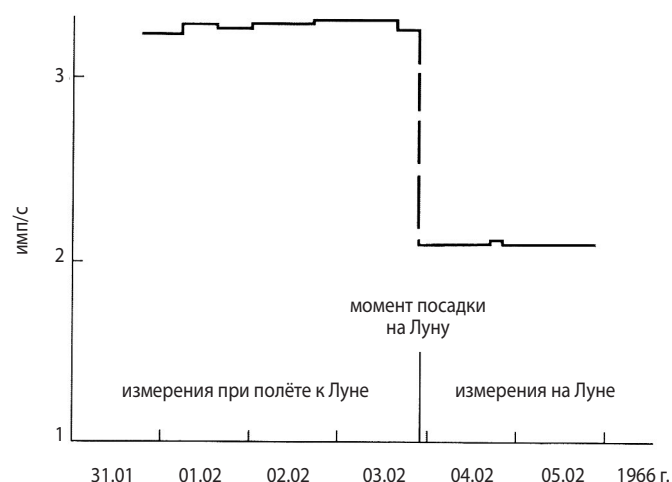
Огромная заслуга в создании и поддержании доверительных рабочих отношений между коллективами НПОЛ и НИИЯФ МГУ принадлежала талантливому ученику Сергея Николаевича профессору М.И. Панасюку (1945–2020), сменившему С.Н. Вернова на посту директора института.

Процессы на Солнце и в межпланетном пространстве сложны, и лишь систематические и планомерные измерения космических лучей и других характеристик межпланетной среды на КА дают необходимый материал для понимания закономерностей солнечной активности и её надёжного прогнозирования. Прогнозирование активности Солнца – важная прикладная задача исследования космических лучей. С её решением связаны условия космических полётов человека и автоматических станций, устойчивость земной и космической радиосвязи, погода и жизнедеятельность людей на Земле.

60–70-е годы прошлого века – годы интенсивного изучения Луны и окололунного пространства. Изучение космической радиации на Луне обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с околоземным, ибо Луна более 80% времени находится в полностью открытом космическом пространстве и менее 20% – в хвосте земной магнитосферы, причём на таких больших расстояниях от Земли, что экранирующее влияние земного магнитного поля является незначительным. К тому времени уже имелся некоторый опыт по организации полётов в направлении естественного спутника Земли. Однако о структуре лунной поверхности, твёрдая или покрыта толстым слоем пыли, радиоактивность пород, потоки частиц

альбедо, важных для выбора конструкции спускаемого аппарата) имелись весьма скудные сведения.

В этих условиях следует отметить успех миссии автоматической лунной станции (АЛС) «ЛУНА-9», первой в «космической» биографии НПОЛ (Ефанов В.В. и др., 2016). «ЛУНА-9» – это первая в мире мягкая посадка 03.02.1966, первая панорама лунного ландшафта и первая регистрация радиации на Луне простейшим прибором, созданным в НИИЯФ МГУ, с газоразрядным счётчиком СТС-5 (Вернов С.Н. и др., 1966). Результаты этого эксперимента представлены на рисунке 1.



рисунк 1. Поток радиации в открытом космосе и на поверхности Луны, по данным счётчика СТС-5 на станции «ЛУНА-9»

Эти измерения показали, что потоки космических лучей на поверхности Луны уменьшаются только в 1.6 раза по сравнению с межпланетным пространством, а не в два раза, как этого следовало бы ожидать из-за геометрической экранировки изотропных потоков космических лучей телом Луны. Этот результат был объяснён вкладом в поток излучений на Луне дополнительных потоков частиц альбедо (вторичных частиц, испускаемых лунной поверхностью под действием энергичных частиц галактических и солнечных космических лучей – ГКЛ и СКЛ соответственно) и радиоактивностью лунного грунта. Учёт этих факторов позволил определить радиоактивность лунной поверхности, которая оказалась близкой к радиоактивности земного грунта.

