

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-летию со дня рождения академика С.Н. Вернова

Совместное заседание научной сессии
Отделения физических наук Российской академии наук
и Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
16 июня 2010 г.

PACS number: 01.10.Fv

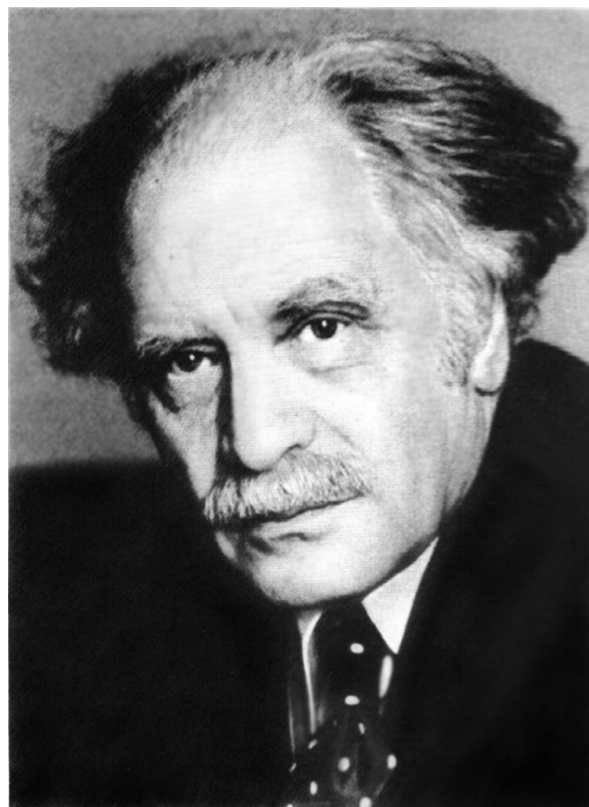
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102e.0187

16 июня 2010 года в Центральной физической аудитории им. Р.В. Хохлова Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова состоялось совместное заседание научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук (РАН), Объединенного физического общества Российской Федерации, Учёного совета физического факультета МГУ, Учёного совета НИИЯФ МГУ, Совета РАН по космосу, Координационного научно-технического совета Федерального космического агентства, Научного совета РАН по комплексной проблеме "Космические лучи" и Научного совета РАН по физике солнечно-земных связей, посвящённое 100-летию со дня рождения академика Сергея Николаевича Вернова.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. Матвеев В.А. (Отделение физических наук РАН, Москва). *Слово о С.Н. Вернове.*
2. Садовничий В.А. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *С.Н. Вернов — учёный Московского университета.*
3. Трухин В.И. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *С.Н. Вернов — профессор физического факультета МГУ.*
4. Панасюк М.И. (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва). *Астрофизика космических лучей до и после 1957 года.*
5. Дергачёв В.А. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *С.Н. Вернов и космофизика: Апатиты — Ленинград 1968 — 1983 гг.*
6. Стожков Ю.И. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *С.Н. Вернов и пионерские исследования космических лучей в стратосфере.*
7. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. (Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра СО РАН, Якутск). *С.Н. Вернов и исследования космических лучей в Якутии.*

Статьи, написанные на основе докладов, публикуются ниже.



Сергей Николаевич Вернов
(11.07.1910 г. — 26.09.1982 г.)

PACS numbers: 01.60. + q, 01.65. + g
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102f.0187

Вступительное слово

О.Г. Рязжская

11 июля 2010 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося отечественного учёного — академика Сергея Николаевича Вернова.

О.Г. Рязжская. Институт ядерных исследований РАН, РФ
E-mail: ryazhskaya@vaxmw.tower.ras.ru

С.Н. Вернов стоял у истоков космической физики, с его именем связан прорыв и крупные достижения отечественной науки в космических исследованиях. Он начал свою деятельность с изучения физики космических лучей. Физика космических лучей — область физики, органически связанная с другими разделами науки. Происхождение космических лучей, процессы, в которых они приобретают колоссальную энергию, — это проблемы, которые немислимо решить без тесного контакта с астрофизикой, радиоастрономией, космологией. Энергетический спектр космических лучей простирается от 0,1 до 10^{11} ГэВ, т.е. существуют частицы, энергии которых в несколько десятков и сотен миллионов раз превышают энергии частиц, генерируемых на современных ускорителях. Исследование взаимодействия таких частиц с ядрами привело к созданию физики элементарных частиц и физики высоких энергий, с которыми физика космических лучей сохраняет тесную связь по сей день. Космические лучи — мост между космосом и микромиром.

Область научных интересов С.Н. Вернова была очень широка. Он автор ряда фундаментальных исследований космических лучей и связанных с ними проблем физики элементарных частиц, плазменных явлений, астрофизики и геофизики, один из основоположников изучения и освоения космического пространства. Впервые в мире Сергей Николаевич создал методику высотных автоматических исследований космических лучей с помощью стратосферного радиозонда. С использованием этой методики он измерил зависимость потоков космических лучей в стратосфере от геомагнитной широты и доказал, что большая часть энергии космических лучей связана с заряженными частицами. Сергей Николаевич детально изучил электронно-фотонную, мюонную и ядерно-активную компоненты космических лучей в стратосфере, измерил восточно-западную асимметрию потоков первичных космических лучей, доказал, что первичная компонента состоит в основном из протонов, выяснил механизм рождения вторичных частиц, получил указания на существование π -мезона. В 1950-х годах под руководством С.Н. Вернова в МГУ была создана уникальная установка для изучения космических лучей сверхвысоких энергий и получен энергетический спектр космических лучей с энергиями до 10^{17} эВ. Экспериментально при энергии 10^{15} эВ в энергетическом спектре космических лучей был обнаружен излом. Это явление было зарегистрировано как открытие. Его авторы — С.Н. Вернов, Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, В.И. Соловьева, А.Т. Абросимов, Б.А. Хренов.

С конца 1940-х годов под руководством С.Н. Вернова были осуществлены многие важные эксперименты сначала на геофизических ракетах, а затем на искусственных спутниках Земли и межпланетных станциях. При запусках первых искусственных спутников Земли С.Н. Вернов с А.Е. Чудаковым, Ю.И. Логачевым, Е.В. Горчаковым и П.В. Вакуловым открыли внешний радиационный пояс Земли и выяснили природу внутреннего пояса. Детальные исследования, выполненные под руководством С.Н. Вернова на искусственных спутниках Земли (серии "Электрон" и "Космос"), привели к пониманию структуры и динамики радиационных поясов Земли и созданию теории их происхождения. Дальнейшее развитие этих исследований под руководством С.Н. Вернова позволило установить ряд фундаментальных закономер-

ностей физики Солнца, межпланетной среды, магнитосферы и ионосферы Земли. С.Н. Вернов — один из основоположников космического материаловедения и изучения проблемы радиационной безопасности при пилотируемых полётах в космос.

С.Н. Вернов был выдающимся организатором науки. Наши предки говорили: "Для получения хорошего результата необходимо найти нужного человека в нужное время". Сергей Николаевич обладал таким даром, и благодаря этому под его руководством были заложены разные направления в космической физике, которые развиваются и по сей день.

PACS numbers: **01.60. + q**, **01.65. + g**, 94.20.wq
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102g.0188

Слово о С.Н. Вернове

В.А. Матвеев

1. Введение

Мы собрались сегодня, чтобы отдать должное памяти выдающегося советского учёного, организатора науки и физического образования академика Сергея Николаевича Вернова.

Имя С.Н. Вернова неразрывно связано с эпохой становления и развития физики космических лучей, ядерной физики и исследования космического пространства.

Мы отдаём должное памяти учёного России, создавшего всемирно известную научную школу, воспитанники и последователи которой активно работают во многих областях современной фундаментальной и прикладной физики как в нашей стране, так и за её рубежами.

Направление научной деятельности Сергея Николаевича определилось в начале 1930-х годов, когда он, являясь аспирантом Радиевого института, занялся изучением космических лучей. В то время лишь немногие могли предвидеть, что исследование космических лучей будет иметь фундаментальное значение для науки и откроет новые страницы в физике элементарных частиц, в физике межпланетного и космического пространства. С первых же лет научной деятельности С.Н. Вернова его работа протекала под руководством академика Д.В. Скобельцына и в тесном контакте с ним, одним из наиболее талантливых учеников которого, как показала жизнь, С.Н. Вернов являлся.

2. Исследования космических лучей в стратосфере

Областью, которую С.Н. Вернов начал интенсивно развивать, стало изучение космических лучей на больших высотах, что требовало постановки экспериментов, исключающих присутствие человека и возможность активного вмешательства в работу аппаратуры. В 1935 г. С.Н. Вернов впервые в мире осуществляет передачу информации о космических лучах с шаровозондов по радио, что открыло широкие перспективы для стратосферных, а в будущем — и для ракетных исследований [1].

В.А. Матвеев. Институт ядерных исследований РАН, РФ
E-mail: matveev@inr.ac.ru

В 1935 г. С.Н. Вернов поступает в докторантуру Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН), где во многом под влиянием С.И. Вавилова и Д.В. Скобелы формируется научный стиль С.Н. Вернова, сочетающий в себе смелый эксперимент с глубоким теоретическим анализом.

С 1945 г. С.Н. Вернов организует широкие стратосферные исследования, создав стратосферную станцию в ФИАНе и специальную группу в Московском государственном университете. Целью этих работ стало выяснение природы космических лучей и механизма их взаимодействия с веществом. Были разработаны уникальные, не имевшие в то время аналогов приборы, которые позволили сделать вывод о протонной природе основной части первичных космических лучей. Благодаря многолетним целенаправленным работам С.Н. Вернова и его учеников задача о выяснении природы первичных космических лучей и механизма рождения вторичных компонент была успешно решена. Результаты получили широкое международное признание и многочисленные подтверждения.

За выдающиеся достижения в исследовании космических лучей в стратосфере Сергей Николаевич Вернов в 1949 г. был удостоен Государственной премии I степени, а в 1953 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР.

При непосредственном участии С.Н. Вернова в СССР была создана сеть станций непрерывной регистрации космических лучей, выполняющая обширный цикл исследований. С 1958 г. в ряде пунктов СССР, а с 1963 г. — и в Антарктиде проводились регулярные ежедневные запуски шаров-зондов. Собранные таким способом уникальные данные позволили обнаружить гигантские всплески интенсивности космических лучей в стратосфере после солнечных вспышек и выяснить детальную картину влияния 11- и 22-летнего циклов солнечной активности на космические лучи, приходящие из Галактики [2–4]. За цикл работ по изучению космических лучей в страто-

сфере группа сотрудников С.Н. Вернова была удостоена в 1976 г. Ленинской премии.

3. Создание установок по исследованию широких атмосферных ливней

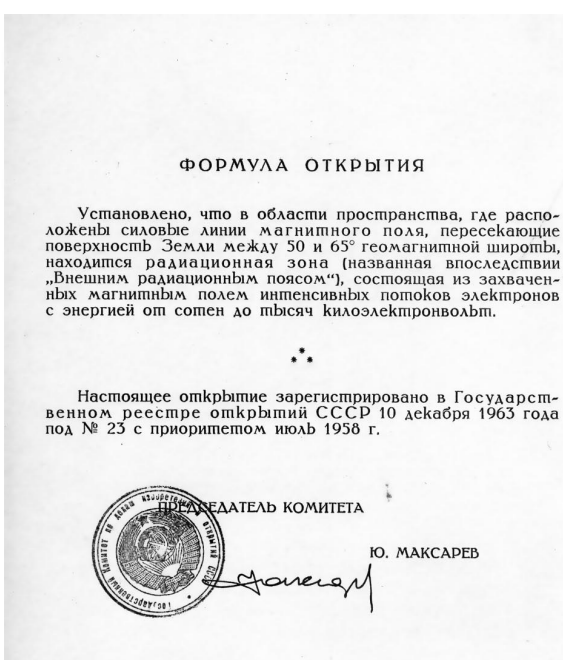
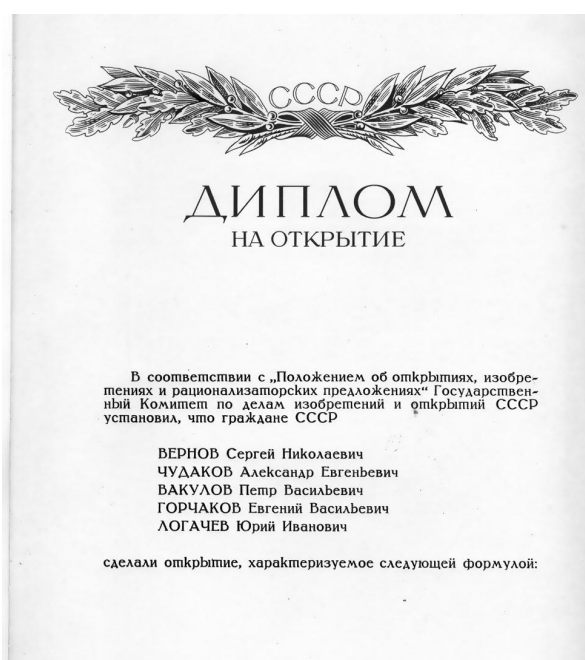
С.Н. Вернов являлся не только видным учёным с широким, разносторонним кругозором, но и крупным организатором, умевшим сплотить научные коллективы и нацелить их на выполнение задач по основным направлениям исследования космических лучей.

В конце 1950-х годов для изучения взаимодействия с веществом частиц со сверхвысокими энергиями (10^{14} – 10^{17} эВ) в МГУ под руководством С.Н. Вернова был создан специальный лабораторный корпус, оборудованный уникальной аппаратурой. Наиболее фундаментальное значение имеет обнаруженное изменение крутизны энергетического спектра космических лучей в интервале 10^{15} – 10^{16} эВ [5]. Этот результат был зарегистрирован как открытие, значение которого и сегодня велико для познания протекающих в глубоком космосе астрофизических процессов.

В 1970-х годах под общим руководством С.Н. Вернова в Якутии была создана новая гигантская (размещённая на площади около 20 км²) установка для регистрации широких атмосферных ливней, позволяющая проводить исследования частиц предельно высоких энергий (10^{17} – 10^{20} эВ) [6]. За исследования первичного космического излучения сверхвысокой энергии группе сотрудников в 1982 г. была присуждена Ленинская премия.

4. Исследования космических лучей с помощью советских искусственных спутников и межпланетных станций

Дарования С.Н. Вернова как крупного учёного и организатора проявились особенно ярко при исследованиях космических лучей с помощью советских искусственных спутников Земли (ИСЗ) и межпланетных станций. Уже



Диплом на открытие внешнего радиационного пояса Земли.

при запусках первых советских спутников было сделано крупнейшее открытие — обнаружен внешний радиационный пояс Земли [7]. Изучение радиационных поясов Земли имеет первостепенное значение не только для исследования физических свойств межпланетного пространства, но и для ряда теоретических и практических задач современной геофизики. За открытие внешнего радиационного пояса Земли и изучение его свойств С.Н. Вернов в 1960 г. был удостоен Ленинской премии.

