

### **Введение**

Космическая физика – наука, изучающая электромагнитные и радиационные поля в межпланетном космическом пространстве и вблизи планет, процессы ускорения и источники корпускулярного излучения и плазмы в космическом пространстве, а также влияние солнечных излучений на околопланетные пространства и физические процессы на самих планетах. Поскольку её объектом изучения являются физические процессы во Вселенной, космическую физику можно рассматривать как одно из направлений астрофизики.

У истоков космической физики стояли двое выдающихся учёных – Сергей Николаевич Вернов и Джеймс Ван-Аллен – специалисты в области космических лучей. Еще в «доспутниковую эру», они осуществляли свои эксперименты по изучению космических частиц на земле, шарах-зондах и ракетах. С появлением возможности проведения экспериментов в космосе они независимо друг от друга и практически одновременно предложили установить свои приборы на первых спутниках. Возникновение космической физики как отдельного направления в науке связано, безусловно, с запуском первых спутников в Советском Союзе и США. Однако её основы и у нас, и в США были заложены задолго до первого искусственного спутника Земли, запущенного в Советском Союзе 4 октября 1957 г.

### **1. От шаров-зондов к первым экспериментам в космосе**

В середине 30-х годов С.Н. Вернов (рис. 1) предложил использовать шары-зонды для дистанционного изучения космических лучей в стратосфере. Эти эксперименты были первыми в нашей стране по исследованию процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли. Они проводились с помощью ионизационных камер, установленных на шарах-зондах. Их результатом стало доказательство существования электронно-ядерного ливня вторичных частиц космических лучей, рождающихся в атмосфере (С.Н. Вернов и др., 1949).

Однако до конца 40-х годов природа самого первичного космического излучения оставалась невыясненной. И здесь стратосферные исследования лучей (они проводились на судне «Витязь» в 1949 г.) сыграли выдающуюся роль. С помощью оригинального прибора на основе счётчиков Гейгера, разработанного под руководством Н.Л. Григорова, были выполнены ряд экспериментов, которые способствовали выяснению природы первичного космического излучения (рис. 2). Было обнаружено, что основная компонента космических лучей в окрестности нашей планеты – протоны.



Рис. 1. Сергей Николаевич Вернов

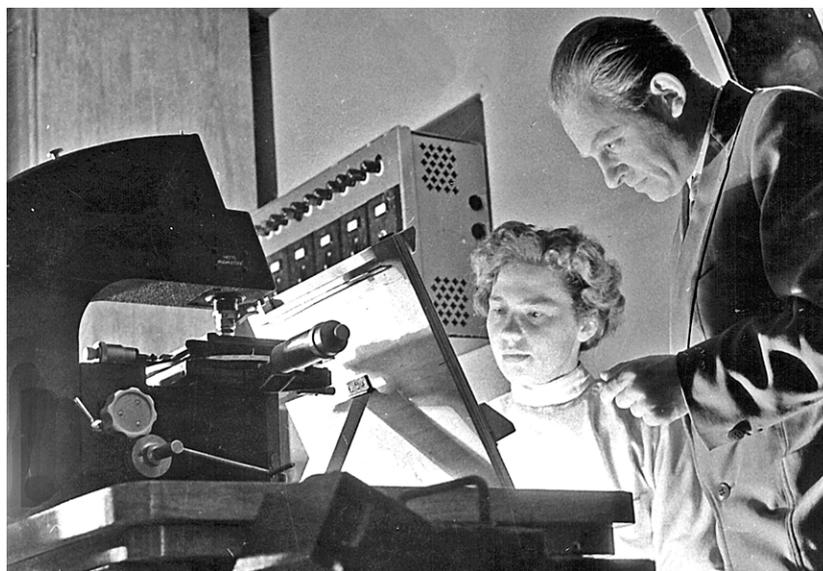


Рис. 2. Наум Леонидович Григоров и  
Алла Ивановна Савельева

Другой важной проблемой изучения природы первичных космических лучей в те годы было определение их энергии. Идею метода измерения энергии космических лучей подсказал сам процесс взаимодействия первичных частиц с атмосферой и рождение ими каскада вторичных частиц, открытый Д.В. Скобельцыным в 1936 г. (рис. 3). Эту идею реализовали Н.Л. Григоров, В.С. Мурзин и И.Д. Рапопорт в 1958 г., создав ионизационный калориметр. Калориметр сыграл революционную роль не только в физике космических лучей, но, впоследствии, и в ускорительной физике высоких энергий.

Применение ионизационного калориметра началось с отечественных исследований космических лучей в горах Кавказа и Памира и на многие годы определило направление экспериментальных исследований. Уже первые эксперименты на горе Арагац дали оценки спектра одиночных адронов в области энергий 1–10 ТэВ и показателя их интегрального спектра. Возможность создания установок большой светосилы с использованием метода ионизационного калориметра открыло большие возможности исследования природы первичных космических лучей. Однако для этого установки необходимо запускать на

такие высоты, где влияние атмосферы уже не может сказываться на изменении состава и энергетического спектра первичных частиц. Эти возможности появились позже, с началом космической эры и развитием техники высотных аэростатов и ракет. В 1946 г. С.Н. Вернов с А.Е. Чудаковым начинают исследовать состав космических лучей на ракетах на полигоне Капустин Яр.



Рис. 3. Дмитрий Владимирович Скобельцын

Итак, «доспутниковый» период исследования космических лучей привел к пониманию природы вторичной компоненты, рождающейся в атмосфере, определению основной компоненты – протонной – первичных частиц, а также к первым оценкам формы спектра первичного космического излучения. Эти результаты были получены, в основном, с помощью ионизационных камер, счётчиков Гейгера–Мюллера, фотоэмульсий и ионизационных калориметров. Именно эти детекторы составляли экспериментальную базу учёных до запуска первых спутников.

Программа запуска первых спутников предполагала проведение научных экспериментов на их борту. Учёные-космики, по сравнению с другими специалистами, были, пожалуй, наиболее подготовлены к началу проведения экспериментов в космическом пространстве. Во-первых, у них была строго обоснованная научная идея – необходимость продолжения исследования космических лучей за пределами атмосферы с целью выяснения природы космических лучей – их энергии и состава. Во-вторых, имелась отработанная в наземных условиях и в стратосферных исследованиях экспериментальная техника.

Постановка первого космического эксперимента оказалась возможной на 2-ом спутнике, запущенном в ноябре 1957 г. Ограниченные возможности по весам и габаритам позволили установить на его борту лишь газоразрядные счётчики Гейгера-Мюллера. Аналогичным путём пошли и американские учёные: на борту первого американского спутника «Explorer-1» также были установлены такие же счётчики. Более масштабный эксперимент с применением различных типов детекторов был осуществлён позднее на 3-м советском ИСЗ.

Результаты, полученные на первых спутниках, были неожиданными и уже в 1958 г. привели к первому выдающемуся открытию в космосе – обнаружению радиационных поясов Земли. По сути, оказалось, что учёные, ставя перед собой цель – продолжение исследований космических лучей за пределами атмосферы, столкнулись с новым природным феноменом – захватом и ускорением частиц в магнитном поле Земли.

## 2. Первое открытие в космосе – радиационные пояса Земли

Путь к этому открытию был краток и драматичен. В ноябре 1957 г. в Советском Союзе и в январе-феврале 1958 г. в США получили первую информация с околоземных орбит, но ни С.Н. Вернов, ни Дж. Ван-Аллен со своими сотрудниками не смогли на основе первых экспериментов дать правильную физическую интерпретацию наблюдаемого явления. Тем не менее, к середине 1958 г., т.е. спустя всего несколько месяцев после начала космических экспериментов, понимание физики нового явления стало более ясным.

