

организация на кафедре спецкурса по нейтринной астрофизике в связи с развитием работ в этом направлении. Сергей Николаевич писал: "Надо иметь возможность быстро готовить специалистов в таких областях, которые раньше просто не существовали". Фактически почти все научные коллективы физических институтов, работающие в области космических лучей и нейтринной астрофизики, состоят из выпускников кафедры космических лучей и физики космоса.

Одновременно с подготовкой специалистов по узким проблемам, Сергей Николаевич Вернов считал необходимым и очень важным предусмотреть подготовку научных работников очень широкого профиля. Сам он и принадлежал к таким специалистам. Физический факультет МГУ очень высоко оценивает всё сделанное С.Н. Верновым в развитии высшего образования по современным направлениям физики космических лучей и физики космоса.

PACS numbers: **01.65.+g, 07.87.+v, 94.20.wq**  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102j.0197

## Становление и развитие космической физики в МГУ

### Радиация в космосе: наследие С.Н. Вернова

М.И. Панасюк

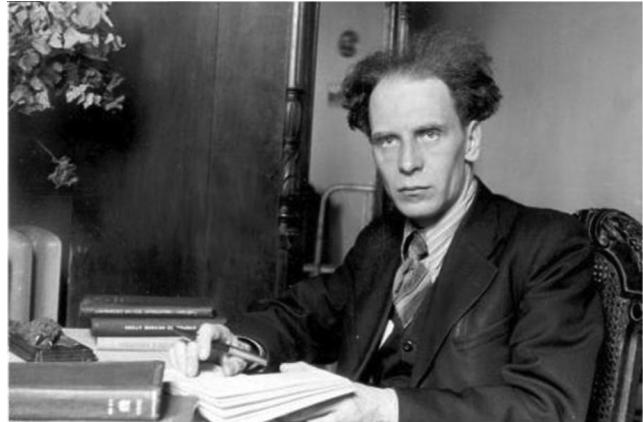
#### 1. Введение

В настоящей статье представлена ретроспектива — краткий обзор основных научных результатов в области космической физики, полученных в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова в ходе экспериментальных и теоретических исследований радиации, космических лучей и магнитных полей в космосе. У истоков этих работ стоял выдающийся российский учёный — Сергей Николаевич Вернов, возглавлявший Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) МГУ и в начале космической эры заложивший фундамент в становление в нашей стране космофизики как науки.

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 околосолнечные 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 два выдающихся учёных — Сергей Николаевич Вернов и Джеймс Ван-Аллен — специалисты в области физики космических лучей. Ещё в "доспутниковую эру" они осуществляли эксперименты по изучению космических частиц на Земле,

**М.И. Панасюк.** Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelьцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, РФ  
E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru



Сергей Николаевич Вернов

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.

Ниже кратко будут описаны основные этапы развития космической физики в НИИЯФ МГУ, руководителем которого с 1960 г. по 1982 г. был академик С.Н. Вернов.

#### 2. От шаров-зондов

##### к первым экспериментам в космосе

В середине 1930-х годов С.Н. Вернов предложил использовать шары-зонды для дистанционного изучения космических лучей в стратосфере (рис. 1). 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. Результатом этих экспериментов стало доказательство существования электронно-ядерного ливня вторичных частиц космических лучей, рождающихся в атмосфере (С.Н. Вернов и др., 1949 г.) [1].

Однако до конца 1940-х годов природа самого первичного космического излучения оставалась невыясненной. И здесь стратосферные исследования лучей (которые проводились на судне "Витязь" в 1949 г.) сыграли выдающуюся роль. С помощью оригинального прибора на основе счётчиков Гейгера, разработанного под руководством Н.Л. Григорова, сотрудника НИИЯФ МГУ, был выполнен ряд экспериментов, которые способствовали выяснению природы первичного космического излучения. Было обнаружено, что основная компонента космических лучей в окрестности нашей планеты — протоны [2].

Другой важной проблемой изучения природы первичных космических лучей в те годы было определение их энергии. Идея метода измерения энергии космических лучей подсказал сам процесс взаимодействия первичных частиц с атмосферой и рождение ими каскада вторичных частиц, открытый Д.В. Скobelьцыным в 1936 г. Этую идею

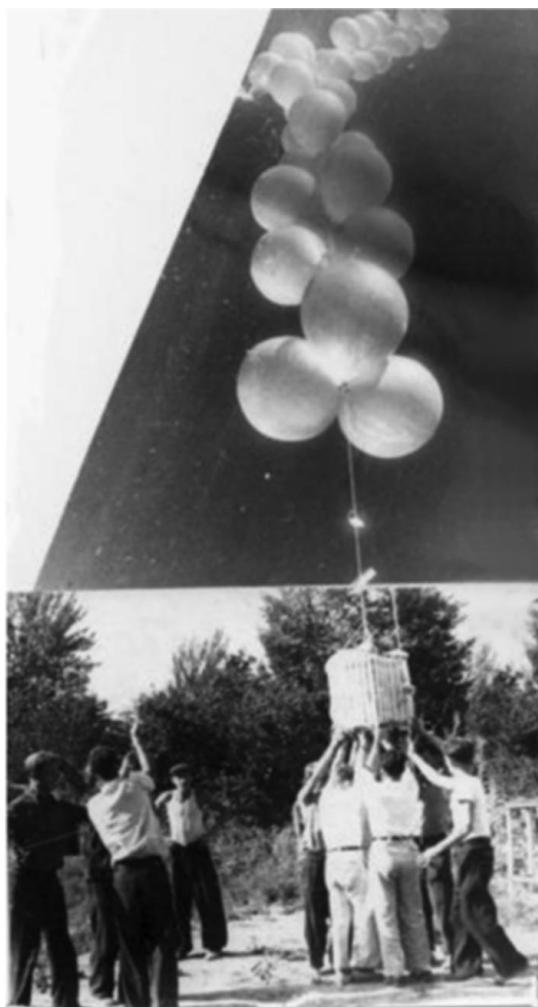


Рис. 1. Шары-зонды.

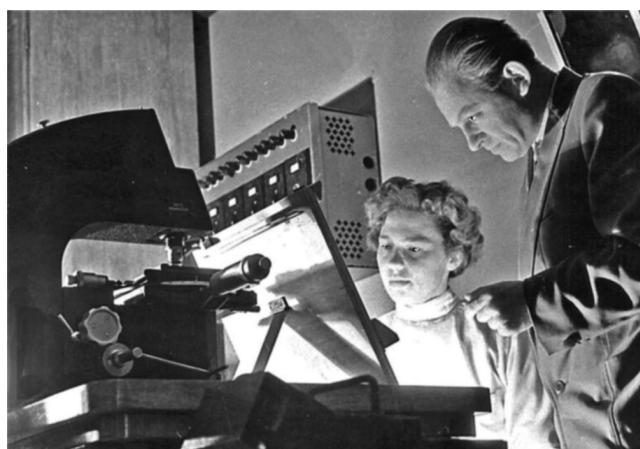


Дмитрий Владимирович Скобельцын

Арагац в Армении дали оценки спектра одиночных адронов в области энергий 1–10 ТэВ и показателя их интегрального спектра. Создание установок с большой светосилой с использованием метода ионизационного калориметра открыло широкие возможности исследования природы первичных космических лучей. Однако эти установки необходимо было запускать на такие высоты, на которых влияние атмосферы уже не может сказываться на изменении состава и энергетического спектра первичных частиц. Эти возможности появились позднее, 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.