В дальнейшем под руководством С.Н. Вернова была осуществлена программа детальных исследований радиационных поясов и магнитосферы Земли на ИСЗ серии "Электрон". Эти исследования уже к 1968 г. позволили выяснить полную картину структуры и динамики радиационных поясов и создать теорию их происхождения. Изучение радиационных поясов Земли, осуществлённое под руководством С.Н. Вернова, стало выдающимся достижением советской науки. В 1968 г. С.Н. Вернов избирается действительным членом АН СССР.

5. Развитие физики высоких энергий

С.Н. Вернов обладал удивительным чувством нового.

В конце 1970-х годов при поддержке М.А. Маркова и А.А. Логунова в Научно-исследовательском институте ядерной физики (НИИЯФ) МГУ началось строительство нового корпуса — корпуса Высоких энергий. С.Н. Вернов хорошо чувствовал, что начинался новый этап развития физики — создание новых ускорителей и крупных установок и получение с их помощью фундаментальных результатов при энергиях более 10^{15} эВ. Обработка этих результатов требовала специального оснащения и высококвалифицированного персонала. С.Н. Вернов сумел воплотить свой замысел в жизнь, и сейчас в НИИЯФ МГУ работает коллектив научных сотрудников, экспериментаторов и теоретиков, численностью 150 человек, которые принимают активное участие в экспериментах на крупнейших ускорителях мира, в частности на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе [8].

6. Заключение

Много сил и энергии С.Н. Вернов уделял научно-организационной и общественной работе. Он являлся директором НИИЯФ МГУ, заведующим кафедрой космических лучей физического факультета МГУ, заместителем академика-секретаря Отделения ядерной физики АН СССР, председателем научного Совета по проблеме "Космические лучи", председателем комиссии по ядерной физике и космическим лучам Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР, председателем Московского комитета защиты мира и др.

Отмечая столетие со дня рождения Сергея Николаевича, мы вспоминаем славные страницы нашей истории, истории академической науки и её тесную связь с вузовской наукой, это именно то сотрудничество, которое принесло богатые плоды — выдающиеся научные результаты. Эта тесная связь сохраняется и сейчас в современных экспериментальных проектах, где вместе, бок о бок, работают сотрудники МГУ и РАН.

С.Н. Вернов пользовался очень большим авторитетом как среди своих непосредственных сотрудников, так и среди коллег по Академии наук. Этот авторитет был основан не только на его высоком профессионализме, но и на его человеческих качествах. Дружеские отношения

связывали его со многими выдающимися учёными: С.Н. Вавиловым, Д.В. Скобельцыным, М.А. Марковым, Н.И. Боголюбовым, М.В. Келдышем, Б.М. Понтекорво, А.А. Логуновым, Н.А. Добротиним, А.Е. Чудаковым, Г.Т. Зацепиным.

Мне довелось быть свидетелем встреч С.Н. Вернова с Н.Н. Боголюбовым, М.А. Марковым, А.М. Балдиным, Д.И. Блохинцевым и другими. На меня огромное впечатление



С.Н. Вернов (слева) с академиком А.А. Логуновым (ректором МГУ) и профессором И.М. Терновым (1980 г.).



С.Н. Вернов (справа) с академиками Н.Н. Боголюбовым, А.Н. Тавхелидзе, В.Г. Кадышевским.



С.Н. Вернов (справа) с академиком М.А. Марковым.



С.Н. Вернов (слева) с академиком Г.Б. Христиансенем.



С.Н. Вернов (слева) с академиком Б.М. Понтекоровым.

чтение произвело их глубокое взаимное уважение и в то же время исключительно тёплые дружеские отношения. Все они принадлежали одной эпохе — эпохе великих научных открытий на фоне непростой, очень трудной, порой трагической истории страны и её народа и тех испытаний, которые выпали на их долю. И они в равной мере принадлежали к той категории людей, для которых служение науке было неотделимо от служения своей стране.

Труды С.Н. Вернова на всех этапах его творческой деятельности имели первостепенное значение для развития физики космических лучей и физики космического пространства. Неудивительно, что его имя широко известно не только в нашей стране, но и за рубежом и оно везде пользуется заслуженным авторитетом. За 50 лет научной деятельности С.Н. Верновым создана большая и активно работающая школа физиков — специалистов по всем разделам науки о космических лучах, насчитывающая несколько десятков докторов и кандидатов наук. В итоге каждого этапа его исследований возникали научные коллективы, дальнейшая работа которых открывала ряд новых научных направлений и приводила к решению многих важных задач. Достижения учёных этой школы дважды были отмечены Ленинской премией, четырежды — Государственной премией СССР. А сам Сергей Николаевич Вернов был удостоен высокого звания Героя Социалистического Труда.

Имя С.Н. Вернова составляет гордость и славу физической науки нашей страны, гордость и славу нашей Академии наук и её Отделения физических наук.

Изучение научного наследия С.Н. Вернова и его учеников — это хорошая школа для молодого поколения учёных, ищущих своё место в современной науке, направленной на познание фундаментальных законов мироздания.

В статье использованы фотоснимки Ю.А. Туманова, Д.В. Бобкова, А.Т. Абросимова и семейного фотоархива Е.С. Верновой.

Список литературы

1. Vernoff S *Phys. Rev.* **46** 822 (1934); *Nature* **135** 1072 (1935)
2. Vernov S N et al., in *Proc. of the 9th Intern. Cosmic Ray Conf.: ICRC, London Vol. 1* (1965) p. 517
3. Вернов С Н и др. *Изв. АН СССР Сер. физ.* **39** 316 (1975) [Vernov S N et al. *Bull. Acad. USSR, Phys. Ser.* **39** (2) 63 (1975)]
4. Вернов С Н и др., в сб. *VII Ленинградский междунар. семинар "Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера"*, Ленинград, 25–28 мая 1975 г. (Л., 1975) с. 389
5. Куликов Г В, Христиансен Г Б *ЖЭТФ* **35** 635 (1958) [Kulikov G V, Khristiansen G B **8** 441 (1959)]
6. Ефимов Н Н и др. *Проблемы физики космических лучей* (Сост. Е В Горчаков) (М.: Наука, 1987)
7. Вернов С Н и др. "Внешний радиационный пояс Земли", Диплом на открытие № 23 с приоритетом от июня 1958 г., по дате докл. на V Ассамблее Междунар. геофиз. года
8. *В глубь материи. Физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве* (М.: Этерна, 2009) с. 576

PACS numbers: **01.60. + q, 07.87. + v, 94.20. – y**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102h.0191

С.Н. Вернов — учёный Московского университета

В.А. Садовничий

11 июля 2010 г. исполнилось 100 лет со дня рождения академика Сергея Николаевича Вернова — учёного с мировым именем, Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской и Государственной премий СССР, одного из основателей, а с 1960 г. по 1982 г. — директора Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ) и заведующего отделением ядерной физики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. С его именем связаны эпохальные достижения нашей страны в осуществлении атомного проекта, освоении космоса, познании фундаментальных свойств материи.

Ядерная физика, физика космоса и физика высоких энергий совершили во второй половине XX в. гигантский качественный скачок в своём развитии, что нашло отражение в появлении многих других научных и технологических направлений. Это была эпоха расцвета фундаментальных и прикладных научных исследований во всём мире, а в нашей стране — в особенности. Сергей Николаевич Вернов именно в такое время оказался как нельзя более нужен нашему государству, Московскому университету. Он более 25 лет был, по образному

В.А. Садовничий. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, РФ
E-mail: info@rector.msu.ru

выражению Георгия Борисовича Христиансена, выдающимся дирижёром научных исследований по физике космоса и структуре материи. Во многом благодаря С.Н. Вернову Московский университет и сейчас имеет большие достижения в этих научных областях.

Вместе с Д.В. Скобелевым С.Н. Вернов, будучи в 1946–1960 гг. заместителем директора, а с 1960 г. по 1982 г. директором НИИЯФ, внёс огромный вклад в создание и развитие института и отделения ядерной физики физфака МГУ, в подготовку кадров для советского атомного проекта и исследования космоса.

Годы деятельности С.Н. Вернова в МГУ ознаменовались началом, а затем широким развёртыванием работ по исследованию космоса с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) и космических ракет. Непосредственные контакты С.Н. Вернова с С.П. Королёвым, Главным конструктором отечественных ракет, начались уже в 1947 г., а в 1956 г. НИИЯФ МГУ был включён в список институтов, которые будут принимать участие в научных экспериментах на ИСЗ. С.Н. Вернов был назначен научным руководителем по исследованию космических лучей на ИСЗ.

Первая встреча с конструкторами проектируемого ИСЗ определила исходные данные для наших приборов (в качестве детекторов излучения предполагалось использовать газоразрядные счётчики): вес прибора — не более 2,5 кг; энергопотребление — 2 Вт; телеметрия — один "сухой" канал с частотой 50 Гц.

Газоразрядные счётчики в приборах сопрягались с регистрирующей электроникой, в качестве которой в то время можно было выбрать три варианта: маломощные электронные лампы, безнакальные тиратроны и полупроводниковые элементы. Электронные лампы были отвергнуты сразу ввиду их значительного электропотребления. Очень много усилий было потрачено на разработку безнакальных тиратронов, на них даже был собран макет, подходящий по весу и электропотреблению, но совершенно непригодный из-за неустойчивой работы самих тиратронов. Единственным выходом было использование полупроводниковых элементов.

Необходимо отметить, что полупроводниковая техника, которая в то время (1957 г.) ещё только начинала развиваться, была мало знакома экспериментаторам. Но тем настойчивее Сергей Николаевич добивался замены тиратронов полупроводниковыми диодами и триодами. Его надежды оправдались с лихвой: полупроводниковые схемы работали стабильно и надёжно в широком интервале температур, не боялись вибрации. На заводе "Физприбор" были изготовлены первые приборы, готовые к отправке в космос. Оставалось только провести испытания на длительность их работы. Отметим, что созданный в 1957 г. в НИИЯФ прибор регистрации излучения использовался затем более 25 лет и зарекомендовал себя с самой хорошей стороны. Даже сейчас можно найти собранные тогда схемы и убедиться, что они работают.

4 октября 1957 г. весь мир узнал, что в нашей стране запущен 1-й ИСЗ. В силу строжайшей секретности даты запуска первого спутника готовые к запуску приборы, разработанные под руководством С.Н. Вернова, не были установлены на спутнике. Представляете себе состояние Сергея Николаевича: спутник несёт 50 кг аккумуляторов, сообщая только, что он жив — "бип-бип-бип", а НИИЯФ имеет готовый прибор весом всего 2,5 кг, и он остался на Земле!

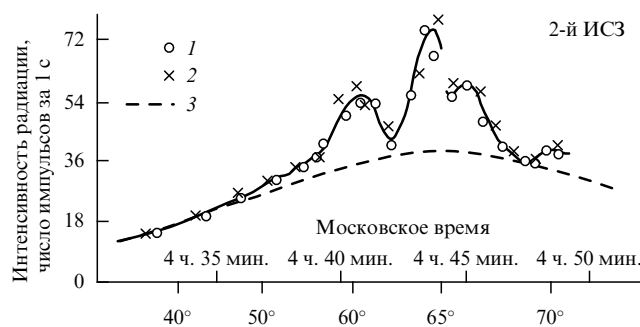


Рис. 1. Данные измерений на 2-м ИСЗ космической радиации при одном из пролётов над северными районами СССР: штриховая кривая — среднее значение, кружки — показания прибора 1, крестики — прибора 2.

После 4 октября ситуация изменилась коренным образом. Уже на втором ИСЗ, запущенном 3 ноября 1957 г., для регистрации космического излучения были установлены два газоразрядных счётчика с полупроводниковой электроникой, изготовленные в НИИЯФ МГУ. Была проведена первая регистрация космических лучей на недостижимых ранее высотах и обнаружено значительное возрастание интенсивности регистрируемых частиц на высоких широтах (рис. 1). 15 мая 1958 г. был запущен 3-й советский ИСЗ, на котором вновь работали приборы, изготовленные в НИИЯФ. В результате С.Н. Верновым с сотрудниками было окончательно установлено наличие двух радиационных поясов: внутреннего, открытого американцами в феврале-марте 1958 г. с помощью аппаратуры, установленной на спутниках "Эксплорер", и внешнего, открытого учёными МГУ с приоритетом — июль 1958 г. В 1960 г. С.Н. Вернов и А.Е. Чудаков за открытие внешнего радиационного пояса Земли были удостоены Ленинской премии.

Изучение радиационных поясов шло в условиях очень жёсткой конкуренции с американскими учёными в очень коротком временном интервале — промежуток между запусками второго и третьего спутников составил всего полгода! Тем почётнее было признание научных заслуг НИИЯФ МГУ и С.Н. Вернова в открытии и интерпретации радиационных поясов. Летом 1959 г. в МГУ



Диплом Лауреата Ленинской премии, выданный С.Н. Вернову.



С.Н. Вернов (четвёртый слева) с участниками Международной конференции по космическим лучам в Московском университете (1959 г.).

состоялась Международная конференция, посвящённая физике космических лучей, на которой присутствовало много иностранных учёных, в том числе представительная американская делегация. На этой конференции С.Н. Вернов представил научные результаты советских исследователей. Наибольший интерес вызвал доклад С.Н. Вернова о полёте автоматической станции "Луна-1", осуществившей первое в мире соприкосновение регистрирующей аппаратуры (вновь изготовленной в НИИЯФ) с поверхностью Луны.

Под руководством С.Н. Вернова в НИИЯФ МГУ в 1957–1982 гг. была спроектирована, изготовлена и отправлена в космос аппаратура, установленная затем на 140 спутниках и космических ракетах. К настоящему времени это число возросло до 400. Это позволило С.Н. Вернову и коллективу института внести существенный вклад в изучение различных явлений (радиационные пояса, магнитосфера Земли и других планет, полярные сияния, галактические и солнечные космические лучи, аномальная компонента космических лучей, активные процессы на Солнце, в гелиосфере и т.д.), происходящих в космосе.

Человек кипучей энергии, энтузиаст науки, безгранично ей преданный, С.Н. Вернов обладал острым чувством нового в науке, редкой целеустремлённостью. Его талант и напористый, боевой характер способствовали развёртыванию работ по многим направлениям, прямо не связанным с исследованиями на ИСЗ: страто-

сферные исследования; изучение широких атмосферных ливней (ШАЛ); дозиметрические измерения в космическом пространстве, положившие начало новой ветви науки — космической радиометрии; работы в области космического материаловедения и в области физики высоких энергий. Особенно следует отметить его усилия, направленные на развитие в НИИЯФ МГУ исследований по физике высоких энергий: строительство нового корпуса института, создание в нём уникального просмотрового центра, установление научных связей с крупнейшими мировыми центрами, имеющими ускорители частиц высоких энергий и обеспечивающими НИИЯФ МГУ просмотровым материалом. Всё это позволило Московскому университету получить важные научные результаты в области физики высоких энергий, включая недавнее открытие топ-кварка. Эти результаты признаны мировой научной общественностью и определяют ключевые позиции МГУ в исследовании фундаментальных свойств материи в престижных международных проектах в ЦЕРНе (Женева, Швейцария), КЕК (Цукуба, Япония), Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL) (Чикаго, США), Национальной лаборатории ускорителей им. Т. Джефферсона (TJNAF) (Ньюпорт-ньюс, США), в исследовательских центрах Германии: ДЕЗИ (DESY) (Гамбург) и ФАИР (FAIR) (Дармштадт), в Национальном институте ядерной физики (INFN) (Генуя, Италия), Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна, Россия), Институте физики высоких энергий (Протвино, Россия) и других крупнейших научных центрах (рис. 2). В 2009 г. в ЦЕРНе введён в эксплуатацию Большой адронный коллайдер (LHC) — крупнейший в мире научно-исследовательский комплекс. МГУ — один из ведущих университетов мира — участвует в этом уникальном научном проекте XXI в. в трёх ключевых экспериментах: CMS (Compact Muon Solenoid), ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) и LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment).