Существенную и принципиальную роль для выяснения природы открытого феномена сыграл эксперимент именно на 3-м советском спутнике, запущенном 15 мая 1958 г. В составе довольно разнообразной аппаратуры НИИЯФ МГУ на этом спутнике был сцинтилляционный детектор. Информация с этого детектора позволила установить существование двух пространственно-разделённых областей в околоземном пространстве – внешний электронный пояс, заполненный электронами с энергией  $\sim 100$  кэВ и выше и внутренний, протонный. Энергия протонов внутреннего пояса была существенно выше ( $\sim 100$  МэВ), чем электронов во внешнем. Помимо этого, была обнаружена высотная зависимость потоков, свидетельствующая о захвате частиц в магнитной ловушке (рис. 4).

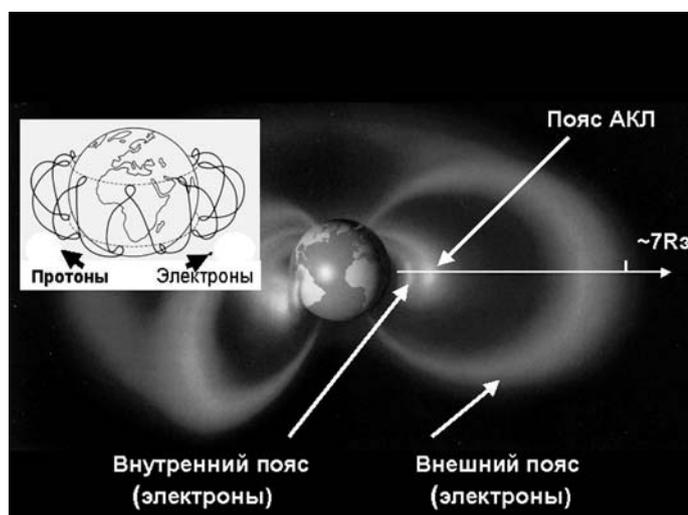


Рис. 4. Радиационные пояса Земли. Показаны внутренний и внешние электронные пояса Земли, а также пояс, образованный аномальной компонентой космических лучей

Американские учёные не могли регистрировать частицы внешней зоны радиации из-за особенностей орбит своих спутников. Сейчас очевидно, что первые советские и американские эксперименты в космосе взаимно дополняли друг друга. Однако, в силу специфики международных отношений той эпохи, говорить о международной кооперации не приходилось, и космическая физика рождалась в условиях острой конкурентной борьбы между учёными двух супердержав.

К середине 1958 г. стало очевидной суть первого открытия, сделанного с помощью первых космических аппаратов. Пояса радиации, окружающие Землю, состоят из протонов и электронов в широком энергетическом диапазоне. Расчёты показывали, что это стабильное образование: времена жизни частиц во внутреннем поясе могли достигать десятков лет. Предстояло понять природу этих частиц – их источники и механизмы ускорения. На это ушли последующие 20–30 лет. Однако, первая модель, предлагавшая механизм образования частиц радиационных поясов, появилась практически сразу после их открытия. Это механизм образования вторичных энергичных протонов при распаде

нейтронов альbedo, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. Авторами этой модели были С.Н. Вернов и А.И. Лебединский (1958). Интересно заметить, что практически одновременно и независимо этот механизм формирования внутреннего радиационного пояса предложил американец Ф. Зингер (F. Singer).

Механизм распада нейтронов альbedo позволил объяснить существование протонов высокой энергии (и, как оказалось впоследствии, и электронов) во внутреннем поясе, вблизи Земли, и в ограниченном интервале энергий, определяемом энергией альбедных нейтронов. Предстояло определить механизмы заполнения частицами и внешней зоны радиации.

Итак, начало космических исследований в космосе привело к первому выдающемуся результату в области физики околоземного пространства – открытию радиационных поясов и, по сути, дало начало новой науке – космической физике.

Этот этап отечественных исследований радиационных поясов завершился полётами автоматических станций к Луне. С помощью установленной на них аппаратуры института удалось получить полную пространственную картину радиационных поясов. Кроме этого, были также обнаружены временные изменения внешней зоны радиации, предопределившие в дальнейшем одно из обширных направлений физики радиационных поясов, – изучение их динамики в зависимости от солнечной и геомагнитной активности.

1957 г. можно считать точкой отсчёта для космической физики как нового направления научных исследований в НИИЯФ МГУ. Впоследствии оно стало одним из основных и принесло институту заслуженную известность в научном мире.

В этот период в институте начал формироваться коллектив учёных-космофизиков, у истоков которого стояли С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков, П.В. Вакулов, Е.В. Горчаков, А.И. Лебединский и Ю.И. Логачёв. А уже к началу 60-х годов, благодаря усилиям С.Н. Вернова, в институте были созданы два сильных научных коллектива – опытно-конструкторская лаборатория (ОКЛ), возглавляемая А.Г. Николаевым, и лаборатория космофизических исследований (ЛКФИ) под руководством И.А. Савенко.

После первых экспериментов в космосе начался этап систематического исследования радиационных поясов и магнитосферы Земли.

### **3. Структура радиационных поясов и модель радиальной диффузии**

Уже первые исследования открытого природного феномена – радиационных поясов – показали существования в нём временных и пространственных вариаций потоков частиц. Возникал вопрос, какого типа эти вариации, насколько устойчивыми образованиями являются радиационные пояса и как изменяются их характеристики в зависимости от солнечной активности. Первые эксперименты проводились в максимуме цикла солнечной активности, поэтому вопрос об их стабильности в течение всего цикла оставался открытым.

Спутники серии «Электрон», запущенные в 1964 г. с установленной на их борту научной аппаратуры НИИЯФ МГУ, сыграли большую роль в систематизации знаний о структуре и динамике захваченной радиации. Благодаря удачно выбранным орбитам этих спутников и составу размещённой на них аппаратуры, была впервые изучена практически вся область радиационных поясов: энергетические и пространственные распределения протонов и электронов в широком диапазоне энергий, а также их временные вариации. Именно эти данные послужили основой при разработке отечественных моделей околоземной радиации, вошедших в ряд нормативных документов космической промышленности, а также в первое и последующие издания «Модели космоса» – сборника, издававшегося в течение многих лет под руководством С.Н. Вернова.

Результаты спутников «Электрон» стали существенным вкладом отечественной космофизики в мировые знания о радиационных поясах Земли.

Итогом исследований радиационных поясов в 60-х годах стало, пожалуй, окончательное понимание их структуры: оказалось, что пояса, по сути, – единое образование захваченных в магнитное поле заряженных частиц (в основном, протонов и электронов), имеющих очень большой диапазон энергий – до нескольких МэВ для электронов и сотен МэВ для протонов. При этом верхняя граница энергии захваченных протонов совпадает с энергией галактических космических лучей в максимуме их интенсивности. Различие в пространственной структуре протонных и электронных радиационных поясов состояло, по сути, в существовании зазора – локального понижения потоков частиц на расстоянии 2–3-х радиусов Земли в экваториальной плоскости. С точки зрения теоретической модели (см. ниже) оказалось, что зазор – это область доминирования потерь электронной компоненты. Однако, помимо определения механизмов потерь частиц в поясах, модель их формирования должна давать ответ на вопрос, каким образом захваченные частицы приобретают столь значительные энергии.

Первый механизм образования радиационных поясов за счёт нейтронов альbedo космических лучей, предложенный С.Н. Верновым и А.И. Лебединским мог объяснить существование только внутренней зоны захваченной радиации – протонов с энергиями в десятки МэВ и более и электронов до 1 МэВ. Вопрос об ускорителе всех остальных частиц, по сути основной доли радиационных поясов – оставался открытым.