Итак, "доспутниковый" период исследования космических лучей привёл к пониманию природы вторичной компоненты, рождающейся в атмосфере, определению основной первичной компоненты космических лучей — протонов, 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 уже предполагала проведение научных экспериментов на их борту. Учёные-космофизики, в отличие от других специалистов, были, пожалуй, наиболее подготовлены к началу исследований в космическом пространстве. Во-первых, у них была строго обоснованная научная идея — необходимость продолжения изучения космических лучей за пределами атмосферы с целью выяснения их природы, энергии и состава потоков частиц. Во-вторых, имелась разработанная и отработанная в наземных условиях и в стрatosферных исследованиях экспериментальная аппаратура.



Наум Леонидович Григоров и Алла Ивановна Савельева

реализовали Н.Л. Григоров, В.С. Мурзин и И.Д. Рапорт в 1958 г., создав ионизационный калориметр. Калориметр сыграл революционную роль не только в физике космических лучей, но и впоследствии в ускорительной физике высоких энергий.

Применение ионизационного калориметра началось с отечественных исследований космических лучей в горах Кавказа и Памира. Уже первые эксперименты на горе

Постановка первого космического эксперимента оказалась возможной на 2-м спутнике, запущенном в ноябре 1957 г. Ограничения по весу 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" были установлены такие же счётчики. Более масштабный эксперимент с применением различных типов детекторов был осуществлён позднее на 3-м советском искусственном спутнике Земли.

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

### 3. Первое открытие в космосе — радиационные пояса Земли

Путь к этому открытию был краток и драматичен. Первый прибор для изучения космических излучений — КС-5 — на основе газоразрядного счётчика Гейгера–Мюллера, разработанный под руководством С.Н. Вернова, был установлен на 2-м советском искусственном спутнике Земли (рис. 2). Дж. Ван-Аллен разместил аналогичный прибор на американском спутнике "Explorer-1". В ноябре 1957 г. в Советском Союзе и в январе–феврале 1958 г. в США была получена первая научная информация с околоземных орбит. Обе группы столкнулись с абсолютно новым феноменом природы — заряженными частицами, захваченными магнитным полем Земли. Однако следует отметить, что 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.

В создании этого прибора и проведении эксперимента принимали участие С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков, Н.Л. Григоров, Ю.И. Логачев и Ю.Г. Шафер.



Рис. 2. (а) Сергей Николаевич Вернов; (б) научные приборы на втором искусственном спутнике Земли в 1957 г.

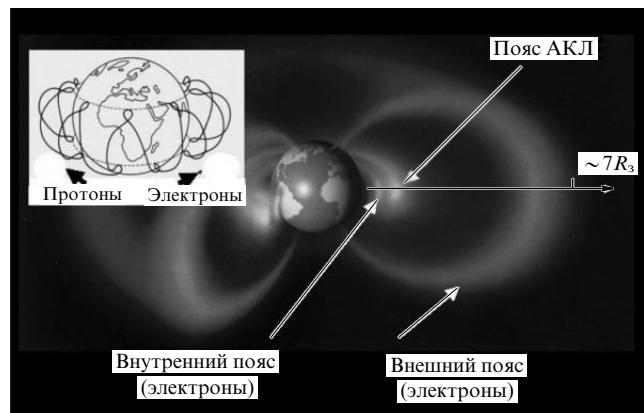


Рис. 3. Радиационные пояса Земли. Показаны внутренний и внешние электронные пояса Земли, а также пояс, образованный аномальной компонентой космических лучей (АКЛ — аномальные космические лучи).

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 сцинтиляционный детектор. Информация этого детектора позволила установить существование двух пространственно разделённых областей в околосземном пространстве — внешнего электронного пояса, заполненного электронами с энергией  $\gtrsim 100$  кэВ, и внутреннего, протонного. Энергия протонов внутреннего пояса была существенно выше ( $\approx 100$  МэВ), чем энергия электронов во внешнем. Кроме того, была обнаружена высотная зависимость потоков, свидетельствующая о захвате частиц магнитной ловушкой (рис. 3).

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 ввиду 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. стала очевидной суть первого открытия, сделанного с помощью первых космических аппаратов [3]. Пояса радиации, окружающие Землю, как оказалось, состоят из протонов и электронов в широком диапазоне энергий. Расчёты показывали, что это стабильное образование: времена жизни частиц во внутреннем поясе могли достигать нескольких 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 радиационных поясов, появилась практически сразу после их открытия. Это — механизм образования вторичных энергичных протонов при распаде нейтронов альбедо, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. Авторами этой модели были учёные НИИЯФ МГУ С.Н. Вернов и А.И. Лебединский (1958 г.) [4]. Интересно заметить, что практически одновременно и независимо этот механизм формирования внутреннего радиационного пояса предложил американец Ф. Зингер (F. Singer).

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

Итак, начало космических исследований 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 НИИЯФ удалось получить полную пространственную картину радиационных поясов. Кроме того, были 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 это направление стало одним из основных и принесло институту заслуженную известность в научном мире.

В этот период в НИИЯФ начал формироваться коллектив учёных-космофизиков, у истоков которого стояли С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков, П.В. Вакулов, Е.В. Горчаков, Н.Л. Григоров, А.И. Лебединский и Ю.И. Логачев. И уже к началу 1960-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), руководимая И.А. Савенко.

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

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

Первые исследования открытого природного феномена — радиационных поясов — показали существование в нём временных и пространственных вариаций потоков частиц. Возник 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 борту научной аппаратурой 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, впервые была 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 около-

земной радиации, вошедших в ряд нормативных документов космической промышленности, а также в первый и последующие сборники *Модели космоса*, издававшиеся в течение многих лет под руководством С.Н. Вернова [5]. Результаты, полученные на спутниках "Электрон", стали существенным вкладом отечественной космофизики в знания о радиационных поясах Земли.