Сергей Николаевич был исключительно яркой личностью, что находило отражение во всей его деятельности. Он умел создавать вокруг себя атмосферу творчества, мобилизовать большие коллективы на решение наиболее важных задач. Нас, его коллег, всегда восхищала его способность концентрировать духовные и материальные усилия на самом существенном. И это приносило свои плоды. Многие из работ, которые были начаты и проводились по его инициативе, завершались



Рис. 2. Международные связи НИИЯФ в исследованиях по физике высоких энергий.



Сергей Николаевич Вернов на Международной конференции по космическим лучам (Джампур, Индия, 1963 г.).

научными открытиями, установлением новых закономерностей.

Одной из основных черт Сергея Николаевича было стремление тесно увязать решение фундаментальных проблем науки с насущными задачами практики. Сделанные С.Н. Верновым и его учениками приоритетные открытия позволили НИИЯФ МГУ получить важнейшие методические и технологические результаты. Многие из этих результатов сейчас используются в качестве отечественных и международных стандартов для описания космической среды и её воздействия на космические аппараты, что очень важно для выработки критериев радиационной безопасности космических полётов.

Приборами радиационного контроля околоземного пространства, разработанными и серийно изготавливаемыми в НИИЯФ, оснащена Международная космическая станция, многие спутники системы ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), а также спутники специального назначения.

В НИИЯФ МГУ разработаны и изготовлены лётные комплекты научной аппаратуры для российско-индийского университетского спутника YouthSat, аппаратура для научных экспериментов по исследованию высыпаний магнитосферных электронов, космических лучей и сверхвысоких энергий ТУС (Трековая УСтановка), РЭЛЕК и НУКЛОН, включённых в Федеральную космическую программу РФ.

Последователями и учениками С.Н. Вернова созданы уникальные наземные установки для исследования космических лучей сверхвысоких энергий мирового уровня ("Тунка-133", ШАЛ МГУ). Ими сформирована новая научная дисциплина — космическое материаловедение. Получены фундаментальные знания о поведении материалов в условиях космического пространства, методах их защиты от неблагоприятного воздействия космической среды и технологиях создания перспективных материалов для космической техники, включая наноматериалы.

Сегодня Московский университет совершает уникальный прорыв в будущее, реализуя программу развития, разработанную по поручению президента и правительства РФ на 2010–2020 гг. Одно из важнейших прорывных направлений этой программы — интеграционное научное направление "Исследование структуры материи и космоса, применение космических технологий".

Спустя почти пятьдесят лет после первых шагов человека в космос в НИИЯФ при участии механико-математического факультета МГУ был создан первый спутник "Университетский-Татьяна", запуск которого 21 января 2005 г. был приурочен к 250-летию Московского университета. За два года полёта спутника проведён большой цикл исследований солнечной активности и получена уникальная информация по физике транзитных свечений атмосферы в верхней атмосфере Земли (рис. 3). 17 сентября 2009 г. осуществлён запуск ИСЗ "Университетский-Татьяна-2". Отделение третьей ступени ракеты-носителя впервые можно было наблюдать в режиме реального времени телескопом-роботом системы МАСТЕР (Мобильная автоматизированная система телескопов-роботов), разработанным учёными Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ и Московским объединением "Оптика", с уникальными характеристиками, превосходящими характеристики западных аналогов (рис. 4). На очереди — запуск ИСЗ "Михайло Ломоносов", приуроченный к 300-летию со дня рождения великого русского учёного, основателя Московского университета. Фактически дан старт целой флотилии спутников Московского

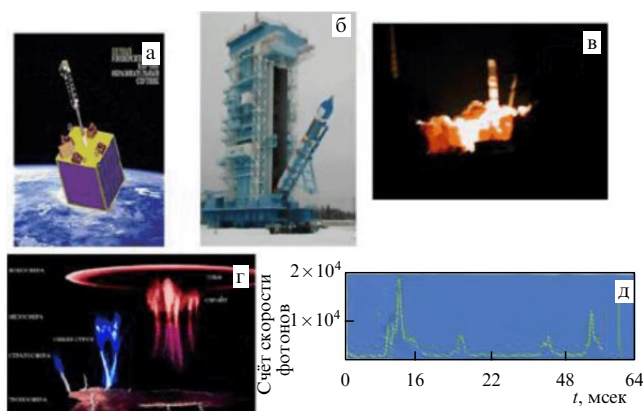


Рис. 3. Первый спутник Московского университета "Университетский-Татьяна". Запуск 21 января 2005 г. Космодром Плесецк: (а) общий вид спутника, (б) ракета-носитель устанавливается на старте, (в) запуск, (г) возможные транзитные свечения в стратосфере Земли, (д) вспышки излучения, зафиксированные приборами спутника.



Рис. 4. Спутник Московского университета "Университетский-Татьяна-2". Запуск 17 сентября 2009 г. Космодром Байконур: (а) общий вид спутника, (б) ракета-носитель с логотипом МГУ, (в) за несколько часов до старта, (г) запуск, (д) (разделение спутней ракеты (телескоп-робот МАСТЕР), (е) транзитные вспышки, зарегистрированные на ИСЗ "Университетский-Татьяна-2".

университета. Эти достижения ещё раз позволяют высоко оценить научный задел, созданный С.Н. Верновым и его учениками.

Сергей Николаевич был не только крупным и талантливым учёным, но и учителем в самом высоком и благородном смысле этого слова. С.Н. Вернов организовал в рамках отделения ядерной физики физического факультета МГУ подготовку исследователей космоса и создал большую научную школу, плодотворно работающую в настоящее время. Многие и многие сотни специалистов с полным основанием считают себя его учениками. Они учились на его лекциях, в совместной работе, на семинарах, к проведению которых он всегда относился с большим вниманием. Понятие "школа Вернова" значительно шире, чем круг его учеников в Московском университете. Тем не менее и этот круг включает в себя замечательных учёных — исследователей космоса. Среди них три академика (Г.Т. Зацепин, Г.Б. Христиансен, А.Е. Чудаков), 45 докторов наук, 225 кандидатов наук.

С.Н. Вернов успешно сочетал плодотворную научную деятельность с научно-организационной работой, являясь заместителем академика-секретаря Отделения ядерной физики АН СССР, председателем Научного совета по комплексной программе "Космические лучи", председателем секции ядерной физики Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР, членом редколлегии журналов *Ядерная физика*, *Известия РАН. Серия физическая*, *Геомагнетизм и аэрономия*, *Вестник Московского университета (Серия "Физика")*, членом ряда учёных и научных советов.

Характеристика С.Н. Вернова будет неполной, если не сказать о его большой деятельности как популяризатора науки вообще и достижений учёных Московского университета в особенности. Его лекции, научно-популярные статьи печатались во многих центральных газетах и научно-популярных журналах.

Сергей Николаевич Вернов был жизнерадостным и обаятельным человеком. Присущие ему доброта и отзывчивость, стремление помочь в трудную минуту снискали к нему общее уважение и любовь. Мне посчастливилось несколько лет жить рядом с ним в Главном здании МГУ: его квартира была на пятом этаже, моя —

на четвёртом. Большая дружба связывала меня с его первым заместителем в НИИЯФ профессором И.Б. Тепловым, с которым мы часто обсуждали проблемы института, и во всех этих обсуждениях неизменно проявлялось мнение Сергея Николаевича по любому вопросу. С другой стороны, и сам Сергей Николаевич никогда не решал важные вопросы, не согласовав их предварительно с мнением И.Б. Теплова.

Сергей Николаевич Вернов скончался 26 сентября 1982 г. и был похоронен на Новодевичьем кладбище.

Для увековечивания памяти о С.Н. Вернове у входа в здание НИИЯФ на Ленинских горах, где он работал с 1953 г. по 1982 г., установлена памятная доска, аудитория 5-18 физического факультета названа аудиторией им. С.Н. Вернова, выдающиеся студенты физфака МГУ награждаются стипендией его имени, в НИИЯФ МГУ регулярно проводится конкурс научных работ молодых учёных им. С.Н. Вернова. Одна из улиц в г. Дубне Московской области и улица в г. Сестрорецке Ленинградской области — родине С.Н. Вернова — носят его имя.

Московский университет — ведущий научный центр страны, который внёс весомый вклад в развитие фундаментальной науки и в становление самого востребованного научного университетского образования. Сергей Николаевич Вернов относится к плеяде учёных, составляющих гордость Московского университета. Его научный и жизненный путь — ярчайший пример для воспитания нового поколения молодых исследователей, призванных служить Отечеству.

PACS numbers: **01.60. + q, 01.65. + g**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102i.0195

Сергей Николаевич Вернов (к 100-летию со дня рождения)

В.И. Трухин

11 июля 2010 г. исполнилось 100 лет со дня рождения академика Сергея Николаевича Вернова — учёного с мировым именем, одного из основателей Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) МГУ и отделения ядерной физики (ОЯФ) физического факультета МГУ.

Создание НИИЯФ и ОЯФ имеет краткую предысторию. В 1940 г. по инициативе академиков С.И. Вавилова и Д.В. Скобельцына на физическом факультете МГУ была образована кафедра "Атомное ядро и радиоактивность", которую возглавил Д.В. Скобельцын, а профессорами кафедры стали С.Н. Вернов и И.М. Франк. С 1943 г. С.Н. Вернов переходит на основную работу на физический факультет МГУ в качестве профессора кафедры Д.В. Скобельцына и до последних дней жизни С.Н. Вернова его педагогическая и научная деятельность были связаны с Московским университетом.

В 1940 г. и 1943–1945 гг. С.Н. Вернов для студентов кафедры "Атомное ядро и радиоактивность" читает

В.И. Трухин. Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, РФ
E-mail: trukhin@phys.msu.ru

лекции по физике космических лучей, с 1944 г. возглавляет кафедральную лабораторию атомного ядра — первую в МГУ лабораторию по ядерной физике. В этой лаборатории С.Н. Вернов развернул исследования космических лучей в стратосфере, а профессором Л.В. Грошевым и доцентом В.С. Шпинелем впервые в СССР были начаты работы по изучению структуры атомного ядра методами β - и γ -спектроскопии. В этих исследованиях активное участие стали принимать студенты кафедры.

В 1946 г. в МГУ на базе кафедры и кафедральной лаборатории Специальным постановлением Совнаркома СССР был создан Научно-исследовательский центр подготовки специалистов для работ по советскому атомному проекту — Институт атомного ядра, получивший в открытых документах название НИФИ-2 МГУ, а затем с 1956 г. — современное название НИИЯФ МГУ. В течение двух лет, с 1946 г. по 1948 г., все основные обязанности по организации работы института и кафедры, получившей название "Строение вещества", легли на плечи С.Н. Вернова как заместителя директора института, так как директор института Д.В. Скобельцын был командирован правительством СССР в США в качестве представителя СССР в Организации объединенных наций.

Д.В. Скобельцын и С.Н. Вернов в эти годы стали осуществлять поставленную перед ними задачу создания института как крупного университетского ядерно-физического центра для проведения фундаментальных ядерно-физических исследований и подготовки кадров.

Для работ по советскому атомному проекту требовалось существенно увеличить выпуск специалистов по физике ядра. В декабре 1948 г. вышло постановление Совета Министров СССР о подготовке высшими учебными заведениями специалистов для проведения этих работ. Во исполнение этого постановления в начале 1949 г. на базе кафедры "Строение вещества" на физическом факультете МГУ было организовано отделение строения вещества, в настоящее время называющееся отделением ядерной физики. В него входили пять кафедр: физики атомного ядра, ускорителей, нейтронной физики и радиоактивных излучений, ядерной спектроскопии, космических лучей.

Первым заведующим отделением стал академик Д.В. Скобельцын. С 1960 г. его сменил Сергей Николаевич Вернов и оставался на этом посту более 20 лет, являясь одновременно заведующим кафедрой космических лучей и физики космоса. За это время структура отделения изменялась, возникали новые кафедры.

По инициативе первого директора Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) Д.И. Блохинцева, Д.И. Скобельцына и С.Н. Вернова был организован филиал НИИЯФ МГУ в Дубне с двумя кафедрами, студенты кафедр проходят обучение на базе ОИЯИ.

Под руководством С.Н. Вернова пройден большой путь в деле организации учебного процесса на отделении ядерной физики, в частности на кафедре космических лучей и физики космоса. Сергей Николаевич сам первое время читал лекции по основному курсу "Введение в физику космических лучей", передав его затем другим преподавателям. Непрерывно руководил аспирантами, выполнявшими работу в лабораториях НИИЯФ МГУ.

Студенты очень ценили встречи с Сергеем Николаевичем, на которых он говорил с ними об образовании, о науке, о будущем. Выступая перед студентами, С.Н. Вер-

нов говорил: "Забудьте о свободных днях в воскресенье, о свободных вечерах среди недели. Если вы хотите стать настоящими учёными, вы должны всё своё время отдавать науке — работать, думать, читать".

Первые выпускники кафедры космических лучей — будущие профессора Л.И. Сарычева, И.В. Ракобольская, С.А. Славатинский, Г.Б. Христиансен. Сначала кафедра была малочисленной и в основном состояла из совместителей, затем стараниями С.Н. Вернова преподавательский состав увеличивался, научные интересы сотрудников расширялись.

Кафедра ежегодно принимает 10–15 студентов 3-го курса, в аспирантуре кафедры обычно обучается от 5 до 10 аспирантов. Дипломные работы и кандидатские диссертации в основном выполняются в научных лабораториях НИИЯФ МГУ, а также в лабораториях Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и Института ядерных исследований РАН. На кафедре читается более 20 общефакультетских и специальных курсов, выпускаются специалисты в области астрофизики космических лучей, физики космического пространства.

Сергей Николаевич Вернов огромное значение придавал практической работе студентов в научных коллективах. Ещё находясь в вузе, студенты должны участвовать в решении наиболее актуальных проблем современными методами. Чем более инициативным является студент, тем раньше должно начаться его знакомство с современной наукой и техникой, общение с её творцами, поэтому очень важно привлечение к преподавательской работе ведущих специалистов научно-исследовательских институтов. Сергей Николаевич Вернов писал: "Преподавание даёт возможность крупным специалистам взглянуть на свою область как бы со стороны, проверить полноту своих знаний и убедительность сделанных выводов". Он считал, что каждый специалист должен передавать свои знания другим и учиться у своих учеников. Сам Сергей Николаевич никогда не стеснялся учиться у своих учеников, осваивал машинные методы обработки, восхищался результатами. А потом писал в своих статьях: "Электронно-вычислительные машины должны пронизать весь учебный процесс".

Сергей Николаевич обладал способностью быстро замечать всё новое, что появлялось в науке и внедрять новые направления в обучение студентов на кафедре и отделении ядерной физики. Так, уже создание первых спутников Земли, открытие радиационных поясов Земли повлекло за собой организацию на кафедре целого цикла новых лекций по космофизическим проблемам, отразилось это и в новом названии кафедры: "кафедра космических лучей и физики космоса".