В дальнейшем всё более совершенная научная аппаратура НИИЯФ МГУ для регистрации потоков космической радиации устанавливалась на всех лунных станциях, как орбитальных, так и посадочных, созданных в НПОЛ, включая «ЛУНОХОДЫ-1, -2».

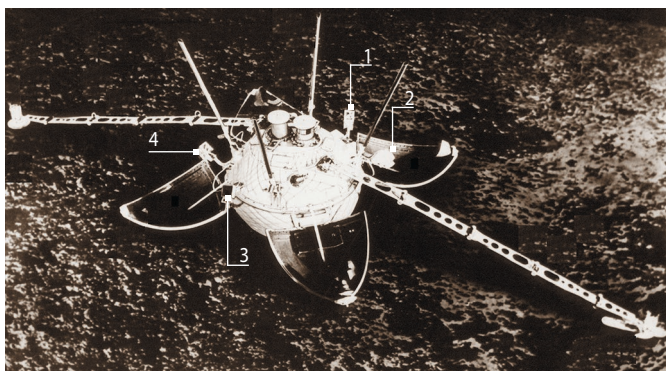


рисунок 2. Компьютерная репродукция АЛС «ЛУНА-13» на лунной поверхности

Если говорить об исследованиях Луны с общих позиций, а не только в аспекте изучения космической радиации, то нельзя не упомянуть о второй АЛС – «ЛУНА-13», совершившей также мягкую посадку в том же 1966 году на поверхность Луны. В состав её научной аппаратуры входил радиометр, созданный в НИИЯФ МГУ под руководством известного астрофизика профессора А.И. Лебединского для измерения интегрального теплового потока радиации от поверхности Луны. Радиометр имел четыре одинаковых датчика, размещённых так, чтобы при любом возможном расположении станции относительно Солнца в поле зрения не попадали ни тень станции, ни небо, ни солнечные лучи. На рисунке 2 представлена компьютерная репродукция АЛС на лунной поверхности, на которой датчики радиометра помечены цифрами 1–4.

По данным обработки измерений радиометра был вычислен так называемый тепловой параметр поверхности Луны, величина которого оказалась

соответствующей твёрдому пористому веществу, что подтвердилось показаниями приборов по определению механических свойств грунта, установленных на той же станции.

Следует отметить, что под руководством А.И. Лебединского были получены первые научные результаты обработки панорам лунной поверхности по снимкам АЛС «ЛУНА-9». Имя учёного увековечено в названии лунного кратера Lebedinskiy.

На всех автоматических межпланетных станциях (АМС), созданных в НПОЛ, направлявшихся к планетам Венера, Марс, спутнику Марса Фобосу, комете Галлея, были приборы НИИЯФ МГУ, которые использовали многомесячное нахождение этих станций в межпланетном пространстве для получения информации о радиации в космосе (Логачев Ю.И., 2007). Приборы на АМС серий «ВЕНЕРА» и «МАРС», кроме изучения космических лучей, предназначались для изучения возможных радиационных поясов этих планет. Измерения показали, что ни вблизи Марса, ни вблизи Венеры таких поясов не обнаружено. Этот результат согласуется с отсутствием заметного магнитного поля Венеры и слабым магнитным полем Марса.

Особенно удачным был полёт «ВЕНЕРЫ-4», первой АМС, созданной в НПОЛ. Измерения проводились на всей трассе полёта Земля – Венера и около Венеры, и приборы НИИЯФ МГУ зарегистрировали большое число солнечных вспышечных событий. Эти измерения ознаменовали новый важный этап в методике эксперимента и в развитии модельных представлений о распространении СКЛ и структуре межпланетной среды. На «ВЕНЕРЕ-4» были установлены детекторы протонов с энергиями 1–5 МэВ с полями зрения, ориентированными на Солнце и в противоположном направлении. Такая методика позволяла