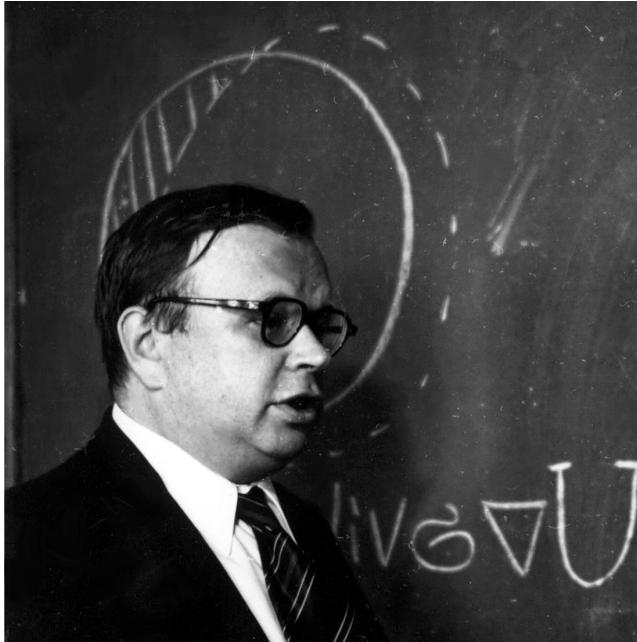
Итогом исследований радиационных поясов в 1960-х годах стало, пожалуй, окончательное понимание их структуры: оказалось, что, по сути, пояса — это единое образование из захваченных в магнитное поле заряженных частиц (в основном протонов и электронов), имеющих очень широкий диапазон энергий — до нескольких МэВ для электронов и нескольких сотен МэВ для протонов. При этом верхняя граница энергии захваченных протонов совпадает с энергией галактических космических лучей в максимуме их интенсивности (т.е. порядка нескольких сотен МэВ). Различие в пространственной структуре протонных и электронных радиационных поясов состояло, по сути, в существовании зазора — локального понижения потоков частиц на расстоянии 2–3 радиусов Земли в экваториальной плоскости. С точки зрения теоретической модели (см. ниже), оказалось, что зазор — это область доминирования потерь для электронной компоненты. Однако, помимо определения механизмов потерь частиц в поясах, модель их формирования должна дать ответ на вопрос: каким образом захваченные частицы приобретают столь значительные энергии?

Первый механизм образования радиационных поясов за счёт нейтронов альбедо космических лучей, предложенный С.Н. Верновым и А.И. Лебединским, мог объяснить существование только внутренней зоны захваченной радиации — протонов с энергиями более чем в несколько десятков МэВ и электронов с энергией 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 1960-х годов. В её основу был положен диффузионный механизм переноса частиц внутрь магнитного поля под действием флуктуаций электрических и магнитных полей в околоземном пространстве. Несколько продуктивен оказался 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 обусловлены изменениями давления солнечного ветра. Частицы, перемещаясь внутрь ловушки попрёк 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 в магнитную ловушку, 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



Борис Аркадьевич Тверской

дальнейшем этот механизм был развит в работах нескольких авторов. Среди этих работ модель, разработанная Б.А. Тверским, существенно отличалась от других [6, 7]. 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 моделей было утверждение о преимущественной реализации механизма радиальной диффузии под действием только флуктуаций магнитного поля и правильная оценка коэффициента диффузии из анализа частоты и амплитуды возмущений магнитного поля типа внезапных импульсов. Первые публикации Б.А. Тверского на эту тему пришли 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). Пространственные распределения протонов разных энергий, полученные в эксперименте на этих и других спутниках, дали хорошее согласие с моделью Б.А. Тверского — моделью 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, предложенным Б.А. Тверским. Тем не менее в ряде работ зарубежных авторов, опубликованных в эти годы, многие экспериментальные данные находились в согласии и с моделью "симбиозного" воздействия флуктуаций как электрического, так и магнитного полей.

Противоречие разрешилось к середине 1980-х годов, когда после проведения серии экспериментов в космосе с целью 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, осуществлявшиеся под руководством Э.Н. Сосновца в течение 1970-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 (Глобальная навигационная спутниковая система), "Космос", "Горизонт" и др. [8].

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 имеют ещё меньшие значения для более тяжёлых частиц. Несмотря на это, изучение тяжёлых ионов имеет существенное значение для физики радиационных поясов, так как оно даёт возможность более углублённо провести тесты различных моделей формирования поясов радиации, чем это позволяет анализ лишь протонной и электронной компонент. Это связано с тем, что коэффициенты переноса в моделях в общем случае могут зависеть как от энергии, так и от типа частиц (т.е. их массы и заряда). В этом смысле тяжёлые ионы — чрезвычайно полезный инструмент для верификации различных моделей. Кроме этого, тяжёлые ионы — своеобразный индикатор источника частиц. Например, присутствие углерода или многозарядных тяжёлых ионов служит достаточно убедительным доказательством в пользу представления о солнечном ветре как об источнике захваченных частиц.

Проведение экспериментов стало возможным начиная с середины 1970-х годов. Первый эксперимент по изучению энергичных тяжёлых ионов в радиационных поясах был осуществлён автором этой статьи с сотрудниками на спутнике "Молния-2". Этот эксперимент, наряду с рядом других, 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 составили 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, действительно описывает большую часть пространственно-энергетической структуры радиационных поясов. Однако флуктуации магнитосферного электростатического поля также принимают участие в формировании поясов радиации. Тем не менее эффективность их воздействия ограничивается лишь малыми энергиями частиц (менее нескольких сотен кэВ) и, возможно, внутренней зоной радиации в области энергий более нескольких МэВ (М.И. Панасюк, 1984 г.) [9].

Таковы в основном были наши знания о радиационных поясах к середине 1980-х годов, не утратившие актуальности и по сей день. Напомним важнейшие из них.

1. Радиационные пояса состоят из электронов и протонов (основные компоненты) с относительно небольшой "добавкой" тяжёлых ионов;

2. Механизмом их формирования является радиальная диффузия под действием флуктуаций как магнитных, так и электрических полей в магнитосфере и распад нейтронов альбедо космических лучей. Магнитная диффузия играет доминирующую роль в радиальном переносе частиц. Распад нейтронов альбедо 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 [10]. 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 как ионы кислорода, углерода, железа, населяющих радиационные пояса, близки к наблюдаемым для солнечной плазмы и энергичных частиц (т.е. к многократно заряженным). Это явилось свидетельством в пользу солнечного происхождения захваченных частиц.

Исследования тяжёлых ионов в радиационных поясах позволили обнаружить ещё один механизм их формирования. Было показано, 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) [11].

Важным для понимания физики радиационных поясов явилось также обнаружение в начале 1990-х годов нового радиационного пояса, состоящего из частиц аномальной компоненты космических лучей (Н.Л. Григоров, М.И. Панаюк и др.) [12]. Оказалось, что однократно заряженные ионы кислорода и других элементов, входящих в состав аномальной компоненты, после перезарядки в верхних слоях атмосферы могут быть захвачены на устойчивые орбиты, образуя популяцию частиц, состоящую из вещества ближней межзвёздной среды.