По инициативе С.Н. Вернова развивалось новое направление — космическое материаловедение, кафедра стала выпускать студентов по этому направлению и тесно сотрудничала с соответствующим отделом НИИЯФ МГУ. С.Н. Вернов стимулировал также открытие этой новой специализации в Московском институте электронного машиностроения, где он читал лекции по космическому материаловедению.

Также по инициативе С.Н. Вернова стали развиваться исследования по физике высоких энергий на ускорителях, по физике сверхвысоких энергий в космических лучах, что сразу же повлекло за собой включение новых специальных курсов в учебный процесс и подготовку студентов по этим направлениям. Новым также являлась

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 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 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,



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. 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. Эту идею

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

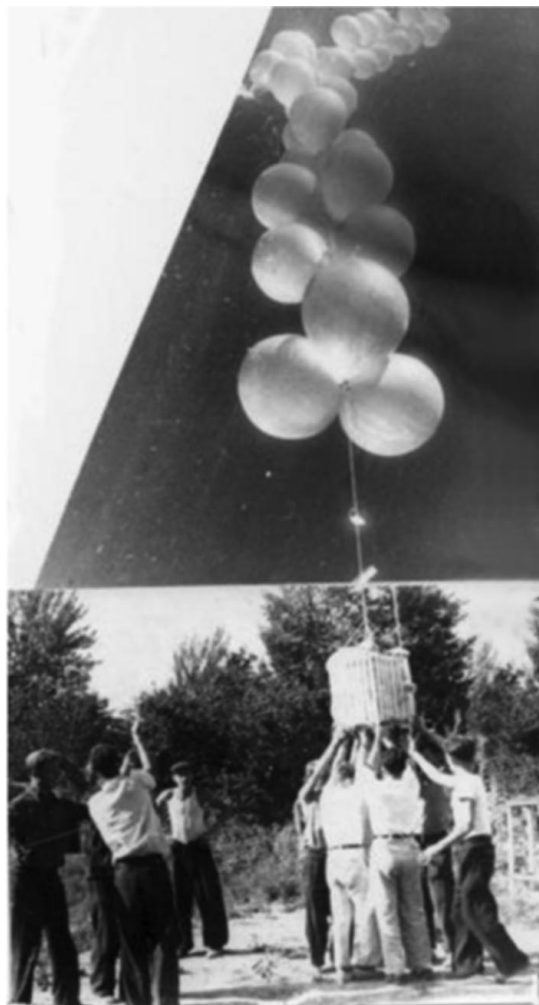


Рис. 1. Шары-зонды.



Дмитрий Владимирович Скобелыцын

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 стратосферных 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.

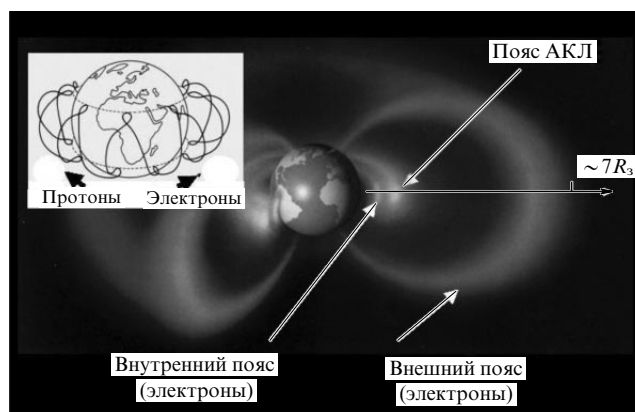


Рис. 3. Радиационные пояса Земли. Показаны внутренний и внешние электронные пояса Земли, а также пояс, образованный аномальной компонентой космических лучей (АКЛ — аномальные космические лучи).

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 сцинтилляционный детектор. Информация этого детектора позволила установить существование двух пространственно разделённых областей в околоземном пространстве — внешнего электронного пояса, заполненного электронами с энергией ≥ 100 кэВ, и внутреннего, протонного. Энергия протонов внутреннего пояса была существенно выше (≈ 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 альбе́до 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.

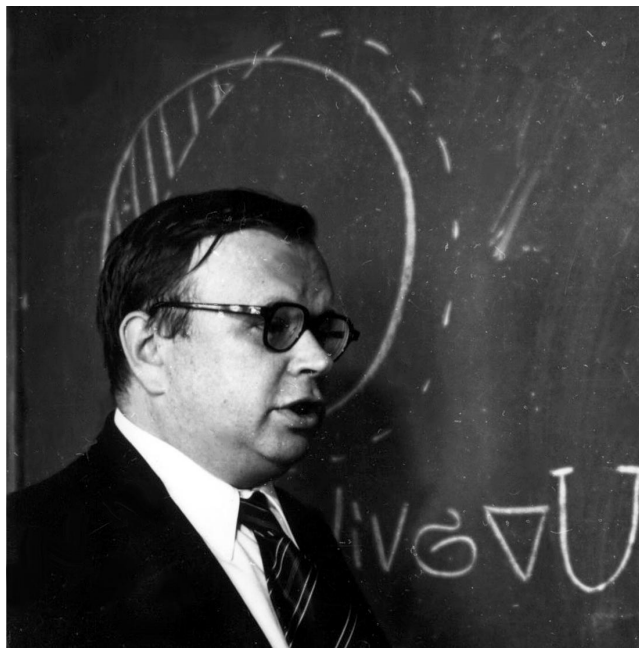
Итогом исследований радиационных поясов в 1960-х годах стало, пожалуй, окончательное понимание их структуры: оказалось, что, по сути, пояса — это единое образование из захваченных в магнитное поле заряженных частиц (в основном протонов и электронов), имеющих очень широкий диапазон энергий — до нескольких 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 альбе́до 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. Насколько 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 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 в магнитную ловушку, где в процессе переноса ускоряются.

Впервые идею диффузии частиц внутри магнитной ловушки при возмущениях магнитного поля типа внешних 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 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). 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 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 понимании 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. Панасюк 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 наблюдаться 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. Панасюк, 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 скрещённых 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 укладывавшимися 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 развёрнуты 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.

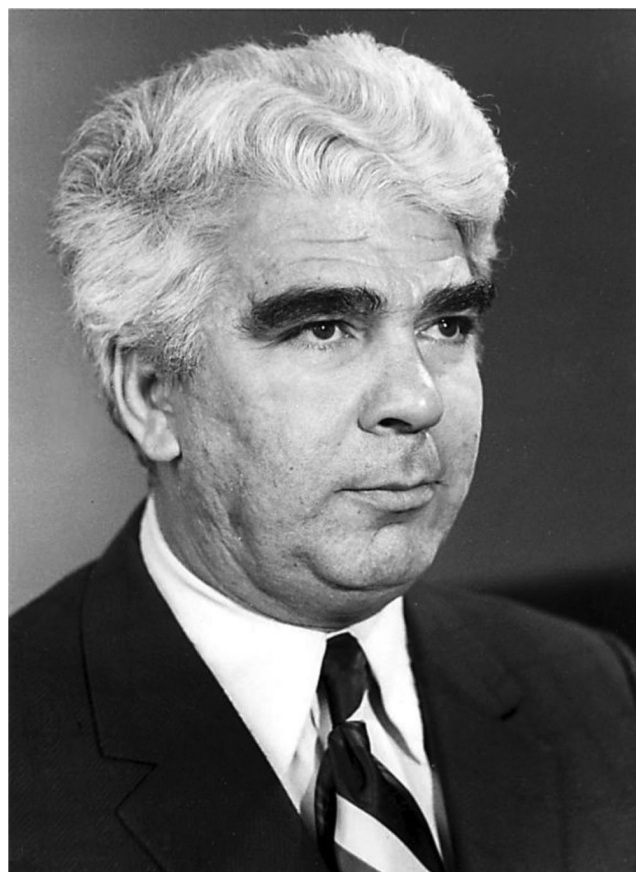
Динамика магнитосферной токовой системы такова, что в области перехода от дипольных линий к вытянутым в хвост магнитным силовым линиям возникают суббури и микросуббури (преимущественно при южном направлении межпланетного магнитного поля), которые сопровождаются появлением горячего плазменного сгустка 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 плазмод, 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. Соз-



Велиюр 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. Стоповский 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 ≈ 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 ≈ 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 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 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 реализовываться 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 ~ 20 мрад сут $^{-1}$ под защитами ~ 3 г см $^{-2}$ 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.

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 конструктивных 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 выпадающие 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].

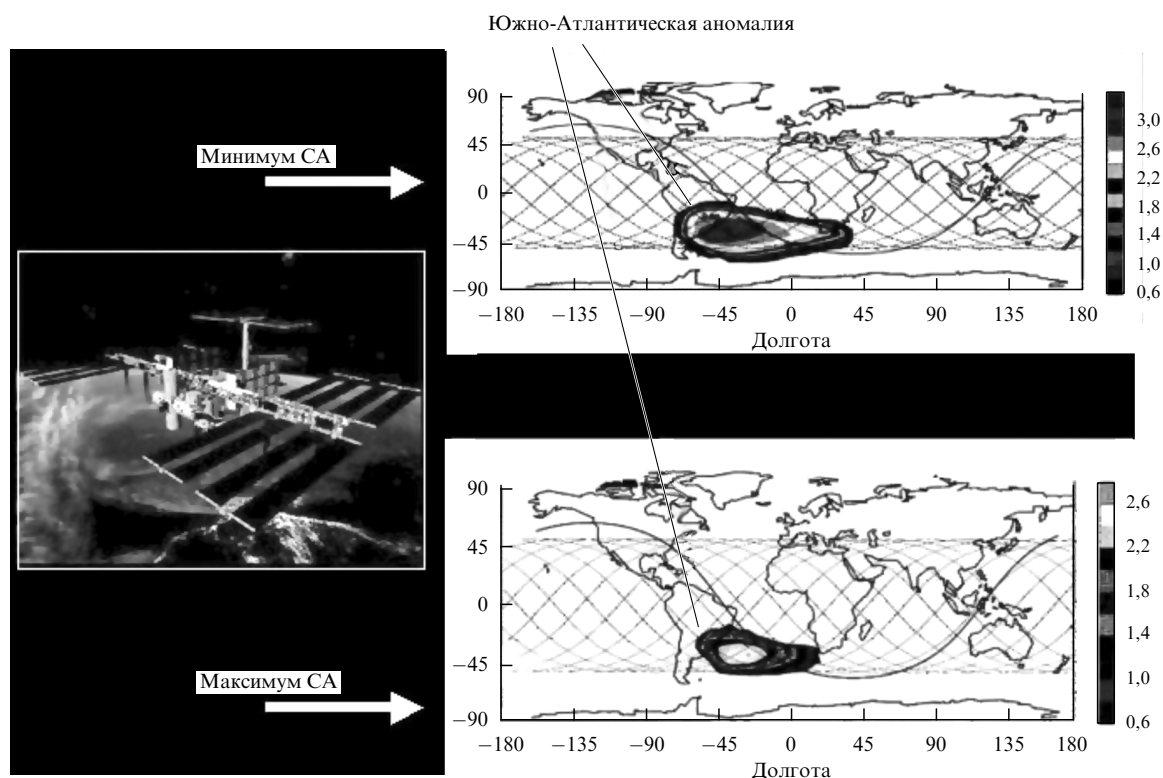


Рис. 4. Динамика радиационной обстановки в Южно-Атлантической аномалии в течение цикла солнечной активности (СА): дозы радиации в этой области возрастают в минимуме цикла и понижаются в максимуме.

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 (≈ 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. Ныммик, 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 ≈ 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 с ≈ 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 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 изучать 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 осмыслению 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



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

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 широкоугольную 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-

сферного взаимодействия, связывающего в единую цепь множество физических процессов, происходящих в удалённых 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 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 ещё 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", проведённые А.И. Лебединским, В.И. Краснополским, В.И. Тулуповым в 1960-е годы и начале 1970-х годов, дали первые надёжные 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 Землёй, имеет также прикладную направленность, связанную с обеспечением безопасности космических полётов (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 грозных 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. Скобельцына, — работающий в этой области науки, прошёл 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) [Panasyuk 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) [Popeliavska 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, Teltsov 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. Nymmik 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 *Gosmic 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) [Sadovnichy 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 временным сотрудником Радиового института, а затем стал аспирантом этого института. Аспиранту предстояло выбрать тему кандидатской диссертации. Как говорил Сергей Николаевич, после встречи в ЛПИ с Д.В. Скобельцыным, 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.

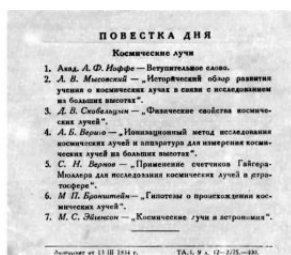
Сергей Николаевич проработал в Радиовом институте с 1930 г. по 1936 г. В аспирантуре Сергей Николаевич изучал космические лучи с помощью счётчиков Гейгера – Мюллера, написал реферат "Новейшие данные в изучении космических лучей". Он показал, что небольшие по объёму газоразрядные счётчики хороши для проведения 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-

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



Билет на заседание конференции, посвящённой космическим лучам, и повестка дня с докладом С.Н. Вернова (Ленинград, 1934 г.).



шения в дальнейшем многих научных космических под-
вигов.

В 1935 г. С.Н. Вернов поступает в докторантуру Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) и под руководством С.И. Вавилова и Д.В. Скобельцына окончательно формирует свой научный стиль, в котором сочетались смелый эксперимент и глубокий теоретический анализ. Но связь Сергея Николаевича с Радиевым институтом ещё долгие годы не прерывалась.

Максимальная творческая и научно-организационная активность С.Н. Вернова пришлась на 50–70-е годы прошлого столетия. Значительно расширился круг его научных интересов в области космических лучей — он использует космические лучи в качестве средства изучения межпланетной среды, солнечной активности и других объектов.

На стене исторически первого здания Радиевого института на ул. Рентгена 1 установлена памятная доска, на которой отмечены академики и члены-корреспонденты АН СССР, в разные годы работавшие в институте. Среди них — и академик Сергей Николаевич Вернов.

В год 100-летия со дня рождения Сергея Николаевича мы не можем не вспомнить те яркие страницы, которые он вписал в историю изучения космических лучей, в освоение космического пространства.

2. Как судьба свела меня с Сергеем Николаевичем

В жизни мне выпало счастье встретить очень многих ярких личностей, но в особом ряду стоит Сергей Николаевич Вернов, с которым мне посчастливилось общаться с 1968 г. практически до момента его кончины.

В 1964 г. мне, студенту 5-го курса физико-механического факультета ЛПИ, на котором учился и Сергей Николаевич, одному из немногих студентов, посчастливилось принять участие в 4-й конференции по космическим лучам, которая проходила с 24 по 29 августа в небольшом городке Апатиты Мурманской области. Прекрасным днём 22 августа 1964 г. впервые в своей жизни я улетал на научную конференцию вместе с учёными из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР (ФТИ). (Более подробно этот эпизод и последующие контакты с С.Н. Верновым изложены в моей статье. "Каким мне запомнился Сергей Николаевич Вернов" [1].)