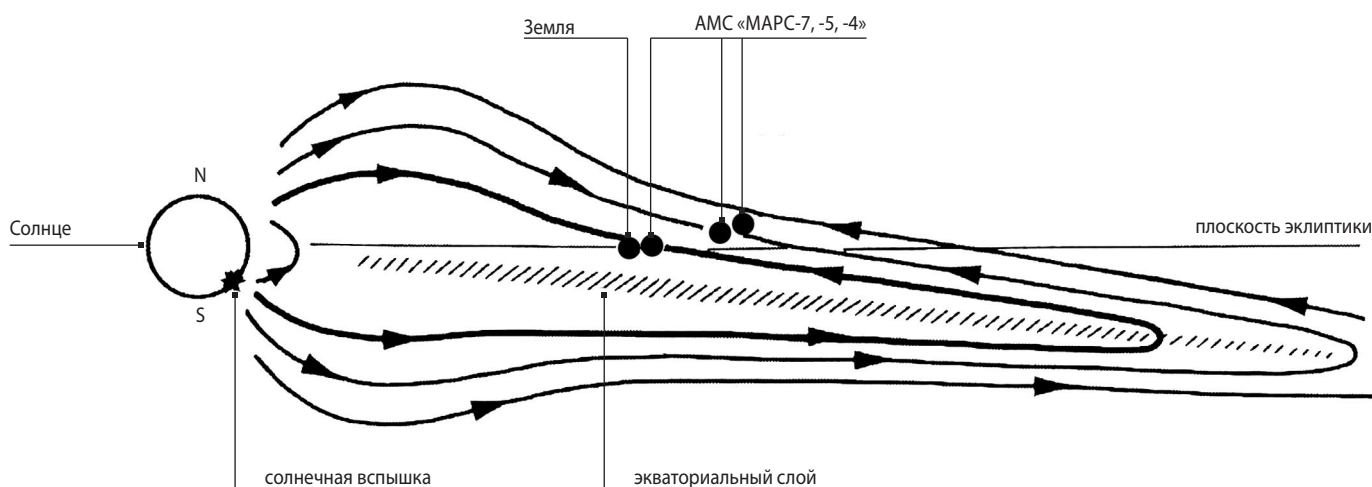


рисунок 3. Взаимное расположение АМС «МАРС-4, -5, -7» и области вспышки на Солнце 7 сентября 1973 года. Сплошные линии – возможная конфигурация силовых линий магнитного поля, обеспечивающая приход частиц в точку регистрации с противоположной от Солнца стороны

определять анизотропию потока СКЛ в этих двух направлениях. После вспышки 1 августа 1967 года, произошедшей в западной части диска Солнца, в течение 16 часов наблюдалась положительная анизотропия 96%. Обратный поток повторял форму потока от Солнца, но отставал по времени, что указывало на групповое отражение от некоторого зеркала, расположенного за детектором.

Спустя шесть лет, в сентябре 1973 года, на АМС «МАРС-4, -5, -7» была более детально изучена аналогичная ситуация (Вернов С.Н. и др., 1976). После вспышки на Солнце наблюдалась длительная высокая знакопеременная анизотропия потока частиц. Это было интерпретировано как доказательство существования корональных и межпланетных петель (до 6 а.е.) магнитного поля, соединяющих активные области обоих полушарий Солнца (рисунок 3). Похожие случаи наблюдались и интерпретировались нами по данным других АМС.

Для интерпретации вспыхивающих возрастных СКЛ, особенно со сложным временным профилем, наблюдавшихся на различных АМС, в 1988 году в НИИЯФ МГУ была предложена расчётная эмпирическая «отражательная» модель коронального и межпланетного распространения СКЛ, основывающаяся на представлении о петлевых магнитных ловушках в короне и межпланетной среде (Любимов Г.П., 1988).