## 5. Кольцевой ток и модель магнитосферной бури

С самого начала исследований радиационных поясов плазма солнечного ветра, проникающая внутрь магнитосферы, рассматривалась в качестве основного "мате-

риала", пополняющего их. Полностью подтвердить или опровергнуть эту гипотезу могли лишь прямые эксперименты в космосе по измерению ионного состава частиц в области захвата. 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 1970-х годов стало ясно, что основная доля энергии частиц в радиационных поясах сосредоточена в её протонной компоненте с энергиями в несколько десятков кэВ — так называемой области горячей плазмы. Однако прежде измерений протонов со столь низкими энергиями не проводилось. Кроме этого, важно было осуществить эксперимент в районе экваториальной плоскости, где должна наблюдаваться максимальная плотность энергии частиц кольцевого тока. Такие измерения впервые были проведены на спутнике "Explorer-45" и несколько позднее НИИЯФ МГУ на спутниках "Молния-1" и "Молния-2" (Э.Н. Сосновец, М.И. Панаюк, А.С. Ковтюх и др.) [13]. Эти эксперименты действительно подтвердили, что протоны в диапазоне энергий от нескольких десятков кэВ и до 200–300 кэВ — важнейшая компонента кольцевого тока Земли, определяющая его энергетические характеристики. Оказалось, что вариации плотности частиц именно этой компоненты околоземной радиации соответствуют основополагающей формуле Десслера–Паркера–Скопке, связывающей изменение геомагнитного поля и запасённую энергию частиц кольцевого тока.

В отличие от частиц 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 [14] в 1969 г., и характерные особенности динамики кольцевого тока во время магнитных бурь стали дополнительным аргументом в пользу этой модели.

Последующий этап развития знаний о кольцевом токе как о 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 возрастание 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, 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 плотностью энергии магнитного поля во время главной фазы бури. Стало очевидным, что "недостающую" энергию кольцевого тока надо искать в другом источнике — ионосферном, способном поставлять в кольцевой ток частицы, более тяжёлые, чем протоны солнечного ветра. Такие эксперименты были одновременно развернуты в 1984 г. в СССР на геостационарном спутнике "Горизонт" и в США в рамках эксперимента AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers).

Эти эксперименты действительно выявили значительную 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. Отличие последней от солнечных частиц заключается в наличии значительного количества слабоионизованных атомов кислорода. Их относительная концентрация во время магнитных бурь может достигать плотности водорода или даже превышать её.

Существенную роль в изучении динамики солнечной и ионосферной плазмы сыграли эксперименты, выполненные в 1980–1990-х годах на геостационарных спутниках "Горизонт" благодаря многолетнему успешному сотрудничеству института с Научно-производственным объединением (НПО) "Прикладная механика" в г. Красноярске, начавшемуся ещё в начале 1970-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 и др.) [15] и выделить адиабатическую составляющую этих изменений. Последнее важно для идентификации инжекционного механизма (А.С. Ковтюх, 1998 г.) [16]. 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 того, было выявлено, что сами спектры инжектируемых ионов солнечного и ионосферного происхождения могут различаться.

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 [17]. Последние создаются за счёт неустойчивости радиального градиента или за счёт вводимого извне распределения потенциала электрического поля в полярной шапке. Как результат, реализуется следующая картина инжекции ионосферных частиц в кольцевой ток.

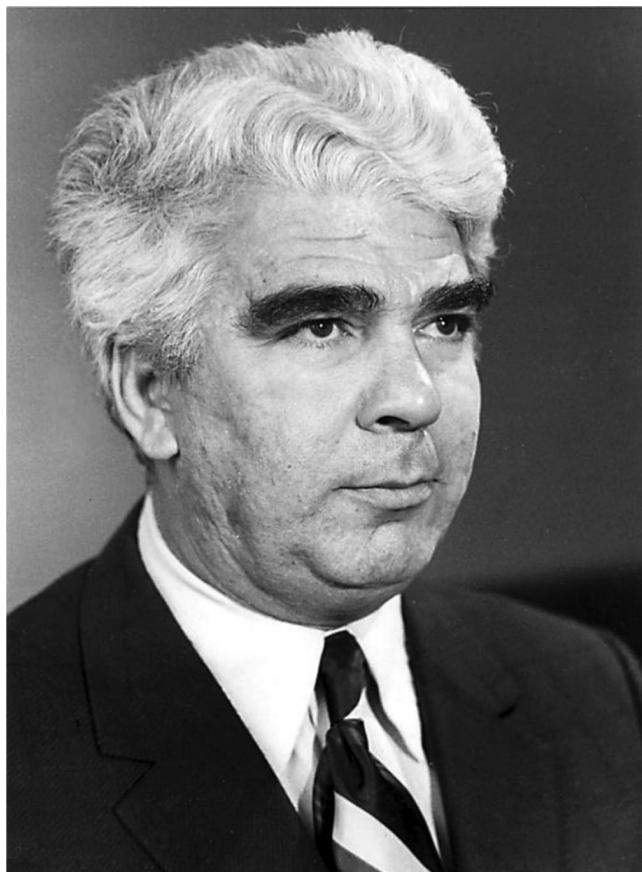
Динамика магнитосферной токовой системы такова, что в области перехода от дипольных линий к вытянутым в хвост магнитным силовым линиям возникают суббури и микросуббури (преимущественно при южном направлении межпланетного магнитного поля), которые сопровождаются появлением горячего плазменного сгустка или пузыря, не находящегося в равновесии с окружающей плазмой. Часть нагретой плазмы инжектируется во

внутреннюю магнитосферу, формируя кольцевой ток, а другая часть — в хвост, образуя 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 нТл) энергии кольцевого тока, состоящего из протонов и кислорода, всё же было недостаточно 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 являются очень существенными и могут даже доминировать (А.С. Ковтюх, 1977 г.) [18].

Проблемы динамики магнитосферных токовых систем получили развитие в НИИЯФ МГУ и в теоретическом плане. В.П. Шабанский в 1960-е годы заложил основы модели магнитосферного поля Земли [19].

В последующем, в 1990-х годах, была создана динамическая ("параболоидная") модель магнитосферы, позволяющая исследовать динамику магнитосферных токовых систем и их вклад в вариации геомагнитного поля, в том числе, и во время сильных магнитных бурь [20]. 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. Созд



Велиор Петрович Шабанский

данная 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 [21]. Этот подход 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 проблемы развития сильных бурь, связанной 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 в плазме 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 сложилось представление о радиационных поясах и кольцевом 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.

## 6. 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, изменение пространственно-энергетической структуры захваченных частиц зависит от коэффициента диффузии, который, в свою очередь, определяется параметрами солнечного ветра в межпланетной среде и зависит как от текущей гелиофизической обстановки (например, от наличия корональных инжекций масс в межпланетной среде), так и от долговременных солнечно-циклических изменений. Поэтому коэффициент диффузии определяется не только амплитудой геомагнитных возмущений, но и их частотой. Коэффициент "магнитной" диффузии, определённый Б.А. Тверским [22], соответствовал средневозмущённой геомагнитной обстановке и тем самым определял "усреднённую" пространственно-энергетическую структуру поясов.

Исследования на спутниках "Электрон", выполненные в середине 1960-х годов (С.Н. Кузнецов, Э.Н. Сосновец, В.Г. Столовский и др.) [23], показали высокую изменчивость внешнего электронного радиационного пояса и относительную стабильность протонного. Обнаруженные диффузионные волны электронов на фазе восстановления бурь демонстрировали скорость перемещения в соответствии со "средневозмущённым" коэффициентом переноса, что подтверждало справедливость концепции "магнитной" диффузии частиц радиационных поясов. Кроме того, стало очевидным, что быстрые изменения потоков электронов могут быть связаны с воздействием на магнитосферу одиночных импульсов давления солнечной плазмы с большой амплитудой, 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 г.) [24], 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 г.) [21].