Конференция проводилась по решению Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Космические лучи" под председательством С.Н. Вернова.

Ещё студентом 3-го курса физико-механического факультета кафедры "Экспериментальная ядерная физика" ЛПИ им. М.И. Калинина я пришёл в ФТИ в группу

Г.Е. Кочарова. В начале 1968 г. Г.Е. Кочаров попросил меня помочь в подготовке и проведении Пятой всесоюзной школы по космофизике в Апатитах. По просьбе Сергея Николаевича он побывал в Апатитах, встретился с директором Полярного геофизического института Сергеем Ивановичем Исаевым и после встреч с председателем Кольского филиала АН СССР Е.К. Козловым и секретарём горкома партии г. Апатиты вопрос о проведении зимней школы по космофизике, ставшей в Академии наук уже до этого традиционным мероприятием, был решён положительно. Начались наши поездки в Москву к Сергею Николаевичу по согласованию состава оргкомитета школы, программы, определения докладчиков и других организационных вопросов. С тех пор я в роли учёного секретаря школ, ряда семинаров, симпозиумов и конференций по космическим лучам, учёного секретаря Научного совета "Космические лучи" в течение ряда лет стал часто бывать в Научно-исследовательском институте ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ) у Сергея Николаевича, директором которого он был, и в отделении ядерной физики Президиума АН СССР, где Сергей Николаевич был заместителем академика-секретаря отделения.

3. Апатитский этап школ по космофизике (1968–1969 гг.)

Следует сразу отметить особую роль С.Н. Вернова в развитии науки о космических лучах и организации многих научных мероприятий по космическим лучам. Он неуклонно проводил линию на организацию этих научных мероприятий не только в Москве, но и в других городах (Апатиты, Иркутск, Якутск, Алма-Ата, Ереван и др.). Это, безусловно, способствовало развитию там науки, привлекало внимание к космическим лучам не только молодых учёных, но и местных властей, от которых кардинально зависело развитие инфраструктуры исследований.

Проводимые школы по космофизике имели свою специфику, отличавшую их от совещаний, конференций, симпозиумов. Главной задачей таких школ являлось приобретение новых знаний участниками школ, работающими в различных областях физики, по различным направлениям физики космических лучей, получение ясного представления об общем состоянии и перспективах космической физики, установление взаимосвязи между различными природными процессами. Сергей Николаевич исходил из необходимости обсуждения на заседаниях школы состояния и перспектив главных направлений космической физики и ознакомления участников школы с достижениями в близких к космофизике научных областях, касающихся нейтринной астрофизики, космологических объектов, роли реликтового излучения в эволюции Вселенной, физики Солнца и др., что требовало привлечения к участию в школе в качестве лекторов известных учёных. Выбору докладов и лекций обзорного характера, представляющих интерес для широкого круга участников, Сергеем Николаевичем уделялось особое внимание. Естественно, что проведение школы требовало довольно большего времени, и регламент школы, отличался от регламента, принятого в то время в Академии наук для совещаний и семинаров.

К моменту включения меня в оргкомитет по организации, подготовке и проведению зимней школы по

космофизике в Апатитах в 1968 г., в предыдущие годы в различных городах уже состоялись четыре школы, поддержанные решением Секции космических лучей и радиационных поясов. Так что к моменту организации V зимней школы по космофизике в Апатитах можно было использовать опыт проведения предыдущих.

V и VI зимние школы по космофизике под председательством С.Н. Вернова были поддержаны решением Президиума АН СССР и проведены в г. Апатиты в Полярном геофизическом институте (ПГИ): V — с 21 марта по 5 апреля 1968 г., VI — с 18 марта по 1 апреля 1969 г. В работе V школы приняли участие 150 учёных с 57-ю докладами, а в работе VI — 300 учёных со 116-ю докладами. В ПГИ имелись хорошо оборудованные лаборатории, в которых проводились исследования ионосферы, полярных сияний, магнитного поля Земли и космических лучей. Мне посчастливилось сотрудничать с Сергеем Николаевичем и его коллегами ещё долгое время после этих школ при организации ряда других мероприятий по космической физике.

Оргкомитеты V и VI школ по крайней мере за 3–4 месяца намечали программу заседаний, в связи с чем обращались к известным учёным с просьбой выступить с лекциями. Так, например, оргкомитет V школы выслал просьбы-приглашения выступить с лекциями на заседаниях школы ведущим учёным СССР: В.Л. Гинзбургу, Я.Б. Зельдовичу, Б.М. Понтекорво, Э.Р. Мустелю, Е.Л. Фейнбергу, Л.Э. Гуревичу, А.З. Долгинову, Г.Т. Зацепину, Л.И. Дорману, С.И. Сыроватскому и др.

Основная работа по организации и проведению V, а затем и VI школ по космофизике пришлась на сотрудников ФТИ и, естественно, все вопросы, включая размещение участников (что было очень непростым делом в маленьком городе), Сергей Николаевич обсуждал с Г.Е. Кочаровым и со мной. Кроме того, Сергей Николаевич подчёркивал важность публикации трудов школы и предложил попробовать издать их (материалы предыдущих школ не издавались). Ввиду того, что в следующем году должна была состояться очередная школа, труды необходимо было издать в кратчайший срок. Мы взялись за это дело, в общем, не понимая всех трудностей, которые нас ожидали. До конца мая 1968 г. мы принимали статьи, затем проводилось их тщательное научное и литературное редактирование и, наконец, печатание на ротапринте. В результате в 1968 г. мне пришлось провести в Апатитах более трёх летних месяцев. В конечном счёте труды V школы были изданы через четыре месяца после окончания школы. Сергей Николаевич был очень доволен, при каждом удобном случае он подчёркивал важность этой работы и демонстрировал сборник.

Правда, это широкое оповещение учёных о школе сыграло с нами злую шутку при подготовке следующей, VI, школы. Число предложенных докладов и лекций было настолько велико, что все они не могли быть включены в повестку. И наплыв участников в школу был как никогда велик — 300 учёных. Я не буду описывать проблемы, связанные с размещением участников школы, и то, как Сергей Николаевич организовал поход к секретарю горкома, который вошёл в нашу ситуацию и обратился с просьбой к местным жителям, уже получившим ордера на квартиры в новом доме, в течение двух недель, пока идёт школа, не вселяться в квартиры в подъезде одного из домов. Вот каков авторитет был у науки в то время!

К моменту проведения VI школы по космофизике мы сблизились с учёным миром г. Апатиты и регулярно обсуждали многие вопросы с Сергеем Николаевичем в Кольском филиале АН СССР с заместителем председателя президиума филиала А.Н. Воронковым и учёным секретарём филиала Ю.А. Шашмуриным, которые оказали нам существенную помощь в организации печатания материалов школ на ротапринте. Директор ПГИ С.И. Исаев и учёный секретарь Ю.А. Волков вникали во все проблемы участников школ, организовывали досуг. У ряда сотрудников ПГИ мы побывали в лабораториях и дома и оценили северное радушие Ю.А. Волкова, Л.Л. Лазутина, И.Н. Капустина и др.

Как-то во время перерыва между заседаниями, прохаживаясь по залу, мы обсуждали возможность включения дополнительного сообщения на вечернее заседание. У стенда с программой стоял один из участников. Сергей Николаевич, указав на него, сказал: "Обратите



Открытие VI школы по космофизике (слева направо) Ю.А. Волков — учёный секретарь Полярного геофизического института, С.И. Исаев — директор Полярного геофизического института, С.Н. Вернов — председатель оргкомитета школы, Е.К. Козлов — председатель Кольского филиала АН СССР, Г.Е. Кочаров — заместитель председателя оргкомитета школы, П.В. Прошин — секретарь горкома, В.А. Дергачёв — учёный секретарь оргкомитета школы (Апатиты Мурманской области, 1969 г.).



Посещение лаборатории И.А. Кузьмина (слева направо) Л.И. Миросниченко (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)), Г.Е. Кочаров, С.Н. Вернов, И.А. Кузьмин (Апатиты, ПГИ, 1969 г.).



На лекции (справа налево): Е.К. Козлов, С.Н. Вернов, Л.Л. Лазутин (ПГИ), А.Е. Чудаков (Апатиты, ПГИ, 1969 г.).



С.Н. Вернов во время перерыва между заседаниями среди участников школы. В.А. Дергачёв получает "указания" по изменениям в программе VI школы по космофизике (Апатиты, ПГИ, 1969 г.).

внимание на этого молодого человека, он далеко пойдёт". Этот молодой человек был Михаил Игоревич Панасюк, тогда ещё только аспирант. И Сергей Николаевич не ошибся!

Ввиду огромного объёма материалов оргкомитет VI школы принял решение опубликовать, главным образом, лекции приглашённых учёных и обзорные доклады, представляющие интерес для широкого круга исследователей. На заседании Научного совета по комплексной проблеме "Космические лучи" в последний день работы VI школы Сергей Николаевич дал высокую оценку деятельности организаторов школы. Естественно, что и труды VI школы, как и V школы, предстояло издать в короткий срок, что и было выполнено (труды были изданы в двух томах).

К сожалению, апатитский этап школ остановил их продолжение в будущем в таком формате. Одной из основных причин этого, как отмечалось при обсуждении последующих школ, оказалась невозможность удержать высокую планку проведения школ и оперативного издания материалов в столь короткие сроки. Тем не менее проведённые школы по космофизике были в определённом

смысле неповторимыми и во многом выражали, а в чём-то и предопределяли развитие научного сообщества космофизиков. Требовался другой формат.

4. Ленинградский этап космофизики на международных семинарах, конференции по космическим лучам, Европейский симпозиум (1969–1983 гг.)

Сергей Николаевич очень любил Ленинград и физику космических лучей. Эта любовь привела к тому, что с 1969 г. в Ленинграде по решению Отделения ядерной физики Президиума АН СССР ежегодно стали проводиться под руководством Сергея Николаевича международные семинары, посвящённые отдельным вопросам физики космоса, с привлечением гостей из других стран.

I Ленинградский международный семинар по изучению физики межпланетного пространства был проведён в Ленинграде в ФТИ им. А.Ф. Иоффе 3–7 июня 1969 г. Нельзя забывать о трудностях проведения научных мероприятий в период белых ночей в Ленинграде, следовательно, нехватки мест в гостиницах. Все вопросы приходилось согласовывать с местными властями на самом высоком уровне. Докладчики были в основном приглашённые. На семинарах осуществлялся синхронный перевод докладов. Проводились широкие дискуссии.

Открывая семинар в ФТИ вице-президент АН СССР Б.П. Константинов (директор института в течение длительного времени) высоко оценил идею проведения таких семинаров и остановился на некоторых актуальных проблемах современной физики. В заключение выступления Б.П. Константинов поблагодарил зарубежных коллег: Х. Альвена (Швеция), Д.Дж. Вильямса, Дж.Р. Винклера и С.М. Кримиджиса (США), У.Р. Уэббера (Англия), А. Шомоди (Венгрия), К.Г. Мак-Кракена (Австралия), П. Велинова (Болгария), Кнута (ГДР), принявших участие в семинаре.

Естественным было издание трудов семинара в текущем году. И здесь Сергей Николаевич опирался на нас. Конечно, организация и проведение этих мероприятий отнимали много времени. Особенно много рутинной работы требовало издание трудов в то время ротационным способом, и это ложилось на плечи нашего небольшого коллектива. Тем не менее труды семинара были изданы ФТИ в 1969 г.

В целом, 1969 г. оказался очень напряжённым: времени на науку практически не оставалось.

Сергей Николаевич видел это и предложил издавать труды последующих семинаров в НИИЯФ МГУ, поскольку в нём имелась более мощная база и можно было привлечь больше сотрудников к этой работе. И труды II и III Ленинградских семинаров были изданы в НИИЯФ МГУ, правда в год проведения семинара этого не удалось сделать.

Сергей Николаевич считал очень важным быстрое издание материалов семинара и попросил Г.Е. Кочарова взвесить наши возможности. Грант Егорович, помню, сказал, что в этом деле всё зависит от решения В.А. Дергачёва. И как я мог отказать Сергею Николаевичу! И эту благородную лямку я тянул практически до последнего семинара, который проводился под руководством Сергея Николаевича. И пока был жив Сергей Николаевич, было проведено 12 Ленинградских семинаров, на которые с большим удовольствием приезжали учёные из разных стран и выступали с обзорными



Беседа с С.Н. Верновым около здания ФТИ им. А.Ф. Иоффе в Ленинграде во время встречи 3–7 июня 1969 г. В первом ряду (слева направо): Г.Е. Кочаров, В.И. Чесноков (ФТИ), К. Грингауз (Институт космических исследований РАН (ИКИ), Дж. Винклер (США), И. Подгорный (ИКИ), Д.Дж. Вильямс (США), С.Н. Вернов, С.М. Кримиджис (США), К.Г. Мак-Кракен (Австралия). (Фотография из статьи С.М. Кримиджиса "Десятилетия великих свершений", опубликованной в книге [2].) (Ленинград, 1969 г.)

докладами с самой новой информацией. Семинары каждый год посвящались различным проблемам космофизики, бурно развивавшейся в 1970–1980 гг.

Посетивший в 2007 г. Россию в связи с 50-летием запуска искусственного спутника в Советском Союзе, С.М. Кримиджис из США, ведущий исследователь в нескольких проектах НАСА, один из участников 1-го Ленинградского семинара, в своём выступлении отметил следующее: *"Я хорошо помню свой первый визит в СССР в 1969 году по приглашению академика С.Н. Вернова для участия в конференции в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в тогдашнем Ленинграде. На ней присутствовало несколько западных учёных (Х. Альвен, К.Г. Мак-Кракен, У.Р. Уэббер, Дж.Р. Винклер, Д.Дж. Вильямс), и мы провели великолепную серию дискуссий и впервые сравнили данные по солнечным высокоэнергетическим частицам со спутников США и СССР"* [2].

Назовём тематику последующих семинаров.

— II Международный семинар по проблеме "Генерация космических лучей на Солнце" (Ленинград, 8–12 декабря 1970 г.). Открывая семинар, С.Н. Вернов отметил важность проблемы исследования солнечных космических лучей и главные направления, проводимые в этих исследованиях. Он указал на то, что наличие экспериментального материала и теоретических гипотез в совокупности предоставляют возможность проведения широкого анализа физических процессов генерации космических лучей на Солнце, их ускорения в космическом пространстве, выработки необходимых рекомендаций по дальнейшему теоретическому и экспериментальному исследованию по проблеме. Труды семинара были изданы в НИИЯФ МГУ в 1971 г. [3].

— III Международный семинар по проблеме "Ускорение частиц в космическом пространстве (околоземном и межпланетном космическом пространстве), Галактике и Метагалактике" (Ленинград, 13–15 июля 1971 г.) [4].

— IV Ленинградский международный семинар "Единообразие ускорения частиц в различных масштабах космоса" (Ленинград, 16–18 августа 1972 г.) [5].

— V Ленинградский международный семинар "Солнечные космические лучи и их проникновение в магнитосферу Земли" (Ленинград, 26–29 июня 1973 г.) [6].

— VI Ленинградский международный семинар "Ускорение частиц и ядерные реакции в космосе" (Ленинград, 19–21 августа 1974 г.) [7].

— VII Ленинградский международный семинар "Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера" (Ленинград, 25–28 мая 1975 г.) [8].