По результатам анализа информации прибора НИИЯФ МГУ на АМС «ВЕНЕРА-4» впервые было обнаружено ещё одно важное явление: торможение в межпланетной среде выбросов плазмы с ударными волнами, возникающими в солнечном ветре при вспышках на Солнце. При анализе использовал-

ся факт некоторого понижения интенсивности ГКЛ в области ударных волн (т.н. форбуш-понижение), регистрируемого прибором. Аналогично вели себя и наземные приборы. По трём временным меткам (на Солнце – начало движения ударной волны, в точке расположения АМС и на Земле) при регистрации форбуш-понижений были определены средние скорости ударных волн на двух отрезках: Солнце – АМС, АМС – Земля. Скорость на первом участке всегда была больше, т.е. по мере движения от Солнца вспыхивающие ударные волны замедлялись (Любимов Г.П., 1968), см. рисунок 4.

Особую ценность имеет информация, поступающая одновременно с однотипной аппаратуры, установленной на КА, которые находятся в различных точках межпланетного пространства. Одновременные измерения одного и того же явления, например потоков космических частиц от солнечной вспышки, позволяют разделять и изучать пространственные и временные эффекты и тем самым исследовать физические явления в межпланетной среде – генерацию и транспорт энергичных частиц во время солнечных активных процессов. Так, например, максимальная величина возрастных интенсивности потоков протонов от солнечных вспышек в июле 1985 года, наблюдавшихся на высокоапогейных ИСЗ «ПРОГНОЗ-10» и АМС «ВЕГА-1, -2», различалась на два порядка при различии долготных углов этих КА относительно положения активной области на Солнце всего на 50 градусов, что говорит о резких пространственных границах потоков вспыхивающих частиц (Любимов Г.П. и др., 2003). Ещё один пример из сравнения информации патрульного

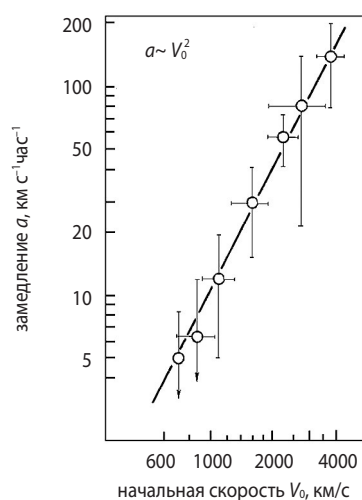


рисунок 4. Торможение ударных волн и вспыхивающих выбросов плазмы в межпланетной среде

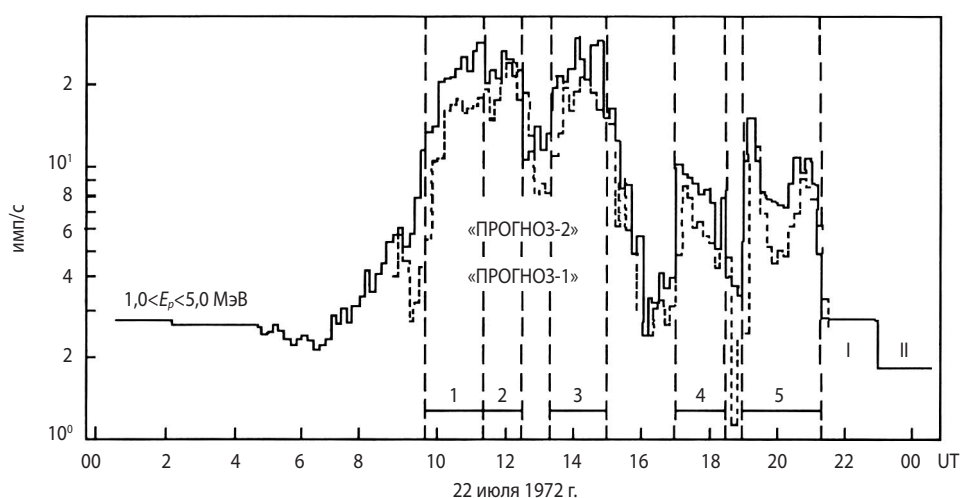


рисунок 5. Пример регистрации на ИСЗ «ПРОГНОЗ-1, -2» структуры потоков солнечных протонов с энергиями 1–5 МэВ