Однако наиболее значимым по своему проявлению, нарушающим типичную пространственно-энергетическую структуру электронных поясов, стало обнаружение Е.В. Горчаковым в 1977 г. на спутнике "Космос-900" появления ускоренных электронов с энергией  $\approx 15$  МэВ в сердцевине ( $L \approx 3,5$ ) радиационных поясов на фазе восстановления геомагнитных бурь [25]. По сути, это было рождением проблемы генерации релятивистских электронов внутри геомагнитной ловушки, которая изучается и по сей день.

В настоящее время в качестве основного рассматривается механизм резонансного взаимодействия электронов с очень низкочастотными (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 является достаточно медленным для того, чтобы объяснить открытый в 1991 г. на спутнике CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite) эффект резонансного ускорения электронов и протонов в течение нескольких секунд до энергий соответственно  $\approx 15$  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. [26] и рядом зарубежных авторов, возникновением мощных биполярных импульсов геомагнитного поля. В дальнейшем такие эффекты ускорения наблюдались на спутниках "Гранат" и "Метеор" и др. В целом, вариации электронов данного типа укладываются в модель ускорения частиц под действием внезапных импульсов, но с амплитудой и формой, редко наблюдающимися в природе.

Ещё одним важным аспектом проблемы динамики электронов в радиационных поясах являются 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, основывающихся на отечественных экспериментах. В первую очередь — это эксперименты на спутниках серий "Космос", "Интеркосмос", выполненные под руководством С.Н. Кузнецова и Ю.В. Минеева [27]. В основном данная 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 высыпания электронов из поясов как обусловленного 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 г.) [28], и недавно это получило подтверждение в количественных модельных оценках стэнфордской 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 как результата воздействия на её пространственно-энергетическую структуру внешней среды — солнечного ветра, приводящего к геомагнитным возмущениям, и внутренних причин — низкочастотных колебаний электромагнитного поля, в том числе вызванных антропогенным воздействием.

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 предусмотрение 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 внутрь ловушки может осуществляться 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 г.) [29]). Сейчас понятно, что такого рода кратковременные всплески потоков частиц обусловлены их ускорением в хвосте магнитосферы в результате действия механизмов пересоединения или (и) развитием плазменной турбулентности.

Второй сценарий картины инжекции связан с проникновением солнечных энергичных частиц непосредственно внутрь ловушки. Этот механизм сейчас уже достаточно хорошо изучен 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 энергий начали детально исследовать в 1970-е годы на спутниках серии "Космос". Благодаря этим работам был разработан метод диагностики состояния основных структурных образований магнитосферы. Впервые была обнаружена северо-южная асимметрия проникновения солнечных частиц в полярные шапки и получены подтверждения "открытого" характера магнитосферы Земли (Э.Н. Сосновец, Л.В. Тверская и др., 1976 г.) [30].

В общих чертах модель проникновения сводится к пространственным вариациям — широтным смещениям зависящего от жёсткости порога геомагнитного обрезания внутренней границы инжектируемых частиц. Сама жёсткость геомагнитного обрезания "регулируется" амплитудой как 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, Б.Ю. Юшков, 2004 г.) [31].

С точки зрения формирования радиационных поясов, важен вопрос об эффективности последующего захвата этих "свежих" частиц. Если для электронов эта возможность, согласно критерию Альвена, должна реализоваться достаточно эффективно, то для энергичных солнечных протонов соотношение ларморовского радиуса и кривизны силовой линии магнитного поля в области внутренней границы инжекции делает возможность захвата проблематичной. Тем не менее результаты последних лет (данные спутника КОРОНАС-Ф) показывают, что захват протонов (и более тяжёлых частиц) реально существует, но является достаточно редким явлением (Л.Л. Лазутин, 2007 г.) [32]. Установление того, какова реальная физическая модель захвата солнечных частиц и какова их дальнейшая роль в формировании радиационных поясов, — направление текущих и последующих исследований.

## 7. Радиационная обстановка

### в околоземном космическом пространстве и проблема безопасности космических полётов

В 1960 г. в Советском Союзе начали осуществляться первые запуски кораблей-спутников в рамках программы подготовки полёта космонавта. Несмотря на то что орбиты этих космических аппаратов были достаточно низкими (под радиационными поясами), оказалось, что в районе Южной Атлантики существуют области повышенной радиации на небольших высотах, меньших нескольких сотен километров. В постановке экспериментов 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 таковой в сопряжённых областях 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. В итоге образуется радиационная аномалия, безусловно, представляющая потенциальную опасность для пилотируемых космических полётов (С.Н. Вернов, И.А. Савенко, П.И. Шаврин, 1964 г.) [33].

Именно данные первых кораблей-спутников позволили определить дозу радиации на высотах полётов пилотируемых космических аппаратов. Оказалось, что она составляет  $\sim 20$  мрад сут $^{-1}$  под защитами  $\sim 3$  г см $^{-2}$  для орбит высотой  $\sim 400$  км и наклонением менее  $65^\circ$  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.

Кроме того, НИИЯФ МГУ, 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", запущенном в 1961 г., и продолжилось позднее, в 1960-х годах, на спутниках серии "Электрон". С тех пор институт стал лидером по исследованию радиации в околоземном космическом пространстве.

За многие годы исследований радиационных полей в космосе было создано множество нормативных документов для организаций космической промышленности,