— VIII Ленинградский международный семинар "Активные процессы на Солнце и проблема солнечных нейтрино" (Ленинград, 25–27 сентября 1976 г.) [9].

— IX Ленинградский семинар по космофизике "Солнечные космические лучи: генерация и взаимодействие с веществом от источника до Земли" (Ленинград, 23–25 декабря 1977 г.) [10].

— X Ленинградский семинар по космофизике "Ядерная космическая физика" (Ленинград, 6–8 октября 1978 г.) [11].



VI Ленинградский международный семинар по космофизике. На лекции. 1-й ряд (слева направо): С.Н. Вернов, Г.Е. Кочаров, А. Шомоди (Венгрия), А.З. Долгинов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), В.А. Крат (Пулковская обсерватория), 2-й ряд (справа налево): С.И. Сыроватский (ФИАН), В.А. Дергачёв (Ленинград, 1974 г.).

— XI Ленинградский семинар по космофизике "Взаимодействие космических лучей со средой" (Ленинград, 30 ноября – 2 декабря 1979 г.) [12].

— 7-й Европейский симпозиум по космическим лучам (Ленинград, 15 – 19 сентября 1980 г.) [13].

— XII Ленинградский семинар по космофизике "Комплексное изучение Солнца" (Ленинград, 6 – 8 февраля 1982 г.) [14].

— XIII Ленинградский семинар по космофизике "Интенсивность космических лучей и космогенные изотопы" (Ленинград, 19 – 21 ноября 1982 г.) [15].

Самые известные учёные мира по космофизике считали честью для себя получить приглашение на Ленинградский семинар. Семинары привлекали внимание крупных зарубежных и советских учёных тем, что на них удавалось плодотворно и детально обсуждать самые животрепещущие научные проблемы.

Как пример, можно привести VIII Ленинградский семинар, который проходил в ФТИ с 25 по 27 сентября 1976 г. и был посвящён теме "Активные процессы на Солнце и проблема солнечных нейтрино". Семинар открыл С.Н. Вернов. На семинаре выступали с докладами известные учёные: из СССР — Г.Е. Кочаров, Г.В. Домогацкий, Н.Н. Степанян, Б.В. Сомов, Б.И. Лучков, М.И. Пудовкин, В.А. Крат, Т.Н. Чарахчян, А.З. Долгинов, А.К. Лаврухина, Л.И. Дорман, И.М. Подгорный, Б.М. Владимирский и др.; из Венгрии — А. Шомоди, Д. Бенко, Г. Эрдеши; из Польши — З. Кобылинский, Б. Кухович; из США — Дж. Ворпал и Дж. Симпсон; из Чехословакии — К. Кудела, С. Пинтер, П. Повинец, из ФРГ — Е. Багге. В дискуссии активно участвовали Л.Э. Гуревич и Б.М. Понтекоров.

На открытии семинара выступил председатель оргкомитета С.Н. Вернов, который отметил, что Ленинградские семинары уже принесли много пользы, в особенности это относится к космофизике. То, что С.Н. Вернов глубоко вникает во многие проблемы космофизики, было видно из приведённого им перечня проблем [8], связанных с процессами, происходящими на Солнце, на которые следует обратить внимание теоретиков. Председатель Международной комиссии "Космические лучи" UPAР (Union of Pure and Applied Physics) А.А. Шомоди отметил, что интерес к семинару связан не только с научными вопросами, но и с красотой Ленинграда, а также с тёплой дружественной обстановкой, в которой протекает работа семинара. Директор Института им. Э. Ферми Чикагского университета, всемирно известный учёный Джон А. Симпсон отметил, что важность семинара обусловлена как проходящими на нём представительными научными дискуссиями и докладами о последних исследованиях, так и возможностью посетить СССР, для того чтобы встретиться со многими советскими учёными, особенно молодыми, в области наук о космических лучах, а также подчеркнул, что Ленинградские семинары активно содействуют сотрудничеству двух стран и программам обмена, разработанным Академиями наук США и СССР. На закрытии семинара с заключительными словами выступили директор Института ядерной физики Кильского университета Е. Багге, директор геофизической обсерватории г. Хурбаново (Чехословакия) С. Пинтер и заместитель председателя оргкомитета Г.Е. Кочаров.

Во вступительном слове на юбилейном, десятом, семинаре С.Н. Вернов отметил, что идея такого рода



На открытии семинара: выступает А. Шомоди (Венгрия). Сидят (слева направо): Б. Кухович (Польша), С.Н. Вернов, Г.Е. Кочаров, Дж. Симпсон (США), В.А. Дергачёв, Е. Багге (ФРГ), П. Повинец (Чехословакия) (Ленинград, 1976 г.).



На банкете по окончании семинара (справа налево): С.Н. Вернов с супругой, И.М. Подгорный (ИКИ) с супругой, Г.Е. Кочаров, В.А. Дергачёв, Т.Н. Чарахчян (ФИАН) (Ленинград, 1976 г.).

международных семинаров, посвящённых отдельным вопросам физики космоса, с привлечением гостей из других стран, принадлежит академику-секретарю Отделения ядерной физики Моисею Александровичу Маркову.

С.Н. Вернов отметил, что на прошедших семинарах обсуждались различные аспекты космофизики в пространстве и времени: *"И различные стороны этих сложных и взаимно переплетающихся явлений нам удалось связать друг с другом, перебрасывая мост между этими явлениями. И от одного семинара к другому мы расширяли тематику, увеличивали количество организаций и число специалистов, которые всё больше и больше становились патриотами наших семинаров. И наука тем временем развивалась очень успешно. Мы работали и работаем в той области, где полёты спутников и космических ракет дают большую новую информацию. Поэтому, естественно, что наши семинары всегда отличаются злободневностью. Они посвящены тем вопросам, которые родились совсем недавно (очень новые и очень интересные) и требуют активного обсуждения с самых разнообразных сторон и быстрого решения"* [11].

Нам довелось вместе проводить, кроме семинаров, конференции по космическим лучам в Ленинграде, VII Европейский симпозиум по космическим лучам (European Cosmic Ray Symposium, ECRS).

Хотелось бы обратить внимание на то, как глубоко С.Н. Вернов понимал масштаб физики космических лучей. Привожу его слова: *"Фактически мы с вами разделены на две части, одни тяготеют к астрономии и практически не имеют отношения к ядерной физике, другие тяготеют к ядерной физике и явно удалены от астрономии. Правда, есть среди нас такие, которых нужно разрезать пополам, потому что одна часть их принадлежит к ядерной физике, другая часть — к астрономии"* [13].

Астрономический аспект космических лучей Д.Н. Скобельцыным был назван космофизическим. Так и укоренилось разделение физики космических лучей на космофизическую и ядерно-физическую области, по этим направлениям проводились и проводятся конференции по космическим лучам. Здесь уместно снова процитировать С.Н. Вернова: *"Спрашивается, что у нас получится, если мы разорвём физику космических лучей, занимающуюся астрономическими проблемами и физику космических лучей, занимающуюся ядерными проблемами. У нас получится, товарищи, чепуха"* [13]. И такие конференции были проведены в Ленинграде: в 1969 г. под председательством Сергея Николаевича состоялась конференция по космическим лучам, а в 2008 г. — уже без него — 30-я юбилейная конференция, на которой мы снова вспоминали о Сергее Николаевиче.

На открытии конференции в 1969 г. ректор Ленинградского политехнического института К.П. Селезнев вручил Сергею Николаевичу памятную медаль в связи с 50-летием физико-механического факультета, на котором С.Н. учился.

Проникновенным было выступление С.Н. Вернова 15 сентября 1980 г. на открытии VII Европейского симпозиума по космическим лучам, который проводился в ЛПИ. С большим волнением он рассказывал о своём учителе Дмитрии Владимировиче Скобельцыне, с которым он встретился в ЛПИ в 1932 г. и которому, по словам С.Н. Вернова, мы обязаны не только физикой космических лучей, но и физикой высоких энергий. Несмотря на то что в 1980 г. Д.В. Скобельцыну исполнилось 88 лет, он являлся руководителем школы физиков по космическим лучам в Советском Союзе.

На открытии VII Европейского симпозиума по космическим лучам с приветственными обращениями к участникам выступили секретарь Международной комиссии по космическим лучам, будущий её председатель, А. Вольфендейл из Англии, экс-председатель этой комиссии А. Шомоди из Венгрии, проректор ЛПИ Г.Н. Александров.

В выступлении на симпозиуме С.Н. Вернов подчеркнул, что в области космофизических проблем на Ленинградских семинарах (к этому времени уже состоялось 11 семинаров) решаются многие задачи, и отдавая дань этим семинарам, отметил: *"Я даже оговорился, назвав симпозиум семинаром, потому что мы уже просто привыкли каждый год собираться на традиционные ленинградские семинары"* [13].

Завершая выступление, С.Н. Вернов призвал не останавливаться на достигнутом: *"Что нам надо сейчас в космических лучах? Руководитель отделения ядерной*

физики академик М.А. Марков считает, что мы с вами плохо работаем в том отношении, что не пошли по пути тех, кто работает на ускорителях и не создали индустриализацию в космических лучах. Нам нужно смелее строить крупные установки, включать ЭВМ, заменить ручной человеческий труд ЭВМ и не бояться масштабов, как не боятся те, кто строит сейчас гигантские ускорители стоимостью сотни млн рублей" [13]. Как это актуально и сейчас!

Г.Н. Александров от имени коллектива ЛПИ поздравил С.Н. Вернова с 70-летием, с присвоением ему высокого звания Героя Социалистического Труда за выдающиеся заслуги в научной, педагогической и общественной деятельности.

В заключительном слове С.Н. Вернов дал высокую оценку проведённому симпозиуму, в котором участвовало более 300 учёных. Общее число докладов вместе с пленарными составило 455, с лекциями выступили 22 приглашённых докладчика. С.Н. Вернов отметил, что в отличие от трудов предыдущих симпозиумов, труды этого симпозиума будут опубликованы. И они были опубликованы в 1980 г.

С.Н. Вернов также сказал: *"Я думаю, что область исследования космических лучей столь многообразна и так быстро развивается наша наука, что нам необходимо собирать каждый год, т.е. через год — международные конференции, в промежутке — Европейские симпозиумы, один год — достаточно большой период времени"* [13]. В целом, симпозиумы изменили структуру Ленинградских международных семинаров.

Со смертью Сергея Николаевича космическая физика понесла непоправимую утрату. Он прожил очень содержательную жизнь, многое дал людям и оставил благодарную память о себе в сердцах многочисленных учеников, сотрудников, всех тех, кто имел счастье с ним общаться, слушать его интересные доклады. Мы всегда будем помнить Сергея Николаевича и постараемся, чтобы его живой облик влиял на наши дела.

5. С.Н. Вернов как человек

В своей жизни мне пришлось столкнуться с двумя яркими учёными — организаторами науки: академиками Б.П. Константиновым и С.Н. Верновым, 100-летие со дня рождения которых отмечается в этом году и которые оказали на меня большое влияние как в выборе научного пути, так и, что, может быть, более важно, в стремлении быть и оставаться человеком в любой ситуации.

Мне довелось проработать с Сергеем Николаевичем 12 с лишним лет в качестве учёного секретаря его семинаров, всесоюзных конференций, школ. Из общей среды его выделяли большой талант физика, незаурядные творческие способности, потрясающая работоспособность.

Часто бывая в НИИЯФ МГУ в то время, я убедился в его большой заботе о кадрах, в особенности в его доступности сотрудникам: от руководителей отделов до простого работника. Сергей Николаевич никогда не притворялся, никогда не хотел поучать, а скорее, я бы сказал, учил. И сотрудники института испытывали к нему должное уважение и даже теплоту. Сергей Николаевич ко всем относился ровно и уважительно. Вообще же, он ценил в людях воспитанность, умение себя вести.

По характеру Сергей Николаевич был довольно мягким человеком. Но ради науки мягкость

Сергея Николаевича могла вмиг улетучиться. И я два раза видел это.

До сих пор в моей памяти живёт то особое, приподнятое, даже радостное настроение, которое возникало у меня при каждом посещении Сергея Николаевича в НИИЯФ МГУ или в Отделении ядерной физики и в Ленинграде, дома у его дочери Лены на Гражданском проспекте. Сейчас, спустя почти 40 лет, очень трудно в деталях вспомнить содержание всех бесед. Поскольку я в то время также жил на Гражданском проспекте, то почти при каждом приезде в Ленинград Сергей Николаевич мне звонил и спрашивал о том, какие вопросы остаются нерешёнными и какая помощь требуется. Конечно, всегда обсуждалась и предварительная, и окончательная программы проводимых мероприятий. Помню, как-то, когда я пришёл к Сергею Николаевичу на Гражданский проспект, он был простужен и сказал, что он лечится простым житейским способом, и спросил, как я смотрю на рюмку "Зубровки", лечебные свойства которой домашние не понимают. Я здесь оказался на стороне Сергея Николаевича.

Обычно, когда я собирался уходить, Сергей Николаевич говорил: "Давайте прогуляемся, я проведу вас до дома". Я понимал, что Сергею Николаевичу нужна прогулка, и мы шли сначала к моему дому, а потом назад. Сергею Николаевичу, чувствовалось, хотелось поделиться своими мыслями о преемниках, о тех, кто будет продолжать его дело. Так, поднимались вопросы при обсуждении кандидатур на должность заместителя директора НИИЯФ МГУ, на руководство Байкальским нейтринным экспериментом, которому он уделял большое внимание. Помню, как он тонко понимал эту ситуацию. Он говорил, что очень трудно найти такого руководителя, который обладал бы высокими моральными качествами и в то же время мог бы взаимодействовать с партийными органами, от которых можно было получить помощь, иначе можно провалить дело. Надо было обладать не только талантом, стойкостью и работоспособностью, но и уметь ориентироваться в политической жизни страны в тех условиях, чтобы получить множество непревзойдённых результатов, которых удавалось достичь благодаря усилиям С.Н. Вернова. Расставаясь после каждой прогулки, Сергей Николаевич говорил: "Ну вот, мы обсудили не только научные, но и политические проблемы".

Во время одного из моих приездов в НИИЯФ МГУ, для того чтобы обсудить программные вопросы по очередному Ленинградскому семинару, когда я вошёл к нему в кабинет, он сказал, что у него сейчас возникли проблемы: надо пойти домой, поскольку сложилось безвыходное положение — у его больной жены Марии Сергеевны, за которой необходим непрерывный уход, в данный момент никого не оказалось. Извиняясь, что вовлекает меня, чужого человека, в свои семейные дела, он предложил пойти вместе с ним, заодно пообедать у него дома и обсудить вопросы. Обед был по-студенчески прост: на столе, накрытом скатертью, были сыр, колбаса и бутылка сухого вина. Когда Сергей Николаевич рассказал мне про тяжёлую болезнь Марии Сергеевны, я понял, сколько жизненных сил у него отнимала эта постоянная боль. Он трогательно заботился о больной жене.