Теоретическая модель, объясняющая практически всю пространственно-энергетическую структуру радиационных поясов, была создана к середине 60-х годов. В основу её был положен диффузионный механизм переноса частиц внутрь магнитного поля под действием флуктуаций электрических и магнитных полей в околоземном пространстве. Насколько продуктивен был этот подход, можно судить по тому, что радиальная диффузия частиц по сей день рассматривается в качестве основополагающего механизма для объяснения экспериментально наблюдаемых пространственных и энергетических распределений захваченных частиц внутри магнитной ловушки.

Радиальный перенос частиц вызывается флуктуациями электрических и магнитных полей в магнитосфере, а сами флуктуации – изменениями давления солнечного ветра. Частицы, перемещаясь в ловушке внутрь поперёк силовых линий магнитного поля, увеличивают свою энергию посредством бетатронного механизма ускорения при сохранении магнитного момента частиц – первого адиабатического инварианта. Таким образом, частицы из хвоста магнитосферы, который может служить своеобразным резервуаром – накопителем частиц – солнечного ветра, попадают внутрь магнитной ловушки, где в процессе переноса ускоряются.

Впервые идею диффузии частиц внутри магнитной ловушки при возмущениях магнитного поля типа внезапных импульсов высказал Е. Паркер (E. Parker). В дальнейшем этот механизм был развит в работах нескольких авторов. Среди этих работ выделялась модель, разработанная Б.А. Тверским (рис. 5). Она дала хорошее количественное согласие с экспериментом и позволила объяснить многие характеристики пространственно-энергетической структуры как протонных, так и электронных радиационных поясов. Существенным отличием модели Б.А. Тверского от других было утверждение о преимущественной реализации механизма радиальной диффузии под действием только флуктуаций магнитного поля и правильной оценки коэффициента диффузии из анализа частоты и амплитуды возмущений магнитного поля типа внезапных импульсов. Первые публикации Б.А. Тверского на эту тему пришлось на 1964–1965 гг., опередив публикации зарубежных авторов по количественным моделям радиальной диффузии частиц радиационных поясов, основной парадигмой которых являлось утверждение о совокупном действии как флуктуаций крупномасштабного электрического поля внутри магнитосферы, так и самого магнитного поля.

Важными экспериментальными доказательствами в пользу модели Б.А. Тверского послужили данные спутников «Электрон» (см. ниже). Пространственное распределение протонов разных энергий, полученные в эксперименте на этих и других спутниках, дали хорошее согласие с моделью Б.А. Тверского – радиальной диффузии частиц, возникающей при магнитных флуктуациях. Кроме этого, параметры диффузионных волн электронов (радиальные смещения профиля потоков электронов к Земле после магнитных бурь), обнаруженные в экспериментах на спутниках «Электрон», согласовывались с коэффициентом магнитной диффузии, предложенной Б.А. Тверским. Тем не менее, в ряде работ зарубежных авторов, опубликованных в эти годы, многие экспериментальные данные согласовывались и с моделью «симбиозного» воздействия флуктуаций электрического и магнитного полей.



Рис. 5. Борис Аркадьевич  
Тверской

Противоречивая ситуация разрешилась к середине 80-х годов, когда после проведения серии экспериментов в космосе с целевой направленностью изучения именно радиационных поясов, появилось достаточно много экспериментальных данных не только о протонах и электронах, но и о более тяжёлых ионах. Здесь следует упомянуть о долговременной программе исследований радиационных поясов на спутниках серии «Молния», инициатором которых был С.Н. Вернов. Эти эксперименты, под руководством Э.Н. Сосновца, осуществлявшиеся в течение 70-х годов, дали ряд новых результатов не только по структуре поясов, но и по их динамике. Эксперименты на спутниках «Молния» были началом создания в НИИЯФ МГУ системы глобального радиационного мониторинга околоземного пространства,

которая в дальнейшем получила развитие с использованием и других спутников: «ГЛОНАСС», «Космос», «Горизонт» и др.

В составе солнечного ветра наряду с протонами имеются гелий, углерод, кислород и более тяжёлые элементы. Их относительные концентрации не превышают нескольких процентов (для гелия) и ещё меньших значений для более тяжёлых частиц. Несмотря на это, изучение тяжёлых ионов имеет существенное значение для физики радиационных поясов, т.к. оно позволяет более углублённо провести тесты различных моделей формирования поясов радиации, чем анализ лишь протонной и электронной компонент. Это связано с тем, что коэффициенты переноса в моделях в общем виде могут зависеть как от энергии, так и от типа частиц (т.е. её массы и заряда). В этом смысле тяжёлые ионы – чрезвычайно полезный инструмент для верификации различных моделей. Кроме этого, они – своеобразный индикатор источника частиц. Например, присутствие углерода или многозарядных тяжёлых ионов – служит достаточно убедительным доказательством в пользу солнечного ветра, как источника захваченных частиц.

Проведение экспериментов стало возможным, начиная с середины 70-х годов. Первый эксперимент по изучению энергичных тяжёлых ионов в радиационных поясах был осуществлен автором этой статьи с сотрудниками на спутнике «Молния-2». Этот эксперимент, наряду с рядом другими, позволил построить пространственно-энергетическую структуру экваториальных ионных поясов, которая и послужила тестом для проверки различных моделей радиальной диффузии. Все эти эксперименты, наряду с зарубежными, и определили базы данных о структуре радиационных поясов, позволивших установить границы применимости различных моделей радиальной диффузии.

Оказалось, что «магнитная диффузия» (перенос частиц под действием флуктуаций магнитного поля) с коэффициентом диффузии, предложенным Б.А. Тверским, описывает большую часть пространственно-энергетической структуры радиационных поясов. Флуктуации магнитосферного электростатического поля также «принимают участие» в формировании поясов радиации. Однако эффективность их воздействия ограничивается лишь малыми энергиями частиц (менее сотен кэВ) и, возможно, внутренней зоной радиации в области энергий более нескольких МэВ (М.И. Панасюк, 1984).

Таковы в основном были наши знания о радиационных поясах к середине 80-х годов, имеющие свою актуальность и по сей день. Напомним их важнейшие моменты:

1. Радиационные пояса состоят из электронов, протонов (основные компоненты) с относительно небольшой «добавкой» тяжёлых ионов.

2. Механизмами их формирования является радиальная диффузия под действием флуктуаций как магнитных, так и электрических полей в магнитосфере и распад нейтронов альbedo космических лучей. Магнитная диффузия играет доминирующую роль в радиальном переносе частиц. Распад нейтронов альbedo обеспечивает заполнение высокоэнергичными протонами внутренней зоны захваченной радиации.

3. Источниками частиц радиационных поясов являются космические лучи (внутренняя зона радиации) и плазма солнечного ветра, инжектируемая из хвоста магнитосферы внутрь области захвата.

Существенный прогресс в понимание структуры радиационных поясов Земли внесли работы С.Н. Кузнецова и В.Д. Ильина, связанные с количественной оценкой предела адиабатического движения частиц в геомагнитном поле согласно критерию Альвена. В них был выявлен механизм формирования внешних границ захваченных частиц в ловушке не только в спокойные, но и в магнитно-возмущённые периоды времени. В дальнейшем количественная оценка предела адиабатичности движения частиц оказалась решающей в определении природы захваченных тяжёлых ионов в радиационных поясах. Оказалось, что зарядовые состояния энергичных ионов (МэВ-ных энергий) таких элементов, как кислород, углерод, железо, населяющих радиационные пояса, близки к наблюдаемым для солнечной плазмы энергетичных частиц (т.е. многократно-заряжённым). Это было свидетельством в пользу солнечного происхождения захваченных частиц.

Исследования тяжёлых ионов в радиационных поясах позволили обнаружить ещё один механизм их формирования. Было обнаружено, что протоны внутренней зоны радиации внутри конуса потерь (в районе Южно-Атлантической аномалии), в результате взаимодействия с атомами атмосферы создают новые вторичные частицы (например, гелий). Последние, оказавшись в ловушке, образуют дополнительный (к основному, созданному радиальным переносом частиц к Земле) пояс захваченных частиц. Это явление впервые было обнаружено в эксперименте на низковысотном спутнике «Интеркосмос 17» (С.Н. Кузнецов и др., 1981).