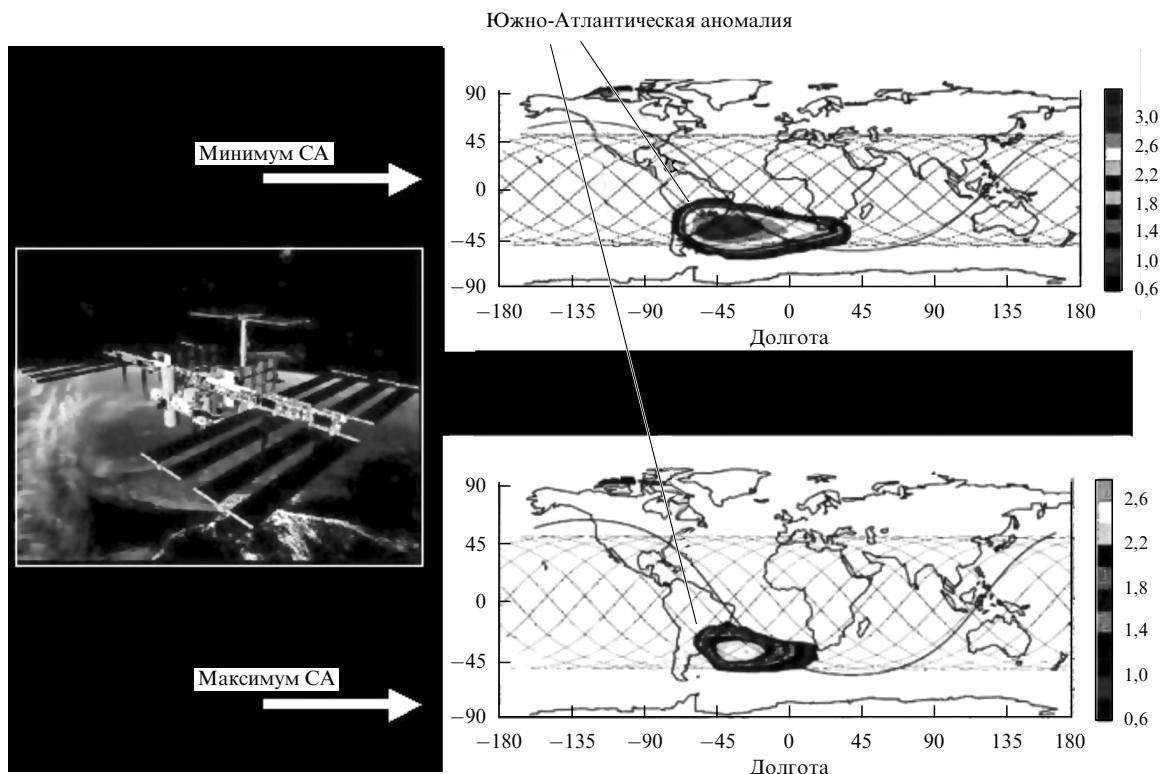
позволяющих учитывать и минимизировать влияние на системы космических аппаратов одного из самых опасных факторов космической среды — радиации.

В итоге многолетних исследований радиационной обстановки в космосе пришло понимание того, что 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 спутниках "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. 4), связанной с изменением плотности и температуры верхней атмосферы (М.И. Панасюк, В.Н. Башкиров, 1997 г.) [34].



**Рис. 4.** Динамика радиационной обстановки в Южно-Атлантической аномалии в течение цикла солнечной активности (СА): дозы радиации в этой области возрастают в минимуме цикла и понижаются в максимуме.

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. С целью измерения доз радиации, обусловленной как галактическими космическими лучами, так и частицами от возможных солнечных вспышек, на спутниках "Прогноз-1, -2" были установлены ионизационные камеры. Во время вспышек 4 и 7 августа 1972 г., которые вошли в число десяти мощнейших вспышек 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.

Следует заметить, что радиационная безопасность космических полётов как направление космической физики имеет длительную историю экспериментальных и теоретических исследований в институте (см. раздел 8). Что касается проблемы изменения радиационной обстановки в связи с генерацией солнечных космических лучей (СКЛ), то к числу важнейших результатов, полученных в этой области, следует отнести:

- исследования проникновения СКЛ во внутреннюю магнитосферу и, в частности, на низковысотные орбиты пилотируемых космических аппаратов, показавшие, что СКЛ — мощный источник радиационных нагрузок во время сильных солнечных вспышек, сопровождающихся геомагнитными возмущениями, наблюдаемыми на различных орбитах, вплоть до низких ( $\approx 400$  км);

- 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., 1986 г.) [35] и вероятностная модель СКЛ (Р.А. Нымник, 1999 г.) [36].

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 1970-х – начале 1980-х годов, именно эта компонента космической радиации вызывает нарушения в работе бортовых электронных систем, связанные с локальными повреждениями в микрообъёмах (эффекты одиночных сбоев), 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 г.) [37].

## 8. Исследования солнечных энергичных частиц

Первые измерения солнечных частиц за пределами атмосферы были проведены на 3-м 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  $\approx 100$  рад. За всю историю космических исследований наблюдалось всего несколько таких мощных вспышек.

В дальнейшем изучение СКЛ в НИИЯФ МГУ проводились на всех космических аппаратах, запущенных к Венере, Марсу и Луне. Межпланетные станции были укомплектованы приборами для регистрации протонов в широком интервале энергий, начиная с  $\approx 100$  кэВ. Измерения столь малозэнергичных 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 данные явились основой для сравнения с результатами различных теорий процессов распространения частиц. Многочисленные эксперименты на межпланетных космических аппаратах дали уникальный протяжённый 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 (Любимов и др.) [38, 39].

Большую роль в изучении СКЛ сыграли эксперименты на спутниках "Прогноз". С 1972 г. по 1985 г. было запущено 10 спутников. На них устанавливалась разнообразная аппаратура, позволявшая изучить как энергетические распределения и состав заряженных солнечных частиц, так и нейтральное излучение (рентгеновское и гамма-излучение) солнечных вспышек. Эти первые комплексные эксперименты по изучению ускоренных частиц солнечного происхождения позволили выявить ряд важных закономерностей (Ю.И. Логачев, Е.И. Дайбог, В.Г. Курт, М.Я. Зельдович, В.Г. Столповский) [40, 41], 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) существование нескольких механизмов распространения частиц в межпланетной среде: диффузионного, без рассеяния, когерентного, а также суперпозиции этих механизмов;

- 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 НИИЯФ МГУ развивались и теоретические изыскания в этом направлении. Прежде всего, они касались возможных механизмов ускорения частиц солнечного происхождения. Ещё в 1961 г. Б.А. Тверской предпринял попытку количественной интерпретации наблюдаемых вариаций СКЛ на основе турбулентного ускорения, приведшей к

удовлетворительному согласию с наблюдаемыми спектрами энергичных частиц. Этот механизм ускорения частиц является не конкурирующим, а скорее дополнительным к предложенному в 1970-х годах другими авторами (Г.Ф. Крымский и др.) статистическому ускорению Ферми — I рода — на фронтах ударных волн. Именно сочетание одновременного действия различных физических механизмов ускорения частиц позволяет приблизиться к осмыслианию сложного характера трансформации 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, остаются актуальными и сейчас.

В последние годы изучение транспорта и ускорения СКЛ стало развиваться на базе экспериментов на низковысотных полярных спутниках серии КОРОНАС (Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца): КОРОНАС-И был запущен в 1991 г., КОРОНАС-Ф — в 2001 г. Последний из этой серии — спутник КОРОНАС-Фотон начал работать в январе 2009 г. (рис. 5).

Эксперимент на спутнике КОРОНАС-Ф предоставил уникальную возможность изучения солнечных экстремальных событий на фазе спада 23-го цикла солнечной активности, сопровождавшихся мощными корональными инжекциями плазмы и генерацией 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 и др., 2004 г.) [42]. Новые факты проливают дополнительный свет на пока не вполне понятную природу этого явления и свидетельствуют о

его тесной связи с подфотосферными слоями и процессами в недрах Солнца, а не только с неустойчивостью магнитного поля и плазмы в верхней атмосфере — хромосфере и короне. Эти факты свидетельствуют, скорее всего, о преимущественном быстром поступлении избыточной свободной энергии из-под фотосферных слоёв Солнца. Таким образом, получены новые весомые аргументы в пользу представлений о нелокальной природе эруптивных процессов на Солнце.