дозиметра НИИЯФ МГУ на самоходном лунном аппарате «ЛУНОХОД-1» во время второго лунного дня и на АМС «ВЕНЕРА-7»: максимум большого возрастания интенсивности СКЛ, заполнивших ловушку на фронте ударной волны, наблюдался на «ВЕНЕРЕ-7» 12 декабря 1970 года на 17 часов раньше, чем на «ЛУНОХОДЕ-1», что соответствовало расстоянию между КА около 60 млн. км.

Следует отметить большую роль ИСЗ серии «ПРОГНОЗ», также созданных в НПОЛ, в разностороннем изучении солнечных вспышек. Спутники имели высокоапогейные орбиты, что давало возможность проводить изучение физических характеристик солнечной плазмы, частиц СКЛ, межпланетного магнитного поля на апогейных участках траектории, не возмущённых земной магнитосферой, и длительную регистрацию электромагнитного излучения Солнца, а на перигейных участках – изучение процессов, происходящих внутри магнитосферы и на её границе. Только приборов НИИЯФ МГУ на первых спутниках «ПРОГНОЗ» насчитывалось более десяти. В НПОЛ с 1972 по 1985 годы было осуществлено десять успешных запусков ИСЗ серии «ПРОГНОЗ» с аппаратурой НИИЯФ МГУ, что позволило охватить наблюдениями 11-летний цикл активности Солнца. Подобную орбиту имел и ИСЗ «ГРАНАТ», который относится к наиболее успешным проектам, реализованным НПОЛ.

Тонкая структура магнитного поля межпланетного пространства и связанных с ним потоков частиц прослеживается по данным измерений солнечных частиц в июле 1972 года, одновременно находящихся в полёте двух ИСЗ – «ПРОГНОЗ-1» и «ПРОГНОЗ-2» (рисунок 5).

На рисунке видна сильно изрезанная картина потоков частиц, которые в пространстве, по-видимому, занимают отдельные рукава. Такая структурность на одном спутнике полностью повторялась спустя десять минут на втором. Это означает, что имеющаяся сложная структура стационарна и вращается вместе с Солнцем (*Morosova T.I. et al., 1976*).

С помощью этих спутников было показано, что Солнце во время вспышек всегда ускоряет не только электроны, но и протоны, причём их спектр по кинетическим энергиям почти одинаков. Тем самым термин «электронные вспышки» был исключён из научного обихода. Была обнаружена необычная мода (названная когерентной) быстрого распространения электронов: в узком интервале углов вблизи силовой линии, связанной с областью вспышки, электроны распространяются практически без рассеяния на большей части пути от Солнца к Земле. Такая же мода наблюдалась для протонов (*Kurt V.G. et al., 1977*).

Перспективным направлением для решения многих научных и прикладных задач в настоящее время

является использование малых космических аппаратов (МКА). К достоинствам этого подхода следует отнести сравнительно низкую стоимость создания и выведения на орбиту МКА более лёгкими ракетами-носителями, относительную простоту конструкции, высокую надёжность и др. В НПОЛ разработана малоразмерная унифицированная платформа «Карат», на базе которой в рамках программы «Малые космические аппараты для фундаментальных космических исследований» (МКА-ФКИ) учёными НИИЯФ МГУ в кооперации с отечественными и иностранными партнёрами был создан комплекс научной аппаратуры «РЭЛЕК» (Релятивистские ЭЛЕКТроны) (*Хартов В.В., 2015*). Спутник, которому было присвоено имя «ВЕРНОВ» в честь выдающегося советского учёного, с этой аппаратурой выведен на полярную орбиту Земли 8 июля 2014 года.