Важным для понимания физики радиационных поясов явилось также обнаружение в начале 90-х гг. нового радиационного пояса, состоящего из частиц аномальной компоненты космических лучей (Н.Л. Григоров, М.И. Панасюк и др., 1991). Оказалось, что однократно-заряженные ионы кислорода и других элементов, входящих в состав аномальной компоненты, после перезарядки в верхних слоях атмосферы могут захватываться на устойчивые орбиты, образуя популяцию частиц, состоящую из вещества ближней межзвездной среды.

#### **4. Кольцевой ток и модель магнитосферной бури**

С самого начала исследований радиационных поясов плазма солнечного ветра, проникающая внутрь магнитосферы, рассматривалась в качестве основного «материала»,

пополняющего их. Полностью подтвердить или опровергнуть эту гипотезу могли лишь прямые эксперименты в космосе по измерению ионного состава частиц радиационных поясов. Существовала и ещё одна проблема, вплотную примыкающая к физике околоземной плазмы и энергичных частиц – механизм генерации магнитных бурь. Задолго до начала космических исследований А. Десслер (A. Dessler) высказал идею о кольцевом токе – источнике возмущения земного магнитного поля. Но только с началом проведения прямых спутниковых экспериментов предоставилась возможность окончательно решить эту проблему.

К началу 70-х годов стало ясно, что основная доля энергии частиц в радиационных поясах сосредоточена в её протонной компоненте с энергиями в десятки кэВ – так называемой области горячей плазмы. Однако до этого времени измерений протонов со столь низкими энергиями не проводилось. Кроме этого, было важным осуществить эксперимент в районе экваториальной плоскости, где должна наблюдаться максимальная плотность энергии частиц кольцевого тока. Такие измерения впервые были проведены на спутнике «Explorer-45» и несколько позднее в НИИЯФ МГУ на спутниках «Молния-1» и «Молния-2» (Э.Н. Сосновец, М.И. Панасюк, А.С. Ковтюх и др.). Эти эксперименты действительно подтвердили, что протоны в диапазоне энергий от десятков и до 200–300 кэВ – важнейший компонент кольцевого тока Земли, определяющий его энергетику. Оказалось, что вариации плотности частиц именно этой компоненты околоземной радиации соответствуют основополагающей формуле Десслера–Паркера–Скопке, связывающей изменения геомагнитного поля и запасённую энергию частиц кольцевого тока.

В отличие от радиационных поясов, частицы кольцевого тока в большей степени подвержены воздействию магнитосферного электрического поля. Поэтому обнаружение долготной асимметрии инжекции кольцевого тока на первоначальной фазе магнитной бури (преимущественно в вечернем секторе), с точки зрения модели дрейфа частиц в скрещенных электрических и магнитных полях, не было удивительным и полностью согласовывалось с предыдущими измерениями магнитного поля на спутниках.

Роль вариаций магнитосферного электрического поля в динамике частиц внутри зоны захвата была детально рассмотрена Б.А. Тверским в 1969 г. и характерные особенности динамики кольцевого тока во время магнитных бурь стала дополнительным аргументом в пользу этой модели.

Последующий этап развития знаний о кольцевом токе как плазменном образовании, ответственном за изменение магнитного поля Земли во время магнитных бурь, был связан с двумя вновь обнаруженными экспериментальными фактами, не укладывающимися в картину протонного кольцевого тока. Во-первых, в 1972 г. американским исследователям на низковысотном полярном спутнике удалось обнаружить возрастания потоков однократно-ионизированного кислорода во время магнитных бурь. Это было первым указанием на возможное существование ещё одного, кроме плазмы солнечного ветра, источника частиц в ближней магнитосфере и, в частности, в самом кольцевом токе – ионосферных ионов. Во-вторых, изучение кольцевого тока во время сильных бурь указывало на дефицит плотности энергии частиц кольцевого тока, состоящего из протонов, по сравнению с энергией магнитного поля во время главной фазы бури. Стало очевидным, что поиск «недостающей» энергии кольцевого тока надо искать в другом источнике – ионосферном, способным поставлять в кольцевой ток частицы, более тяжёлые, чем протоны солнечного ветра. Такие эксперименты были одновременно развёрнуты в 1984 г. в СССР на геостационарном спутнике «Горизонт» и в США в рамках эксперимента «AMPTE».

Эти эксперименты действительно выявили большую роль ионосферной плазмы в формировании кольцевого тока. Тем самым была, в основном, снята проблема «дефицита» энергии кольцевого тока и установлен новый источник частиц как кольцевого тока, так и радиационных поясов – ионосферная плазма. Её отличие от солнечных частиц – в

присутствии значительного количества слабоионизированных атомов кислорода. Их относительная концентрация во время магнитных бурь может достигать или даже превышать плотность водорода.



Рис. 6. Велиур Петрович Шабанский

Существенную роль в изучении динамики солнечной и ионосферной плазмы сыграли эксперименты, выполненные в 80–90-х годах на геостационарных спутниках «Горизонт» благодаря многолетнему успешному сотрудничеству института с НПО «Прикладная механика» в г. Красноярске, начатому еще в начале 70-х годов. В этих экспериментах удалось получить уникальные данные по вариациям потоков солнечной и ионосферной плазмы (М.И. Панасюк, Э.Н. Сосновец, А.С. Ковтюх, 1984) и выделить адиабатическую составляющую этих изменений. Последнее важно для идентификации инжекционного механизма (А.С. Ковтюх, 1998). Было показано, что во время бурь в магнитную ловушку инжектируются только частицы с энергией, не превышающей некоторого

предельного значения. Потоки же частиц достаточно больших энергий во внешних областях зоны захвата испытывают лишь адиабатическую вариацию. Кроме этого было выявлено, что сам спектр инжектируемых ионов солнечного и ионосферного происхождения может отличаться.

Открытие ионосферного источника ионов кольцевого тока диктовало необходимость теоретической интерпретации механизма инжекции этих частиц из ионосферы и их ускорения. Большой вклад в решение этой проблемы внесли работы Е.Е. Антоновой, выполненные на основе рассмотрения магнитостатически равновесных продольных токов, создаваемых азимутальными градиентами давления. Последние создаются за счёт неустойчивости радиального градиента, либо за счёт вводимого извне распределения потенциала электрического поля в полярной шапке. Как результат реализуется следующая картина инжекции ионосферных частиц в кольцевой ток.

Динамика магнитосферной токовой системы такова, что в области перехода от дипольных к вытянутым в хвост магнитным силовым линиям, возникают суббури и микросуббури (преимущественно при южном направлении межпланетного магнитного поля). Они сопровождаются появлением горячего плазменного сгустка или пузыря, не находящегося в равновесии с окружающей плазмой. Часть нагретой плазмы инжектируется во внутреннюю магнитосферу, формируя кольцевой ток, а другая часть – в хвост, формируя плазмоид, движущийся от Земли.

«Вклад» тяжёлых ионов ионосферного происхождения не разрешил, однако, полностью проблему магнитного эффекта кольцевого тока в рамках его рассмотрения согласно закону Десслера–Паркера–Скопке. Оказалось, что во время уникальных супербурь (с амплитудами  $D_{st}$ , превышающими 200–300 нТ), энергии кольцевого тока, состоящего из протонов и кислорода, всё же не хватало для объяснения наблюдающихся  $D_{st}$ . Стало очевидным, что вклады в вариации магнитосферного поля ионосферных токовых систем, биркеландовских токов вдоль силовых линий магнитного поля токовых слоёв в магнитосферном хвосте и на магнитопаузе очень существенны и могут даже доминировать (А.С. Ковтюх и др. 1986).