## 9. Исследования атмосферных излучений

Начало оптических наблюдений излучений земной атмосферы в ультрафиолетовом, инфракрасном и видимом диапазонах 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 широколучальную фотокамеру для съёмок полярных сияний. Эту камеру использовали на наземных станциях, расположенных в Арктике и в Антарктиде. Результаты анализа 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 появляются на всех долготах одновременно, образуя своеобразный овал как над северной полярной шапкой, так и над южной. Этот результат был пионерским и на многие годы вперёд 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 фотосъёмок позволили объяснить полярные сияния непосредственным возбуждением молекул и атомов атмосферы 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 (Институт космических исследований 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 ближнем космосе — радиационных поясах — с генерацией полярных сияний в верхней атмосфере.

Современное объяснение природы полярных сияний сводится к тому, что полярные сияния — это одно из проявлений сложного процесса магнитосферно-ионо-

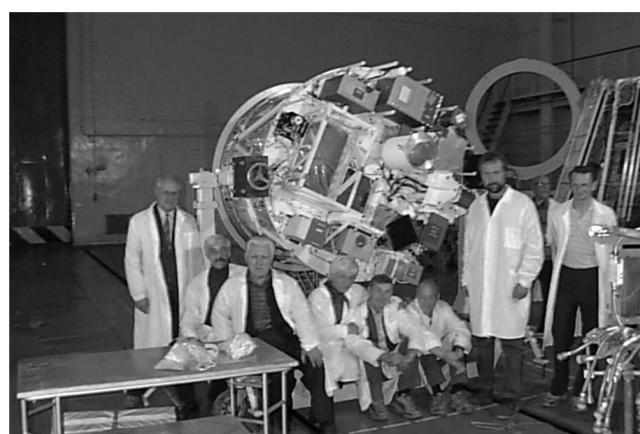


Рис. 5. Подготовка к запуску спутника КОРОНАС-И (1991 г.).

сферного взаимодействия, связывающего в единую цепь множество физических процессов, происходящих в удаленных частях магнитосферы — хвосте и плазменном слое, кольцевом токе, радиационных поясах и ионосфере. Большой вклад в развитие теории магнитосферно-ионосферных связей внесли 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 несет 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 1960-х годах на Автоматической межпланетной станции (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 1960-е годы и начале 1970-х годов, дали первые надежные материалы по широтным вариациям молекулярного кислорода  $O_2$  и озона  $O_3$  [43]. В этих экспериментах, которые, по сути, также были пионерскими, получены важные результаты по широтным и сезонным изменениям этих атмосферных составляющих. В частности, было показано уменьшение содержания озона при усилении солнечной активности. Помимо фундаментального значения для космической физики, исследование электромагнитных эмиссий, излучаемых Землей, имеет также прикладную направленность, связанную с обеспечением безопасности космических полетов (вопросы теплового баланса спутников, их ориентации и др.). Эти исследования также были начаты А.И. Лебединским с сотрудниками в конце 1960-х годов на спутниках серии "Космос".

Изучение свечений атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне было недавно продолжено на полярном спутнике "Университетский-Татьяна", запущенном в январе 2005 г. Основным результатом стало обнаружение в миллисекундном диапазоне вспышек ультрафиолетового излучения с гигантской энергией, достигающей для отдельных событий нескольких сотен мегаджоулей и даже нескольких гигаджоулей ( $10^9$  Дж) в импульсе [44]. Эти явления, которые носят название "транзиентные световые явления", наблюдаются вблизи экватора. Сейчас ясно, что эти интересные атмосферные явления наблюдаются не только как свечение в ультрафиолетовом диапазоне и в диапазоне длин волн, близком к красному, но и сопровождаются гамма-излучением и электромагнитным излучением в радиодиапазоне низкочастотных волн. Не исключена генерация и быстрых нейтронов в результате фотоядерных реакций, так как энергия гамма-квантов достигает в транзиентах величины 10–20 МэВ. Таким образом, мы имеем дело с совершенно новым классом физических явлений в верхней атмосфере, изучению которых в последнее время уделяется большое внимание в различных космических

научных центрах. Природа этих явлений, т.е. физические механизмы генерации, до сих пор окончательно не ясна. Однако одна из моделей (Гуревич, 2001 г.) позволяет представить картину их рождения на основе теории "убегающих" релятивистских электронов, появляющихся в сильных электрических полях молниевых разрядов и распространяющихся вверх вдоль магнитных силовых линий. Являются ли "убегающие электроны" приземных грозовых явлений тем "спусковым" механизмом, который ответствен за появление транзиентных световых явлений в верхней атмосфере, могут показать только будущие эксперименты.

Именно на выявление природы атмосферных транзиентов направлен следующий эксперимент на борту спутника МГУ "Университетский-Татьяна-2", который был запущен 17 сентября 2009 г. На борту спутника установлен уже более сложный комплекс приборов, который позволит расширить наши представления об этом новом атмосферном явлении.

## 10. Заключение

Космофизике уже более 50 лет. За это время коллектив крупнейшего в МГУ института — Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скobel'цына, — работающий в этой области науки, прошел большой путь, ознаменовавшийся достижениями как в экспериментальном, так и в теоретическом познании 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, нуждающиеся в дальнейшем изучении. Мы всегда будем помнить ту выдающуюся роль, которую сыграл Сергей Николаевич Вернов, в становлении этой науки и формировании научного коллектива, добившегося в ней значительных результатов.

У истоков этих исследований и школы учёных стоял замечательный советский физик, один из пионеров изучения космического пространства — Сергей Николаевич Вернов.

## Список литературы

1. Вернов С Н *ЖЭТФ* **19** 622 (1949)
2. Вернов С Н и др. *ДАН СССР* **68** 253 (1949)
3. Вернов С Н и др. "Внешний радиационный пояс Земли", Диплом на открытие № 23 с приоритетом от июня 1958 г.
4. Вернов С Н и др. *ДАН СССР* **124** 1022 (1959) [Vernov S N et al. *Sov. Phys. Dokl.* **4** 154 (1959)]
5. Панасюк М И (Ред.) *Модель космоса Т. 1 Физические условия в космическом пространстве 1* (М.: КДУ, 2007)
6. Тверской Б А *Динамика радиационных поясов Земли* (М.: Наука, 1968)
7. Тверской Б А *Основы теоретической космофизики* (М.: УРСС, 2004)
8. Балашов С В и др. *Космонавтика и ракетостроение* (1) 95 (2003)
9. Панасюк М И *Космические исследования* **22** 572 (1984) [Panasuk M I *USSR Rept. Space* (85-003) 29 (1985)]
10. Ильин В Д, Кузнецов С Н, в сб. *VII Ленинградский междунар. семинар "Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера"*, Ленинград, 25–28 мая 1975 г. (Л., 1975) с. 269