В ходе наблюдений было зарегистрировано несколько гамма-всплесков земного происхождения, так как они наблюдаются в основном над областями активного грозообразования, т.е. в приэкваториальных регионах. Большинство возрастаний интенсивности гамма-излучения в полярных областях были имитациями всплесков тяжёлыми заряженными частицами космических лучей, и только одно, зарегистрированное 22.11.14 в 05:05:03 UT, может рассматриваться как кандидат в гамма-всплески галактического происхождения. Это событие наблюдалось над Антарктидой. Однозначно определить природу события пока не удалось, но оно заслуживает внимания и требует дальнейших исследований.

По данным спутника «ВЕРНОВ» с помощью прибора ДУФ (детектор ультрафиолетового (УФ) излучения) было зарегистрировано более 8500 УФ-вспышек из атмосферы Земли – транзитных атмосферных явлений (*Klimov P.A. et al., 2017*). Большинство событий наблюдается над континентами вблизи экватора, т.е. они генетически связаны с самыми активными грозовыми областями, хотя встречаются события и над океанами, и на высоких широтах (рисунок 6).

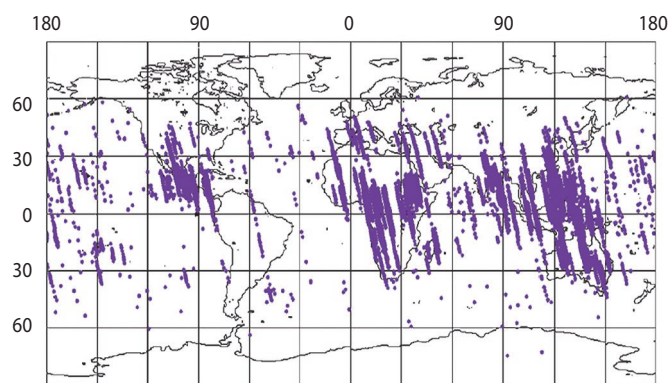
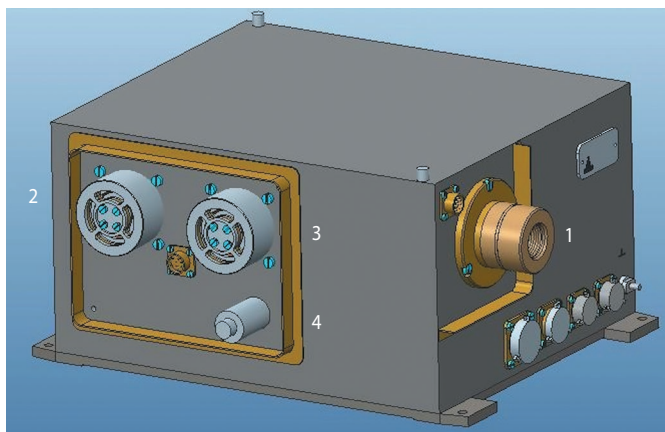


рисунок 6. Географическое распределение ТАЯ по данным спутника «ВЕРНОВ»



1 – спектрометр энергичной космической радиации;
2, 3 – спектрометры электронов и протонов горячей магнитосферной плазмы;
4 – торцовый интегральный счётчик.

рисунок 7. Прибор СКИФ

В ходе наблюдений были зарегистрированы вспышки, не связанные с грозовой активностью (внегрозовые события), доля которых может достигать 10–20% от регистрируемых УФ-всплесков. Наблюдение внегрозовых событий является, по-видимому, одним из наиболее важных результатов, полученных на спутнике «ВЕРНОВ».

Один из важных результатов экспериментов на спутнике «ВЕРНОВ» состоял в изучении вариаций потоков и спектров релятивистских и субрелятивистских электронов в КП. Понимание механизмов таких вариаций на сегодняшний день остаётся одной из наиболее актуальных проблем космической погоды.