Проблемы динамики магнитосферных токовых систем получили развитие в институте и в теоретическом плане. В.П. Шабанский (рис. 6) в 60-е годы заложил основы модели магнитосферного поля Земли.

В последующем, в 90-х годах была создана динамическая («параболоидная») модель магнитосферы (И.И. Алексеев, В.В. Калегаев), позволяющая исследовать

динамику магнитосферных токовых систем и их вклад в вариации геомагнитного поля, в том числе и во время сильных магнитных бурь. Изменения магнитосферного магнитного поля в этой модели описываются временными вариациями параметров магнитосферных токовых систем, которые однозначно определяются из совокупности данных измерений в околоземном космическом пространстве. Созданная в институте динамическая модель магнитосферного магнитного поля используется для анализа взаимодействия магнитосферы с корональными выбросами, которые вызывают сильные геомагнитные возмущения – магнитные бури и суббури. В настоящее время Международная организация по стандартизации (ISO) приняла динамическую модель магнитосферы НИИЯФ МГУ в качестве основы международного стандарта.

Другой концептуальный подход к изучению динамики кольцевого тока был развит в работах Б.А. Тверского (1997). Он основан на существовании разницы в давлении плазмы во внутренних и внешних областях магнитосферы во время асимметричной части геомагнитных возмущений. Показано, что даже небольшое давление плазмы на значительных геоцентрических расстояниях может вносить существенный вклад в энергию кольцевого тока внутри ловушки. Этот подход, однако, не снимает проблему развития сильных бурь, связанную с «включением» сильных продольных токов и мощных потоков ионосферных ионов внутрь геомагнитной ловушки.

Обнаружение нового источника частиц во внутренней магнитосфере – ионосферного – привело к необходимости дополнительного изучения структуры захваченных частиц более высоких энергий, чем плазма кольцевого тока, т.е. частиц радиационных поясов. Плазма кольцевого тока, состоящая из частиц солнечного ветра и ионосферы, безусловно, является источником частиц для радиационного пояса. В терминах уравнения переноса это означает задание отдельных граничных условий для солнечных и ионосферных частиц.

Таким образом к настоящему времени сложились представления о радиационных поясах и кольцевой токе как о многокомпонентной популяции частиц, населяющих внутреннюю магнитосферу. Помимо солнечной плазмы, солнечных энергичных частиц, галактических космических лучей и аномальной компоненты, её источником также является ионосферная плазма как неотъемлемая составляющая.

## **5. Динамика частиц радиационных поясов и проблема инжекции**

Изучение вариаций потоков частиц радиационных поясов Земли началось сразу же после их открытия. Уже упоминались обнаруженные на 3-м искусственном спутнике Земли изменения потоков во внешнем радиационном поясе. Сейчас ясно, что механизмов, ответственных за вариации частиц радиационных поясов, довольно много.

С точки зрения уравнения переноса изменения пространственно-энергетической структуры захваченных частиц зависят от коэффициента диффузии, который, в свою очередь, определяется параметрами солнечного ветра в межпланетной среде и зависит как от текущей гелиофизической обстановки (например, наличие корональных инжекций масс в межпланетной среде), так и о долговременных солнечно-циклических изменений. Поэтому коэффициент диффузии определяется не только амплитудой геомагнитных возмущений, но и их частотой. Коэффициент «магнитной» диффузии, определённый Б.А. Тверским (1965) – соответствовал средневозмущённой геомагнитной обстановке и, соответственно, определял «усреднённую» пространственно-энергетическую структуру поясов.

Исследования на спутниках «Электрон», выполненные в середине 60-х годов (С.Н. Кузнецов, Э.Н. Сосновец и др.), показали высокую изменчивость внешнего электронного радиационного пояса и относительную стабильность протонного. Обнаруженные диффузионные волны электронов на фазе восстановления бурь

демонстрировали скорость перемещения в соответствии с «средневозмущённым» коэффициентом переноса, что подтверждало справедливость концепции «магнитной» диффузии частиц радиационных поясов. Кроме этого, стало очевидным, что быстрые изменения потоков электронов могут быть связаны с воздействием на магнитосферу одиночных импульсов давления солнечной плазмы большой амплитуды, приводящих к аномально-быстрому перемещению частиц внутрь ловушки по сравнению со скоростью переноса, определяемой «средневозмущённым» коэффициентом диффузии.

Выявленная на основе многочисленных спутниковых измерений («Молния-1», «Космос-900», «Метеор» и др.) характерная зависимость изменения пространственного положения максимума профиля электронов ( $L_{max}$ ) от максимального значения индекса геомагнитной активности  $|D_{st}|_{max} \sim L_{max}^{-4}$  (Л.В. Тверская, 1992), свидетельствовала в пользу механизма адиабатического изменения потоков электронов в связи с инжекцией плазменного облака кольцевого тока при дисбалансе внутреннего и внешнего давления плазмы (Б.А. Тверской, 1997).

Однако, наиболее значимыми по своему проявлению, нарушающими типичную пространственно-энергетическую структуру электронных поясов, стало обнаружение Е.В. Горчаковым в 1977 г. на спутнике «Космос-900» ускоренных электронов с энергией  $\sim 15$  МэВ в сердцевине ( $L \sim 3,5$ ) радиационных поясов на фазе восстановления геомагнитных бурь. По сути, это было рождением проблемы генерации релятивистских электронов внутри геомагнитной ловушки, которая развивается и по сей день.

В настоящее время в качестве основного механизма генерации релятивистских электронов рассматривается механизм резонансного взаимодействия электронов с ОНЧ-волнами, приводящего к ускорению электронов вплоть до релятивистских энергий. Это более быстрый процесс, чем обычный перенос частиц под действием внезапных импульсов геомагнитного поля, однако он достаточно медленный открытый в 1991 г. на спутнике CRRES эффект быстрого резонансного ускорения электронов и протонов в течение секундных интервалов времени до энергий соответственно  $\sim 15$  и  $40$  МэВ на  $L = 2,2-2,6$ . Это – довольно редкое явление в радиационных поясах обусловленное, как было показано Б.А. Тверским в 1993 г. и зарубежными авторами, возникновением мощных биполярных импульсов геомагнитного поля. В дальнейшем такие эффекты ускорения наблюдались на спутниках «Гранат» и «Метеор» и других спутниках. В целом вариации электронов данного типа укладываются в модель ускорения частиц под действием внезапных импульсов, но с амплитудой и формой, редко наблюдающимися в природе.

Еще одним важным аспектом проблемы динамики электронов в радиационных поясах является их потери. Электроны в большей степени подвержены воздействию электромагнитных волн (в основном, ОНЧ диапазона), чем ионы. Этим фактором, наряду с кулоновским рассеянием, и определяется их время жизни в ловушке. На эту тему было выполнено достаточно много работ, базирующихся на отечественных экспериментах. Это – эксперименты на спутниках серий «Космос», «Интеркосмос», выполненные под руководством С.Н. Кузнецова и Ю.В. Минеева. В целом эта проблема – ясна, однако здесь следует выделить один вопрос, требующий дальнейшего исследования. Это – взаимосвязь между природными и антропогенными воздействиями на электронные радиационные пояса. На возможность интерпретации высыпаний электронов из поясов под действием антропогенных факторов (наземные радиопередатчики, линии электропередач) указывалось в ряде работ, выполненных на основе изучения низкоэнергичных электронов на орбитальной станции «Мир» (О.Р. Григорян и др., 1985) и недавно получило подтверждение в количественных модельных оценках стенфордской группы исследователей. Вырисовывается картина пространственно-энергетической структуры части внутреннего пояса электронов и зазора, согласно которой именно антропогенная составляющая ответственна за её формирование.