Судьба каждому отпускает свой срок, чтобы прожить всё, на что человек способен. И Сергей Николае-

вич показал, на что способен человек, если он предан делу, которому служит. Он был уникальной личностью, и вся его жизнь была посвящена науке. Давайте признаемся, что у нас и сейчас нет другого такого учёного в области физики космических лучей, способного в равной степени объединить оба аспекта космических лучей: космофизический и ядерно-физический. А разве немаловажным было собрать вокруг себя творческих людей в НИИЯФ МГУ, развить космическую науку, благодаря чему институт стал первоклассным научным институтом, широко известным не только в нашей стране.

Я чувствовал его особое отношение к эксперименту. Он считал, что без эксперимента физика космических лучей не может быть понята полностью. "Ни в коем случае не бросайте эксперимент", — говорил мне Сергей Николаевич. И я следую его "экспериментальному" завещанию, возглавляя лабораторию космических лучей, в которой в настоящее время осуществляется два космических эксперимента: исследование зарядового и энергетического спектров космических лучей с помощью твердотельных трековых детекторов, устанавливаемых на Международной космической станции, и изучение поляризации солнечного излучения комптоновским поляриметром — спутниковый вариант.

100 лет — солидный юбилей, приходят разные мысли о будущем, прошлом и настоящем. И они связаны, ибо ничто не проходит бесследно. Давно нет с нами Сергея Николаевича, но сегодня ты всматриваешься в недолгую жизнь этого уникального человека с неугасающим интересом и, кажется, что вот он — рядом, сейчас ты встретишь этого человека. И ты ждёшь, что нового предложит Сергей Николаевич, что будем делать. Мы постоянно вспоминаем о нём и будем вспоминать.

Творческая жизнь Сергея Николаевича прошла при советской власти в непростое время, но надо отметить, что советская власть создавала учёным более благоприятные условия для творчества, по сравнению с сегодняшними условиями в науке. Но надо удерживать высоко поднятую Сергеем Николаевичем планку космической физики, надо привлекать молодые таланты в эту область науки. Как мы можем помочь многим молодым пытливым людям в самом сложном, что им предстоит в жизни,



На 70-летнем юбилее С.Н. Вернова (справа налево): С.Н. Вернов, В.А. Дергачёв (ФТИ), Г.Б. Христиансен (НИИЯФ МГУ), Г.В. Куликов (НИИЯФ МГУ), Г.Е. Кочаров (ФТИ), Г.Я. Горячева (ФИАН) (Москва, 1980 г.).

— в выборе пути, в совершенствовании. Для этого надо обратиться к книге. Такой книгой должна стать биография С.Н. Вернова в издании "Жизнь замечательных людей". В книге через биографию Сергея Николаевича можно охватить всю историю космической физики, рассказать о наших современниках, о тех, кто уверенно состоялся в космической науке. Молодой читатель, особенно одарённый, не может не обратить свой взор на научную составляющую биографии С.Н. Вернова, что, возможно, подтолкнёт его к раздумьям о собственных жизненных идеалах.

6. Вместо заключения

Время, в которое жил Сергей Николаевич Вернов, было поистине грандиозным, и оно было связано с реализацией мечты человека: вырваться за пределы Земли. И это свершилось. И среди тех, кто реализовывал эту мечту, был Сергей Николаевич. Пожалуй, я закончу эти воспоминания, возможно, более объективной оценкой, чем моя, как этого времени, так и вклада тех, кто реализовывал эту мечту человечества. Цитирую выдержку из заключительных замечаний в статье "Десятилетия великих свершений" С.М. Кримиджиса, участника I-го Ленинградского семинара по космической физике в 1969 г., из книги [2]: «Размышляя над началом космической эры, поражаешься тому факту, что ключевую роль сыграла "холодная война". Трудно представить, что ракеты большой грузоподъёмности, которые позволяли запускать спутники и космические зонды, были бы разработаны в отсутствие военной гонки, вызванной соревнованием сверхдержав. Возможно, такие ракеты в конце концов были бы построены и без "холодной войны", но это могло занять гораздо больше времени, так что начало космической эры было бы отложено. Таким странным образом космическая наука выиграла от "холодной войны", как бы странно это ни звучало. Бесспорно, однако, что космическая эра была неизбежным следующим шагом в развитии цивилизации и она принесла огромную пользу для всего человечества. Таким образом, мы должны поблагодарить проводивших и пионеров этой эры: Королёва, фон Брауна, ван Аллена, Вернова и всех их коллег, следовавших своей мечте и претворивших её в жизнь своим воображением и умением».

Список литературы

1. Дергачев В А, в сб. *Академик Сергей Николаевич Вернов: к 100-летию со дня рождения* (М.: Изд-во МГУ, 2010) с. 286–297
2. Кримиджис С М, в сб. *4 октября 1957 года. Начало космической эры. Первая космическая* (Автор-сост. О В Закутия) (М.: ИКИ РАН, 2007) с. 202
3. *Труды II Междунар. семинара по проблеме "Генерация космических лучей на Солнце"*, Ленинград, 8–12 декабря 1970 г. (М., 1971)
4. *Труды III Междунар. семинара по проблеме "Ускорение частиц в космическом пространстве (околоземном и межпланетном космическом пространстве), галактике и метагалактике"*, Ленинград, 13–15 июля 1971 г. (М., 1972)
5. Кочаров Г Е, Дергачев В А (Ред.) *Труды IV Ленинградского междунар. семинара "Единообразие ускорения частиц в различных масштабах космоса"*, Ленинград, 16–18 августа 1972 г. (Л., 1972)
6. Кочаров Г Е, Дергачев В А (Ред.) *Труды V Ленинградского междунар. семинара "Солнечные космические лучи и их проникновение в магнитосферу Земли"*, Ленинград, 26–29 июня 1973 г. (Л., 1973) 408 с.
7. Кочаров Г Е, Дергачев В А (Ред.) *Труды VI Ленинградского междунар. семинара "Ускорение частиц и ядерные реакции в космосе"*, Ленинград, 19–21 августа 1974 г. (Л., 1974) 403 с.
8. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *Труды VII Ленинградского междунар. семинара "Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера"*, Ленинград, 25–28 мая 1975 г. (Л., 1975) 227 с.
9. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *Труды VIII Ленинградского междунар. семинара "Активные процессы на Солнце и проблема солнечных нейтрино"*, Ленинград, 25–27 сентября 1976 г. (Л., 1976)
10. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *IX Ленинградский семинар по космофизике: Труды междунар. семинара по космофизике "Солнечные космические лучи: генерация и взаимодействие с веществом от источника до Земли"*, Ленинград, 23–25 декабря 1977 г. (Л.: ЛИЯФ, 1977) 404 с.
11. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *X Ленинградский семинар по космофизике "Ядерная космическая физика"*, Ленинград, 6–8 октября 1978 г. (Л.: ЛИЯФ, 1978)
12. Кочаров Г Е (Ред.) *XI Ленинградский семинар по космофизике "Взаимодействие космических лучей со средой"*, Ленинград, 30 ноября–2 декабря 1979 г. (Л.: ЛИЯФ, 1979)
13. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *Космические лучи: 7-й Европейский симпозиум по космическим лучам*, Ленинград, 15–19 сентября 1980 г. (Л.: ЛИЯФ, 1980); *Изв. АН СССР Сер. физ.* (7) (1981)
14. Дергачев В А, Кочаров Г Е (Ред.) *XII Ленинградский семинар по космофизике "Комплексное изучение Солнца"*, Ленинград, 6–8 февраля 1982 г. (Л.: ЛИЯФ, 1982) 208 с.
15. Кочаров Г Е (Ред.) *XIII Ленинградский семинар по космофизике "Интенсивность космических лучей и космогенные изотопы"*, Ленинград, 19–21 ноября 1982 г. (Л.: ФТИ, 1982)

PACS numbers: 94.20.wq, 96.50.Vg, 96.50.Wx
DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011021.0218

С.Н. Вернов и исследования космических лучей в земной атмосфере

Ю.И. Стожков, Г.А. Базилевская

1. Введение

Сергей Николаевич Вернов (1910–1982) всю свою научную жизнь посвятил исследованию космических лучей (КЛ). Энергетический спектр КЛ охватывает огромный диапазон энергий — от $\sim 10^8$ до $\sim 10^{20}$ эВ, и С.Н. внёс важный вклад в изучение свойств космических частиц практически во всём этом диапазоне. В настоящем докладе будет обсуждаться интервал энергий КЛ от $\sim 10^8$ до $\sim 2 \times 10^{10}$ эВ. К этому интервалу энергий относятся энергии более 95 % всех космических частиц, падающих на границу атмосферы. Почти все частицы и их энергия поглощаются земной атмосферой.

Космические лучи — излучение, возрастающее с высотой в атмосфере, — были открыты Гессом в 1912 г., и к началу 30-х годов прошлого столетия уже было ясно, что это излучение приходит к нам из космического пространства. С.Н. Вернов понимал, что из-за поглощения частиц земной атмосферой изучение свойств КЛ в её верхних слоях имеет значительные преимущества по сравнению с изучением этих свойств в наземных экспериментах.

Ю.И. Стожков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, РФ
E-mail: stozhkov@fian.flands.mipt.ru

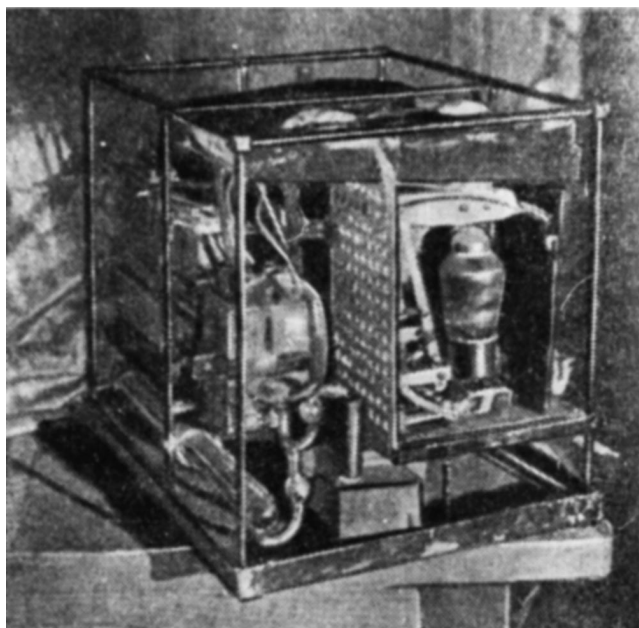


Рис. 1. Разработанный С.Н. Верновым первый радиозонд для измерения потоков КЛ на различных высотах в атмосфере Земли. Впервые информация о КЛ передавалась на Землю по радио. Вес радиозонда 28,6 кг.

Активная работа по исследованию свойств КЛ в земной атмосфере была начата С.Н. в 30-е годы прошлого столетия, когда он, будучи аспирантом Радиевого института в Ленинграде, впервые создал радиозонд для изучения свойств КЛ на различных высотах в земной атмосфере (рис. 1) [1, 2]. В основу этого прибора была положена конструкция метеорологического зонда, разработанного профессором П.А. Молчановым, который консультировал молодого учёного. Данные о потоках КЛ передавались на Землю по радио. Первый запуск такого прибора на метеорологических оболочках был проведён в 1935 г. С этого времени началось изучение свойств КЛ в земной атмосфере.

2. Ранние исследования космических лучей в земной атмосфере (с 1935 г. до 1957 г. — начала программы Международного геофизического года)

В середине 30-х годов прошлого столетия природа и основные свойства КЛ оставались нераскрытыми. В то время одним из главных являлся вопрос о наличии или отсутствии электрического заряда у этих загадочных космических частиц. Если электрический заряд существует, то земное магнитное поле будет действовать на эти частицы таким образом, что их потоки в атмосфере средних и экваториальных широт будут разными: потоки КЛ в экваториальных широтах должны быть меньше потоков на средних широтах. Для того чтобы решить этот кардинальный вопрос, С.Н. Вернов в 1935–1938 гг. организует проведение экспериментов в средних и экваториальных широтах. Радиозонды КЛ запускались в атмосферу не только с суши, но и с борта морского судна, которое следовало из Чёрного моря на Дальний восток [3–6]. Была обнаружена широтная зависимость потока КЛ, что доказывало наличие электрического заряда у космических частиц.

Великая Отечественная война прервала исследования в области физики КЛ. Они были возобновлены после её

окончания. В то время остро стоял вопрос о природе космических лучей, знаке их электрического заряда. Определить знак заряда космических частиц можно было по разности их потоков, приходящих с восточного и западного направлений. Оценки показывали, что величина этого эффекта максимальна на больших высотах в атмосфере в районе геомагнитного экватора. Поэтому в 1949 г. С.Н. Вернов со своими коллегами из ФИАНа и НИФИ-2 МГУ организует новую морскую экспедицию в экваториальные районы Индийского океана. Одним из основных результатов этой экспедиции было обнаружение восточно-западного эффекта в потоке космических лучей. Поток частиц, зарегистрированных с западного направления, был больше потока с восточного направления [7]. Это однозначно свидетельствовало о наличии положительного заряда у космических частиц, т.е. они состояли из протонов.

После войны страна должна была в кратчайшие сроки создать ядерное (и затем термоядерное) оружие. Необходимы были сведения о взаимодействии частиц с ядрами различных атомов. В то время ускорительная техника только начала делать первые шаги, и КЛ — частицы, ускоренные до больших энергий природным ускорителем, — были использованы для получения информации о ядерных взаимодействиях. Это направление в исследованиях КЛ получило название ядерно-физического (в отличие от космофизического направления, о котором речь пойдёт ниже).

В 1946 г. в разрушенной войной стране были созданы новые научные подразделения для изучения ядерных взаимодействий КЛ с веществом. К этим подразделениям относятся 2-й Научно-исследовательский физический институт МГУ (теперь Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ) МГУ), Памирская высокогорная научная станция ФИАН, расположенная на высоте 3860 м, Долгопрудненская научная станция ФИАН (ДНС ФИАН), с 1996 г. носящая имя С.Н. Вернова.

Широкий круг задач был решён в то время с помощью экспериментов в земной атмосфере, организованных С.Н. со своими коллегами. К ним относятся установление основных процессов взаимодействий КЛ в земной атмосфере, определение главных характеристик ядерной и электромагнитной компонент. На основе экспериментальных данных была создана теория ливней, включающая в себя электромагнитную и ядерную компоненты [8]. Было показано постоянство сечения взаимодействия КЛ с веществом в области энергий $E \approx (3–40)$ ГэВ и практическая независимость энергии, затрачиваемой на расщепление ядра, от энергии первичной частицы (~ 400 МэВ).

В конце 1940-х — начале 1950-х годов С.Н. организовал измерения потока КЛ в верхних слоях атмосферы на высотах 70–100 км. Запускались ракеты с полигона Капустин Яр. Был получен важный результат, состоящий в том, что поток этих частиц на высотах $\approx (35–100)$ км оставался постоянным. Руководил этими экспериментами А.Е. Чудаков.

В 1951 г. на военном самолёте была создана "летающая лаборатория" для исследования высокоэнергичных частиц спектра КЛ. Изучались частицы с энергиями $E = (10^{11}–10^{13})$ эВ на высотах 9–12 км. Работами руководил сотрудник ДНС ФИАН Ю.А. Смородин. В этих экспериментах использовалась передовая в то время

аппаратура (камера Вильсона в магнитном поле, искровые камеры, ливневые установки, рентген-эмульсионные камеры). Была обнаружена масштабная инвариантность — подобие спектров рождения частиц в ядерных взаимодействиях частиц разных энергий. Эти работы положили начало крупномасштабному международному рентген-эмульсионному эксперименту "Памир", главной задачей которого являлось изучение ядерных взаимодействий высокоэнергичных космических частиц ($E > 10^{14}$ эВ). Эксперимент выполнялся в течение нескольких десятилетий в горах Памира на высоте 3860 м. Более детальная информация об этом периоде деятельности С.Н. дана в работе [9].