Для глобального непрерывного мониторинга радиационных полей в КП в НИИЯФ МГУ разработан спутниковый прибор СКИФ – спектрометр космических излучений, который является унифицированным прибором для различных КА и предназначен для измерений энергетических спектров потоков, временных вариаций и углового распределения протонов и электронов в широких интервалах энергий от горячей магнитосферной плазмы до сотен МэВ (рисунок 7).

Одновременная регистрация потоков частиц широкого энергетического спектра является наиболее востребованным средством наблюдения радиационной обстановки, позволяющим изучать кратко- и средневременную динамику радиационных поясов Земли, её связь с солнечной активностью. Картина становится более полной с привлечением информации идентичных измерительных приборов с КА, выводимых на орбиты с широким диапазоном высот.

Прибор СКИФ функционирует в составе гелио-геофизических аппаратурных комплексов (ГТАК) на борту КА «МЕТЕОР-М» (околополярная, солнечно-синхронная, низкая круговая орбиты), а также на группировках КА разработки НПОЛ: КА «ЭЛЕКТРО-Л» (геостационарная орбита) и КА «АРКТИКА-М» (высокоэллиптическая орбита типа «МОЛНИЯ»). Информация приборов анализируется. Оперативная информация с КА служит для обеспечения Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с целью анализа и прогноза гелиогеофизической обстановки в ОКП.

Существует ряд причин, вызывающих необходимость регулярного пересмотра используемых методов защиты оборудования и аппаратуры КА от воздействия факторов космической среды, приводящих к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической радиации, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем. В связи с резко возросшим вниманием к радиационным одиночным эффектам (сбоям и отказам) в микросхемах бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при воздействии тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) космического излучения, начиная с 90-х годов основным направлением исследований стали вопросы исследования механизма возникновения этих эффектов и их прогнозирования в РЭА. В результате этих исследований в НИИЯФ МГУ была разработана модель, учитывающая прямой механизм возникновения одиночных эффектов от ТЗЧ и ядерный механизм их возникновения от высокоэнергетических протонов КП (Кузнецов Н.В. и др., 2000). На базе компьютерных технологий в НИИЯФ МГУ стала разрабатываться расчётная методика прогнозирования радиационной опасности на КА, которая объединила модель одиночных эффектов с моделями потоков заряженных частиц КП и моделями проникновения частиц за защиту (Баширов В.Ф. и др., 1999).

Специалисты НПОЛ и НИИЯФ МГУ объединили усилия для разработки программного комплекса (ПК), который мог бы использоваться при проектировании аппаратуры КА.

Такой ПК, названный SEREIS, созданный специалистами НИИЯФ МГУ в 1998 году, был использован для прогнозирования радиационных условий и радиационных эффектов на КА, проектируемых в НПОЛ. На его основе в последующие годы была создана более совершенная версия, получившая название COSRAD (Кузнецов Н.В. и др., 2011).

В настоящее время используется усовершенствованная версия COSRAD (2016). Расчёты с её использованием легли в основу важного стандарта ГК «Роскосмос» ОСТ 134-1044-2007-изменение 1.

Одновременно специалисты НПОЛ одними из первых в России создали программный комплекс (ПК), рассчитывающий локальные поглощённые и эквивалентные дозы в любом месте КА с применением его компьютерной 3D-модели, выполненной в технологии САПР, и использующий в качестве исходных данных модели НИИЯФ МГУ (Пичхадзе К.М. и др., 2006; Хамидуллина Н.М., 2008). В 2022 году была создана модифицированная версия «LocalDose&SEE»v.2 (Власенков Е.В., 2022), позволяющая рассчитывать вклад в дозу от бортовых радиоизотопных источников тепла и электроэнергии, а также характеристики неионизационных процессов – структурных повреждений.

Для расчёта радиационных условий полёта КА на сложных эволюционирующих околоземных орбитах в НПОЛ был создан ПК «FD-ORBIT_ERB», а позже – усовершенствованный «FD-ORBIT2» (Артемьев М.Е., 2010), в котором использованы модели потоков частиц ГКЛ и СКЛ, разработанные в НИИЯФ МГУ.