Таким образом, более чем 40-летний период исследований динамики электронных радиационных поясов, привёл к достаточно согласованной модели её описания – результата воздействия на её пространственно-энергетическую структуру как внешней среды – солнечного ветра, приводящего к геомагнитным возмущениям, так и внутренней – низкочастотных колебаний электромагнитного поля, включая антропогенное воздействие.

Другим аспектом пространственно-энергетических вариаций частиц радиационных поясов, является проблема инжекции частиц из внешних областей магнитосферы. Важность этой проблемы обусловлена тем, что практически для всех механизмов формирования радиационных поясов требуется предускорение частиц до весьма значительных энергий. Так, в модели квазистационарной радиальной диффузии частиц в качестве граничного условия задаётся экспериментально наблюдаемый энергетический спектр на внешней границе радиационных поясов, который весьма сильно отличается от наблюдаемого в межпланетной среде. Поэтому инжекция достаточно энергичных частиц может осуществляться внутрь ловушки либо после их предускорения в удалённых областях магнитосферы, либо путём заброса уже достаточно энергичных частиц солнечных космических лучей.

Что касается изучения ускорения частиц вне радиационных поясов, то этому посвящён ряд работ, выполненных в НИИЯФ МГУ на высокоапогейных спутниках серий «Прогноз» и «Молния». В частности, было показано, что во время суббурь происходит ускорение как протонов, так электронов в хвосте магнитосферы (данные спутников «Молния» (Л.В. Тверская, М.И. Панасюк, Э.Н. Сосновец, 1971). Сейчас понятно, что такого рода кратковременные всплески потоков частиц обусловлены их ускорением в хвосте магнитосферы в результате механизмов пересоединения, или (и) развитием плазменной турбулентности. Второй сценарий картины инжекции связан с проникновением солнечных энергичных частиц непосредственно внутрь ловушки. Этот механизм достаточно хорошо изучен к настоящему времени на основе данных многих экспериментов на низковысотных спутниках («Космос-900», «Интеркосмос-17», «КОРОНАС-И», «КОРОНАС-Ф» и др.).

Динамику проникновения солнечных протонов в магнитосферу Земли в МэВ-ном диапазоне начали детально исследовать в 70-е годы на спутниках серии «Космос». Благодаря этим работам был разработан метод диагностики состояния основных структурных образований магнитосферы. Была впервые обнаружена северо-южная асимметрия проникновения солнечных частиц в полярные шапки и получены подтверждения в пользу «открытого» характера магнитосферы Земли (Э.Н. Сосновец, Л.В. Тверская и др., 1983).

В общих чертах существующая модель проникновения сводится к пространственным вариациям – широтным смещениям зависящего от жёсткости порога геомагнитного обрезания внутренней границы инжектируемых частиц. Сама жёсткость геомагнитного обрезания «регулируется» как амплитудой геомагнитных бурь, так и суббурь, и проявляет сложный характер в зависимости от местного времени и индексов геомагнитной активности (С.Н. Кузнецов, Л.Л. Лазутин, И.Н. Мягкова, 2004).

С точки зрения формирования радиационных поясов важен вопрос об эффективности последующего захвата этих «свежих» частиц. Если для электронов эта возможность, исходя из критерия Альвена, должна реализоваться достаточно эффективно, то для протонов солнечно-энергичных частиц соотношение ларморовского радиуса и кривизны силовой линии магнитного поля в районе внутренней границы инжекции делает возможность захвата проблематичным. Тем не менее, результаты последних лет показывают (данные спутника «КОРОНАС-Ф»), что захват протонов (и более тяжёлых частиц) реально существует, но это достаточно редкое явление. Какова реальная физическая модель захвата солнечных частиц и их дальнейшая роль в формировании радиационных поясов – направление текущих и последующих исследований.

## **6. Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве и проблема безопасности космических полётов**

В 1960 г. в Советском Союзе начались осуществляться первые запуски кораблей-спутников в рамках программы подготовки полёта космонавта. Несмотря на то, что орбиты этих космических аппаратов были достаточно низкие – под радиационными поясами, оказалось, что в районе Южной Атлантики существуют области повышенной радиации на небольших высотах ниже 300 км. В работах на кораблях-спутниках участвовала группа сотрудников НИИЯФ МГУ под руководством И.А. Савенко. Было обнаружено, что увеличение радиации в этой области совпадает с отрицательной магнитной аномалией Земли – локальным понижением напряжённости магнитного поля по сравнению с сопряжёнными областями на тех же долготах в Северном полушарии. В результате частицы, дрейфующие вокруг Земли в районе этих долгот, отражаются в зеркальных точках в Южном полушарии на меньших высотах, чем в Северном. Тем самым образуется радиационная аномалия, безусловно, представляющая потенциальную опасность для пилотируемых космических полётов (С.Н. Вернов, И.А. Савенко, П.И. Шаврин, 1964).

Именно данные первых кораблей-спутников позволили определить дозу радиации на высотах полётов пилотируемых космических аппаратов. Оказалось, что она составляет ~20 мрад/сутки под защитами ~3 г/см<sup>2</sup> для орбит высотой ~400 км и наклоном менее 65° и не представляет опасности для полётов космонавтов. В дальнейшем измерения радиационных доз проводились регулярно на всех пилотируемых космических кораблях, а созданная в НИИЯФ МГУ система радиационного контроля на базе ионизационной камеры (Р-16 под руководством М.В. Тельцова), в течение более чем трёх десятилетий, вплоть до настоящего времени, обеспечивает радиационную безопасность космических полётов.

Наряду с обеспечением радиационной безопасности пилотируемых космических полётов, институт, благодаря инициативе С.Н. Вернова, был вовлечён в программу широкомасштабного экспериментального исследования радиационных полей в космосе для изучения их влияния на работу бортовых систем спутников и деградацию конструкционных материалов. Детальное изучение радиации началось с экспериментов на спутнике «Космос-17», запущенного в 1961 г., и продолжилось позднее в 60-х годах на спутниках серии «Электрон». С тех пор институт стал лидером по исследованию радиации в околоземном космическом пространстве.

Многие годы исследования радиационных полей в космосе создало множество нормативных документов для организаций космической промышленности, позволяющие учитывать и минимизировать влияние на системы космических аппаратов одного из самых опасных факторов космической среды – радиации.

В итоге многолетних исследований радиационной обстановки в космосе пришло понимание того, все виды космических излучений: радиационные пояса, солнечные энергичные частицы, галактические космические лучи, а также вторичная, альбедная радиация и высыпающиеся из радиационных поясов частицы, вызывают разнообразные радиационные эффекты, проявляющиеся либо в их пространственной локализации в околоземном пространстве, либо в характере их взаимодействия с веществом.

Например, радиационные пояса представляют собой источники дозовых эффектов воздействия радиации. Мощность дозовых эффектов зависит как от геомагнитной активности (на временной шкале геомагнитных бурь и суббурь), так и от фазы солнечного цикла. Вариации релятивистских электронов во внешней зоне области захвата – яркий пример относительно кратковременных увеличений потоков, способных привести к нарушениям работы высокоапогейных и геостационарных спутников. Этому направлению были посвящены работы на спутниках «Молния-1» и «Молния-2», на геостационарных спутниках «Горизонт», и полярных «Метеор» и «КОРОНАС-Ф». С другой стороны,

изучение долговременных вариаций радиационных доз на станции «Мир» привело к обнаружению солнечно-циклической вариации радиации на малых высотах в районе Южно-Атлантической аномалии (рис. 7), связанной с изменением температуры верхней атмосферы (М.И. Панасюк, В.Н. Башкиров, 1997).