11. Попелявска Б и др. *Космические исследования* **19** 401 (1981) [Popeliavskaya B et al. *Cosmic Res.* **19** 280 (1981)]
12. Grigorov N L et al. *Geophys. Res. Lett.* **18** 1959 (1991)
13. Ковтюх А С, Панасюк М И, Сосновец Э Н *Изв. АН СССР Сер. физ.* **40** 496 (1976)
14. Tverskoy B A, in *Solar-Terrestrial Physics 1970* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 29) (Dordrecht: Reidel, 1972) p. 297
15. Панасюк М И и др. *Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца* **86** 99 (1989)
16. Ковтюх А С *Геомагнетизм и аэрономия* **39** (2) 24 (1999) [Kovtyukh A S *Geomagn. Aeron.* **39** 155 (1999)]
17. Антонова Е Е, Тверской Б А *Геомагнетизм и аэрономия* **36** (2) 1 (1996) [Antonova E E, Tverskoy B A *Geomagn. Aeron.* **36** 145 (1996)]
18. Ковтюх А С, Панасюк М И, Сосновец Э Н *Космические исследования* **15** 559 (1977) [Kovtyukh A S, Panasiuk M I, Sosnovets E N *Cosmic. Res.* **15** 484 (1978)]
19. Шабанский В П *Явления в околоземном пространстве* (М.: Наука, 1972)
20. Alexeev I I et al. *Space Sci. Rev.* **107** 7 (2003)
21. Тверской Б А *Геомагнетизм и аэрономия* **37** (5) 29 (1997) [Tverskoi B A *Geomagn. Aeron.* **37** 555 (1997)]
22. Тверской Б А *Геомагнетизм и аэрономия* **5** 793 (1965)
23. Кузнецов С Н, Столповский В Г, Сосновец Э Н, сб. *Исследования космического пространства: Труды всесоюз. конф., Москва, 10–16 июня 1965 г.* (Отв. ред. Г А Скуридин) (М.: Наука, 1965) с. 420
24. Тверская Л В *Геомагнетизм и аэрономия* **38** (5) 22 (1998) [Tverskaya L V *Geomagn. Aeron.* **38** 571 (1998)]
25. Горчаков Е В и др. *Космические исследования* **19** 571 (1981)
26. Павлов Н Н и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **33** (6) 41 (1993)
27. Глухов Г А и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **24** 821 (1984)
28. Григорян О Р и др. *Инженерная экология* (4) 25 (1996)
29. Вернов С Н и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **12** 785 (1972)
30. Иванова Т А и др. *Космические исследования* **14** 235 (1976)
31. Панасюк М И и др. *Космические исследования* **42** 509 (2004) [Panasyuk M I *Cosmic Res.* **42** 489 (2004)]
32. Лазутин Л Л, Кузнецов С Н, Подорольский А Н *Геомагнетизм и аэрономия* **47** 187 (2007) [Lazutin L L, Kuznetsov S N, Podorol'skii A N *Geomagn. Aeron.* **47** 175 (2007)]
33. Вернов С Н и др. *Космические исследования* **2** 136 (1964)
34. Башкиров В Ф, Панасюк М И, Тельцов М В *Космические исследования* **36** 359 (1998) [Bashkirov V F, Panasyuk M I, Tel'tsov M V *Cosmic Res.* **36** 336 (1998)]
35. Логачев Ю И (Отв. ред.) *Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг.* (М.: ИЗМИРАН, 1986)
36. Nyttmik R A *Radiation Measurements* **30** 287 (1999)
37. Кузнецов Н В, Панасюк М И *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру* (1–2) 3 (2001)
38. Любимов Г П *Космические исследования* **40** 610 (2002) [Lyubimov G P *Cosmic Res.* **40** 565 (2002)]
39. Любимов Г П *Изв. РАН, Сер. физ.* **67** 353 (2003)
40. Дайбог Е И и др. *Космические исследования* **21** 476 (1983)
41. Дайбог Е И и др. *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **51** 1825 (1987)
42. Веселовский И С и др. *Космические исследования* **42** 453 (2004) [Veselovsky I S et al. *Cosmic Res.* **42** 435 (2004)]
43. Лебединский А И и др. *Изв. АН СССР, Сер. Физика атмосферы и океана* **5** 149 (1969)
44. Садовничий В А и др. *Космические исследования* **45** 291 (2007) [Sadovnichiy V A et al. *Cosmic Res.* **45** 273 (2007)]

PACS numbers: **01.60.+q, 01.65.+g, 94.20.wq**  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102k.0210

## С.Н. Вернов и космофизика: Апатиты – Ленинград 1968 – 1983 гг.

В.А. Дергачёв

**1. Из биографии С.Н. Вернова (Ленинградский период)**  
Сергей Николаевич Вернов (11.07.1910 г. — 26.09.1982 г.) — выдающийся советский физик — был первым, кто положил начало программам изучения космических лучей и исследованию космического излучения с помощью первых советских искусственных спутников.

Сергей Николаевич родился в г. Сестрорецке под Ленинградом (Санкт-Петербургом). Его отец был почтовым служащим, а мать была преподавателем математики. После окончания Единой трудовой средней школы в 1926 г. он как "самый лучший ученик выпускного класса" поступил в Механический техникум, а уже через год, в 1927 г., стал студентом первого курса физико-механического факультета Ленинградского политехнического института (ЛПИ) (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), который окончил в 1931 г., получив диплом инженера-физика. Физико-механический факультет ЛПИ, созданный в 1919 г. по инициативе А.Ф. Иоффе, долгое время считался своеобразной кузницей кадров инженеров-физиков. С 1930 г., будучи студентом 4-го курса ЛПИ, С.Н. Вернов начал работать времененным сотрудником Радиевого института, а затем стал аспирантом этого института. Аспиранту предстояло выбрать тему кандидатской диссертации. Как говорил Сергей Николаевич, после встречи в ЛПИ с Д.В. Скobel'цыным, которого он считал своим учителем и который ещё в 1927 г. открыл заряженные частицы в составе космических лучей, естественно, выбор темы диссертации пал на космические лучи, ставшие в основном сферой его интересов до конца жизни.

Сергей Николаевич проработал в Радиевом институте с 1930 г. по 1936 г. В аспирантуре Сергей Николаевич изучал космические лучи с помощью счётчиков Гейгера – Мюллера, написал реферат "Новейшие данные в изучении космических лучей". Он показал, что небольшие по объёму газоразрядные счётчики хороши для проведения как наземных, так и аэростатных исследований космических лучей. Ещё в 1934 г. С.Н. Вернов выступает с докладом на одном из заседаний Всесоюзной конференции по изучению стратосферы, посвящённом проблеме космических лучей.

В этот же период времени С.Н. Вернов был командирован в Главную геофизическую обсерваторию (Ленинград) для изучения космических лучей в стратосфере. В 1934 г. он был включён в состав экипажа стратостата "Осовиахим", но заболел ангиной и полететь не смог. Вместо него в космос отправился его ровесник Илья Усыскин, который трагически погиб в этом полёте. Судьба сохранила Сергею Николаевичу жизнь для свер-

Б.А. Дергачёв. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ  
E-mail: dergach@mail.ioffe.ru