Творческое сотрудничество коллективов НПОЛ и НИИЯФ МГУ выдержало испытание временем и продолжается поныне. И нет сомнения в том, что университетские учёные и специалисты НПОЛ и в дальнейшем будут вносить достойный вклад в изучение и освоение Космоса.

список литературы

Артемьев М.Е. Расчет радиационных условий для сложной эволюционирующей орбиты КА в радиационных поясах Земли // Полет. 2010. № 8. С. 22-25.

Баширов В.Ф., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А. Оценка интенсивности одиночных сбоев микросхем на космических аппаратах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационное воздействие на радиоэлектронную аппаратуру. 1999. Вып. 1-2. С. 142-145.

Вернов С.Н., Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И. и др. Измерение интенсивности проникающего излучения на поверхности Луны // Доклады АН СССР. 1966. Т. 169, № 5. С. 1044-1047.

Вернов С.Н., Контор Н.Н., Любимов Г.П. и др. Об аномальной анизотропии потока солнечных космических лучей в сентябре 1973 г. // Космические исследования. 1976. Т. 14, вып. 2. С. 239-247.

Власенков Е.В. Программная реализация методики расчета локальных поглощенных доз и доз структурных повреждений в аппаратуре КА с учетом влияния бортовых радиоизотопных источников // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика ради-

ационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2022. Вып. 3. С. 20-27.

Ефанов В.В., Долгополов В.П. Луна. От исследования к освоению (к 50-летию космических аппаратов «ЛУНА-9» и «ЛУНА-10») // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 3-8.

Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Николаева Н.И., Ныммик Р.А. и др. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2. С. 72-78.

Кузнецов Н.В., Панасюк М.И., Ныммик Р.А. Одиночные сбои цифровых интегральных микросхем в бортовой микроэлектронике // Новые наукоемкие технологии в технике. 2000. Т. 16. С. 206-237.

Логачев Ю.И. Исследования космоса в НИИЯФ МГУ. Первые 50 лет космической эры. М.: ООО Изд-во «КДУ», 2007. 176 с.

Любимов Г.П. Замедление ударных волн от солнечных вспышек в космическом пространстве // Астрономический циркуляр АН СССР. 1968. № 488. С. 4-7.

Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // Астрономический циркуляр АН СССР. 1988. № 1531. С. 19-20.

Любимов Г.П., Тулунов В.И. Серия протонных вспышек в июле 1985 г. по наблюдениям на ИСЗ «ПРОГНОЗ-10» и АМС «ВЕГА-1, -2» // Космические исследования. 2003. Т. 41, № 1. С. 23-32.

Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефирова И.В. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата // Космические исследования. 2006. Т. 44, № 2. С. 179-182.

Хамидуллина Н.М. Расчет радиационных характеристик бортовой аппаратуры с использованием трехмерной модели КА // Полет. 2008. № 10. С. 49-55.

Хартон В.В. От исследования к освоению ресурсов Луны. Вчера и завтра (к 50-летию космической деятельности НПО имени С.А. Лавочкина) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 3. С. 8-13.

Klimov P. et al. Vernov satellite data of transient atmospheric events // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2017. Vol. 56, № 8. С. 2189-2201.

Kurt V.G., Logachev Yu.I., Pissarenko N.F. Coherent propagation of non-relativistic solar electrons // Solar Phys. 1977. vol. 53, № 1. p. 157-178.

Morosova T.I., Pissarenko N.F., Kurt V.G., Kolesov G.A. et.al. Generation and propagation of energetic solar particles in the solar events of July 22, 1972 // Space Research. 1976. vol. 16. P. 775.

Статья поступила в редакцию 28.11.2024

Статья после доработки 29.11.2024

Статья принята к публикации 29.11.2024