Помимо частиц радиационных поясов, солнечные космические лучи, генерируемые во время солнечных вспышек и корональных инжекций масс – ещё один мощный фактор, повышающий радиационный риск космических полётов. На спутниках «Прогноз-1, 2» были установлены ионизационные камеры с целью измерения доз радиации, обусловленной как галактическими космическими лучами, так и частицами от возможных солнечных вспышек. Во время вспышек 4 и 7 августа 1972 года, которые входили в десятку мощнейших из зарегистрированных к настоящему времени, доза радиации внутри космического аппарата превысила 100 рад. Эти результаты, безусловно, свидетельствовали о реальной радиационной опасности космических полётов вне пределов магнитосферы Земли даже в течение короткого промежутка времени.

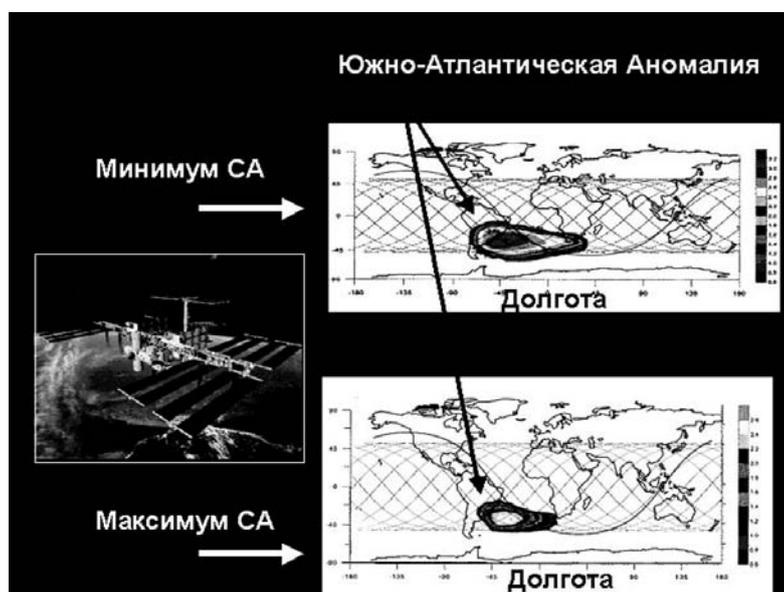


Рис. 7. Динамика радиационной обстановки в Южно-Атлантической аномалии в течение цикла солнечной активности: дозы радиации в этой области возрастают в минимуме цикла и понижаются в максимуме

Следует заметить, что радиационная безопасность космических полетов как направление космической физики имеет длительную историю экспериментальных и теоретических исследований в институте (см. следующий раздел 7). Что касается проблемы изменения радиационной обстановки в связи с генерацией СКЛ, то к числу важнейших результатов, полученных в этой области, следует отнести:

- Исследования проникновения СКЛ во внутреннюю магнитосферу (см. раздел 4) и, в частности, на низковысотные орбиты пилотируемых космических аппаратов. Они показали, что СКЛ – мощный источник радиационных нагрузок во время сильных солнечных вспышек, сопровождающихся геомагнитными возмущениями, вплоть до низких (~400 км) орбит.
- Исследования вариаций потоков СКЛ во время солнечных событий в межпланетной среде, продемонстрировавшие тесную связь между наблюдающимися у Земли потоками частиц с локализацией активных областей на Солнце и прохождением ударных волн в межпланетной среде.

Большую роль в систематизации знаний о солнечных космических лучах сыграли выпущенный при участии сотрудников института «Каталог солнечных космических лучей» (Ю.И. Логачев и др., 1995) и вероятностная модель СКЛ (Р.А. Ныммик, 2001).

Среди космических факторов радиационных рисков галактическим космическим лучам (ГКЛ) принадлежит особая роль. Вследствие своих чрезвычайно низких потоков, ГКЛ не могут вызвать существенных радиационных дозовых нагрузок. Однако, как это стало очевидным в конце 70-х – начале 80-х годов, именно эта компонента космической радиации вызывает нарушения в работе бортовых электронных систем, связанные с локальными повреждениями в микрообъемах (эффекты одиночных сбоя), в первую очередь тяжёлыми ядрами (например, железа). В настоящее время эти эффекты хорошо изучены и создана модель, позволяющая их рассчитать в зависимости от параметров орбиты спутника и гелио-геофизической обстановки (Н.В. Кузнецов, 2001).

## **7. Исследования солнечных энергичных частиц**

Первые измерения солнечных частиц за пределами атмосферы были проведены на 3-ем советском спутнике в июле 1958 г. Эти частицы возникли после мощной вспышки и создали вблизи Земли интенсивные потоки 100-МэВ-ных протонов с дозой радиации ~100 рад. За всю историю космических исследований наблюдалось всего несколько таких мощных вспышек.

В дальнейшем изучение СКЛ в НИИЯФ МГУ проводилось на всех космических аппаратах, запущенных к Венере, Марсу и Луне. Межпланетные станции были укомплектованы приборами для регистрации протонов в широком интервале энергий, начиная со ~100 кэВ. Измерения столь малоэнергичных частиц показали, что солнечные вспышки, генерирующие частицы малых энергий, происходят гораздо чаще, чем вспышки с более энергичными частицами. Первые исследования СКЛ позволили также установить основные закономерности распространения частиц в межпланетном пространстве: наличие событий диффузионного (медленного) типа, характеризующихся медленным рассеянием, и быстрых, импульсных. Эти результаты легли в основу для сравнения с различными теориями процессов распространения частиц. Многочисленные эксперименты на межпланетных космических аппаратах дали уникальный ряд однородных данных о вариациях СКЛ вдали от Земли. Были сформулированы представления о структуре и динамике межпланетной среды и о распространении и модуляции космических лучей (Г.П. Любимов и др.).

Большую роль в изучении СКЛ сыграли эксперименты на спутниках «Прогноз». С 1972 по 1985 гг. запущено 10 спутников. На них устанавливалась разнообразная аппаратура, позволявшая изучить как энергетические распределения и состав заряженных солнечных частиц, так и нейтральное – рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек. Это были первые комплексные эксперименты по изучению ускоренных частиц солнечного происхождения. Они позволили выявить ряд важных закономерностей (Ю.И. Логачев, В.Г. Курт, М.Я. Зельдович), среди которых следующие.

1. Вывод о геоэффективности вспышек, происходящих на западной полусфере солнечного диска, как следствие распространения частиц вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля.

2. Доказательство одновременного выхода как протонов (ядер), так и электронов во время вспышек и определение коэффициента выхода электронов из области ускорения в межпланетное пространство.

3. Обнаружение нескольких моделей распространения частиц в межпланетной среде: диффузионной, без рассеяния, когерентной, а также их суперпозиция.

4. Идентификация различной природы фоновых потоков частиц в межпланетном пространстве: солнечной и галактической. Оказалось, что при энергиях менее 15–20 МэВ

доминирует солнечная компонента, коррелирующая с солнечной активностью, а при больших энергиях – галактическая, с характерной антикорреляцией по отношению к солнечному циклу.

Одновременно с интенсивными экспериментальными работами по исследованию СКЛ в межпланетной среде в институте развивались и теоретические изыскания в этом направлении. Прежде всего, они касались возможных механизмов ускорения частиц солнечного происхождения. Ещё в 1961 г. Б.А. Тверской сделал попытку количественной интерпретации наблюдаемых вариаций СКЛ на основе турбулентного ускорения, приведшей к удовлетворительному согласию с наблюдаемыми спектрами энергичных частиц. Этот механизм ускорения частиц не является конкурирующим, а, скорее, дополнительным к предложенному другими авторами в 70-х годах статистическому ускорению Ферми – I рода на фронтах ударных волн. Именно сочетание одновременного действия различных физических механизмов ускорения частиц позволяет приблизиться к осмыслению сложного характера трансформации их функций распределения в процессе их транспорта в межпланетной среде. Тем не менее, многие вопросы, касающиеся проблемы ускорения солнечных частиц и среди них, прежде всего, проблема локализации области ускорения в самой солнечной атмосфере (в активных областях) и (или) в межпланетной среде, а также связанная с этим проблема предельно достижимых энергий частиц во время активных процессов, продолжают быть актуальными и в настоящее время.



Рис. 8. Подготовка к запуску спутника КОРОНАС

В последние годы проблематика изучения транспорта и ускорения СКЛ развивается на базе экспериментов на низковысотных полярных спутниках серии «КОРОНАС», «КОРОНАС-И» был запущен в 1991 г., и «КОРОНАС-Ф» – в 2001 г. Планируемый запуск следующего спутника этой серии – «КОРОНАС-Фотон» – 2007 г. (рис. 8).

Эксперимент на спутнике «КОРОНАС-Ф» представил уникальную возможность изучения солнечных экстремальных событий на фазе спада 23 цикла солнечной активности, сопровождавшихся мощными корональными инжекциями плазмы и генераций энергичных частиц. Исследование состояний Солнца и солнечно-земных связей в периоды именно экстремально низкой и экстремально высокой активности может дать материал для лучшего понимания основных физических закономерностей, проявляющихся в это время. Среди важных результатов – экспериментальное доказательство возможности двухстадийного ускорения частиц в активных областях, обнаружение поляризации рентгеновского излучения и наблюдение развития асимметрии распределений активности по диску Солнца. Они дали новую информацию о физике процессов в активных областях Солнца во время вспышек (И.С. Веселовский, С.Н. Кузнецов, Л.Л. Лазутин, М.И. Панасюк и др., 2004).

Новые факты проливает дополнительный свет на не вполне понятную пока природу этого явления и свидетельствуют о его тесной связи с подфотосферными слоями и процессами в недрах Солнца, а не только лишь с неустойчивостью магнитного поля и плазмы в верхней атмосфере – хромосфере и короне. Они свидетельствуют, скорее всего, о преимущественном быстром поступлении избыточной свободной энергии из-под фотосферных слоёв Солнца. Т.е. получены новые весомые аргументы в пользу представлений о нелокальной природе эруптивных процессов на Солнце.

## **8. Исследования атмосферных излучений**

Начало оптических наблюдений излучений земной атмосферы в ультрафиолетовом, инфракрасном и видимом диапазонах длин волн как наземными, так и космическими методами в НИИЯФ МГУ связано с именами А.И. Лебединского и О.В. Хорошевой. А.И. Лебединский начал активную работу в этом направлении ещё в 1948 г., создав специальную широкоугольную фотокамеру для съёмок полярных сияний. Ее использовали на наземных станциях, расположенных в Арктике и в Антарктиде. Анализ фотографических наблюдений на глобальной сети станций существенно изменили представления о пространственном распределении зон полярных сияний. Оказалось, что дискретные, резко очерченные формы полярных сияний существуют вдоль зоны, располагающейся асимметрично относительно геомагнитного полюса.

О.В. Хорошевой было показано, что полярные сияния наблюдаются на всех долготах одновременно, образуя своеобразный овал как над северной полярной шапкой, так и над южной. Этот результат был пионерским и на многие годы вперед предопределил направление дальнейших исследований взаимосвязи этого замечательного феномена в верхней атмосфере с глобальными электродинамическими процессами в магнитосфере Земли. Была установлена тесная связь асимметричного овала сияний с крупномасштабной структурой геомагнитного поля и потоками энергичных частиц магнитосферного происхождения. Низкоширотная граница полярного овала представляет собой проекцию на высокие слои атмосферы (ионосферу) границы захваченной радиации, совпадающей с границей замкнутых силовых линий магнитного поля Земли. Наблюдения взаимного расположения электронных и протонных сияний в совокупности с данными фотосъёмки позволили объяснить полярные сияния непосредственным возбуждением молекул и атомов атмосферы с вторгающимися в неё частицами.

Важную роль в изучении взаимосвязи полярных сияний с процессами, происходящими в магнитосфере во время геомагнитных возмущений, сыграл эксперимент на спутнике «Космос-900» («Овал»), начавшийся в 1977 г. Его научными руководителями были Б.А. Тверской и К.И. Грингауз (ИКИ РАН). Благодаря этому эксперименту, позволившему провести измерения плазмы, заряженных частиц и ультрафиолетового излучения, удалось понять многие закономерности взаимосвязи процессов ускорения, переноса (включая высыпания) частиц в удалённых областях магнитосферы и в ближнем космосе – радиационных поясах – с генерацией полярных сияний в верхней атмосфере.

Современное понимание природы полярных сияний сводится к тому, что это явление – одно из проявлений сложного процесса магнитосферно-ионосферного взаимодействия, связывающего в единую цепь множество физических процессов, происходящих в удалённых частях магнитосферы – хвосте и плазменном слое, кольцевом токе, радиационных поясах и ионосфере. Большую роль в развитии теории магнитосферно-ионосферных связей сыграли работы теоретиков института – Б.А. Тверского, В.П. Шабанского, А.П. Кропоткина, Е.Е. Антоновой, И.И. Алексеева и др.

Космические исследования открыли путь геофизическим и астрофизическим исследованиям электромагнитного излучения в широком спектре длин волн. Выход оптических измерений за границы видимой области спектра значительно увеличивает

поток информации, которую несёт в себе электромагнитное излучение Земли и других небесных тел.

Первые такие эксперименты по изучению электромагнитного излучения Луны, Марса и Венеры были осуществлены А.И. Лебединским с сотрудниками еще в 60-х годах на АМС. Эти эксперименты позволили выявить неизвестные ранее физические характеристики поверхности Луны и Венеры.

К первоначальной эпохе изучения космоса относятся также исследования свечений ночной атмосферы Земли в ультрафиолетовой области. Именно эксперименты на спутниках «Космос-45, 65 и 92», проведенные А.И. Лебединским, В.И. Краснопольским, В.И. Тулуповым в 60-е и в начале 70-х годов стали первым надёжным материалом по широтным вариациям молекулярного кислорода  $O_2$  и озона  $O_3$ . Эти эксперименты, по сути, также были пионерскими и дали важные результаты по широтным и сезонным изменениям этих атмосферных составляющих. В частности, было показано уменьшение содержания озона при усилении солнечной активности. Помимо фундаментальных вопросов космической физики, исследования электромагнитных эмиссий, излучаемых Землей, имеет также прикладную направленность, связанную с безопасным обеспечением космических полётов (это – вопросы теплового баланса спутников, их ориентации и др.). Эти исследования также были начаты А.И. Лебединским с сотрудниками в конце 60-х на спутниках серии «Космос».

Изучение свечений атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне были недавно продолжены на полярном спутнике «Университетский–Татьяна», запущенном в январе 2005 г. Основным их результатом стало обнаружение в миллисекундном диапазоне вспышек ультрафиолетового излучения с гигантской энергией (оцениваемой в десятки – сотни кДж) и распределенных в основном в районе экваториальной плоскости Земли. Это – особый класс атмосферных явлений – так называемых «транзиентных световых событий». Их природа связана с генерацией релятивистских электронов в области грозовых разрядов. Электроны, в свою очередь, и вызывают флюоресцентное свечение молекул азота верхней атмосферы. Изучение этих явлений только началось и интенсивно развивается как в экспериментальном и теоретическом плане.

## **Заключение**

Космофизике в НИИЯФ МГУ в 2007 г. исполнится 50 лет. За это время коллектив института, работающий в этой области, прошёл большой путь, ознаменовавшийся значительными достижениями и в экспериментальных и в теоретических познаниях физики космического пространства. Получены результаты и в фундаментальных, и в прикладных направлениях. Результаты многих исследований успешно реализуются в проектах космических отраслей промышленности. Создан сильный коллектив – научная школа, способная продолжать исследования в этой области, обеспечивая прогресс космических исследований. У космической физики есть перспектива – об этом свидетельствуют многие результаты последних исследований, нуждающихся в дальнейшем изучении.