В 1949 г. за цикл работ по исследованию взаимодействий КЛ с веществом, выполненных в атмосфере Земли, С.Н. Вернов был награждён Сталинской премией I степени.

3. Метод частого регулярного атмосферного зондирования потоков космических лучей

В связи с проведением программы Международного геофизического года в 1957 г. С.Н. Вернов совместно с Н.В. Пушковым создали в СССР сеть наземных и стратосферных станций по изучению временных и пространственных изменений потоков КЛ. Эти российские наземные станции, которые успешно работают до настоящего времени, представляют собой необходимую составную часть мировой сети. Стратосферные станции являются единственным в мире прибором для исследования модуляционных эффектов КЛ в стратосфере — в области энергий, недоступной наземным установкам.

Непрерывные измерения КЛ ионизационной камерой на поверхности Земли были начаты С. Форбушем в 1935 г. В СССР первая ионизационная камера была создана Н.Л. Григоровым, Ю.Г. Шафером и С.П. Муратовым в конце 1940-х годов. С 1949 г. началась непрерывная регистрация потоков КЛ в Якутске и под Москвой в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) [10].

К тому времени было ясно, что наблюдаемые временные изменения (вариации) потоков КЛ зависят от энергии частиц. С уменьшением энергии вариации возрастают. Это послужило основанием для проведения регулярных измерений потоков КЛ в атмосфере Земли, начиная от её поверхности до высот 30–35 км.

С середины 1957 г. С.Н. Вернов вместе с А.Н. Чархачьяном начали проводить регулярные измерения потоков заряженных частиц в земной атмосфере. Для измерений был разработан специальный радиозонд и приёмная наземная аппаратура [11]. Те же самые детекторы (газоразрядные счётчики СТС-6 отечественного производства) применяются и в современном радиозонде (рис. 2).

Атмосфера Земли и земное магнитное поле используются для исследования вариаций потоков КЛ различных энергий в энергетическом диапазоне 0,1–20 ГэВ.

Сначала ежедневные измерения проводились в атмосфере средних широт (под Москвой в г. Долгопрудном) и северных полярных широт (Мурманская область). С 1963 г. они стали выполняться также в обсерватории "Мирный" (Антарктида). В течение нескольких десятков лет измерения с помощью одних и тех же приборов проводились в Крыму, под Алма-Атой, в Ереване, Норильске и Тикси [12]. Было организовано несколько

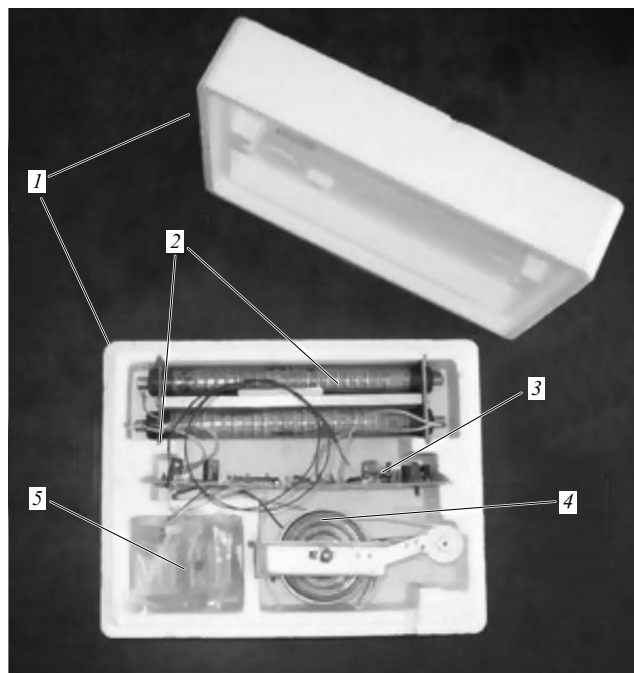


Рис. 2. Стандартный радиозонд для измерения заряженных частиц в земной атмосфере: 1 — пенопластовая коробка; 2 — детекторы заряженных частиц, состоящие из двух газоразрядных счётчиков СТС-6 отечественного производства с алюминиевым фильтром толщиной 7 мм между ними, позволяющим отделять радиоактивные частицы от частиц КЛ; 3 — электронная схема с высоковольтным преобразователем и радиопередатчиком; 4 — датчик атмосферного давления; 5 — химические батареи. Вес радиозонда около 0,6 кг.

морских экспедиций, в которых было измерено планетарное распределение потоков КЛ в периоды максимумов и минимумов солнечной активности [13]. С начала 1990-х годов из-за сокращения финансирования число запусков радиозондов было значительно сокращено. Вместо ежедневных запусков радиозондов теперь выполняются по три запуска в неделю на средних широтах (г. Долгопрудный), в северных полярных широтах (г. Апатиты) и в Антарктиде в обсерватории "Мирный". К настоящему времени сделано более 83000 запусков радиозондов.

4. Основные результаты многолетних регулярных наблюдений космических лучей в атмосфере

Почти сразу же после начала регулярных измерений заряженных частиц в атмосфере были зарегистрированы случаи возрастания их потоков. Это были ускоренные во взрывных процессах на Солнце частицы (солнечные космические лучи), пришедшие на Землю. Первые вспышки солнечных КЛ были зарегистрированы в 1958 г. Ранее такие частицы регистрировались наземными приборами. Эти события были редкими (с 1942 г. по 1956 г. было зарегистрировано шесть событий). В стратосфере частота этих событий увеличилась в несколько раз, а потоки солнечных КЛ превышали фон от галактических частиц в 10–100 раз.

Рисунки 3а и 4а показывают высотный ход КЛ до и во время прихода частиц, ускоренных в солнечных вспышках, первая из которых зарегистрирована в июле 1959 г., а вторая (одна из последних вспышек) — в январе 2005 г.

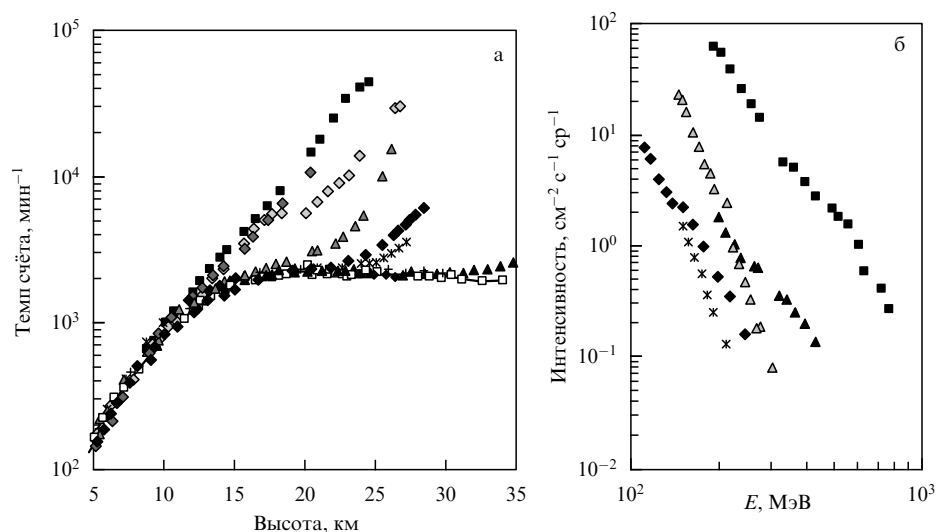


Рис. 3. (а) Высотный ход КЛ, зарегистрированный в нескольких полётах радиозондов до и после серии мощных солнечных вспышек, произошедших 9, 14 и 16 июля 1959 г. Измерения проведены в северных полярных широтах с 9 по 17 июля 1959 г. Данные разных полётов показаны разными символами. Фон от галактических КЛ показан светлыми квадратами. (б) Интегральные спектры солнечных протонов, полученные из данных радиозондов, представленных на рис. а.

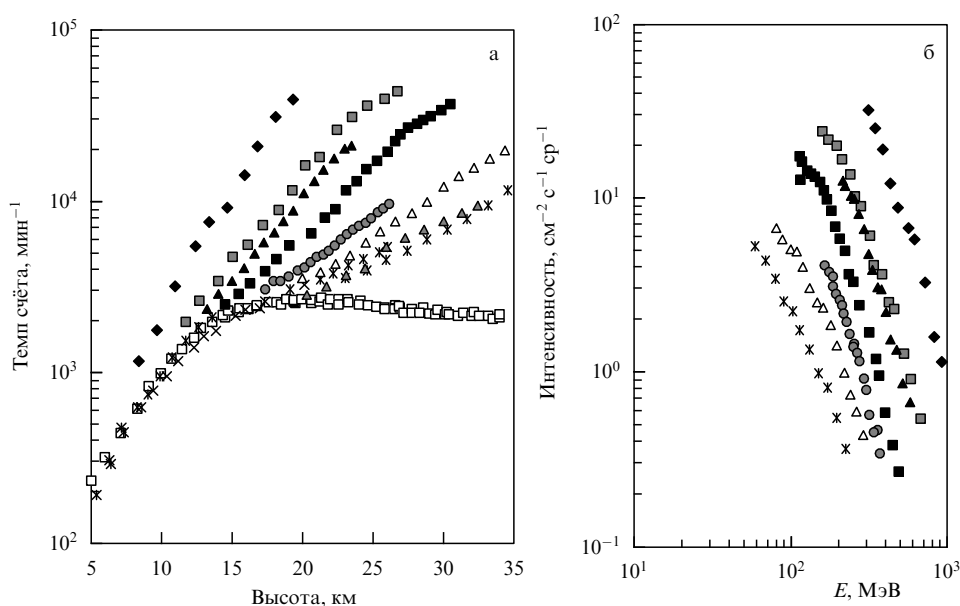


Рис. 4. Высотный ход КЛ, зарегистрированный в одной из последних мощных вспышек солнечных КЛ, произошедшей 5 января 2005 г. Измерения проведены в северных полярных широтах с 20 по 21 января 2005 г. Фон от галактических КЛ показан светлыми квадратами. (б) Интегральные спектры солнечных протонов, полученные из данных радиозондов, представленных на рис. а.

Видно, что на высотах более 20 км поток частиц увеличивается в несколько десятков раз, по сравнению с фоновым потоком галактических КЛ. На рисунках 3б и 4б приведены энергетические спектры солнечных протонов. Спектры получены из данных, представленных на рис. 3а и 4а.

К настоящему времени в стратосфере зарегистрировано 112 случаев возрастания количества частиц, ускоренных во вспышечных событиях на Солнце. В 1959 г. впервые было открыто новое явление — приход на Землю энергичных солнечных частиц, дополнительно ускоренных на фронте ударной волны.

Регулярные измерения потоков заряженных частиц позволили получить новые данные о модуляционных

эффектах галактических КЛ. На рисунке 5 показан временной ход среднемесячных значений потоков галактических КЛ, зарегистрированных в атмосфере полярных и средних широт с 1957 г. по настоящее время. Приведены данные в максимуме кривой их поглощения в атмосфере (значения N_m), который наблюдается на высотах 18–23 км [13].

Имеется несколько особенностей во временных зависимостях N_m . Наблюдается большая амплитуда приблизительно 11-летних вариаций потоков КЛ (примерно до 60 %, тогда как наземные установки регистрируют изменения до ≈ 20 %). Впервые в 11-летних циклах было открыто чередование остроугольных временных зависимостей N_m (1957–1969 гг., 1981–1989 гг., 2001 г. —

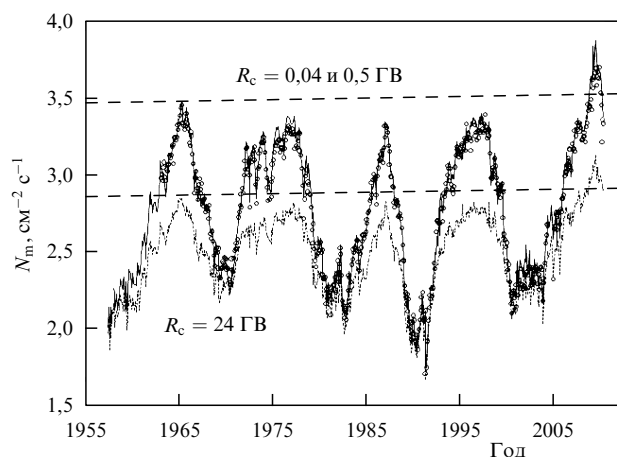


Рис. 5. Среднемесячные значения потока галактических КЛ в максимуме переходной кривой в атмосфере N_m . Данные получены в северных полярных широтах с геомагнитной жёсткостью обрезания $R_c = 0,5$ ГВ (верхняя сплошная кривая), в Антарктиде с $R_c = 0,04$ ГВ (светлые кружки) и в средних широтах с $R_c = 2,4$ ГВ (нижняя пунктирная кривая). Горизонтальные штриховые прямые показывают максимальные уровни потоков галактических КЛ, достигнутые за период измерений 1957–2008 гг., до аномального возрастания потоков в 2009 г.

настоящее время) и зависимостей, имеющих плато (1970–1979 гг., 1990–2000 гг.). Полный цикл изменений составляет около 22 лет и совпадает с 22-летней периодичностью изменений общего магнитного поля Солнца.

Временные вариации потоков КЛ вызваны соответствующими изменениями солнечной активности. Коэффициент корреляции между среднегодовыми потоками КЛ, полученными в атмосфере северных и южных полярных широт, и числом солнечных пятен R_z равен примерно 0,9 при временном сдвиге между потоком КЛ и уровнем солнечной активности $\Delta t \approx 1$ год.

Примерно через 15 лет после начала регулярных измерений потоков КЛ в атмосфере было открыто новое явление в модуляции потоков космических частиц в гелиомагнитосфере. Этот эффект, как выяснилось позднее, вызван наличием регулярной составляющей межпланетного магнитного поля в гелиосфере, которая вызывает дрейф заряженных частиц. Направление скорости дрейфа КЛ зависит от знака электрического заряда частицы и направления силовых линий магнитного поля.

Околосолнечное пространство заполнено солнечным ветром с вмороженным в него магнитным полем. Если исключить периоды высокой солнечной активности, то межпланетное магнитное поле в грубом приближении можно представить в виде диполя с силовыми линиями, вытянутыми вдоль солнечного радиуса и закрученными вращением Солнца в спирали Архимеда. Каждые ≈ 11 лет в период максимума солнечной активности (или вблизи него) происходит инверсия этого поля. В этот период изменяется направление магнитного поля в полярных районах Солнца и межпланетной среде. Изменяются на противоположные и направления скоростей дрейфа КЛ в гелиомагнитосфере.

Эффект изменения знака солнечного магнитного поля (его инверсия, или переполусовка) ярко виден в появлении гистерезиса в КЛ, когда нарушается соотношение между потоками частиц с разной жёсткостью (энергией) вследствие изменения зависимости коэффи-

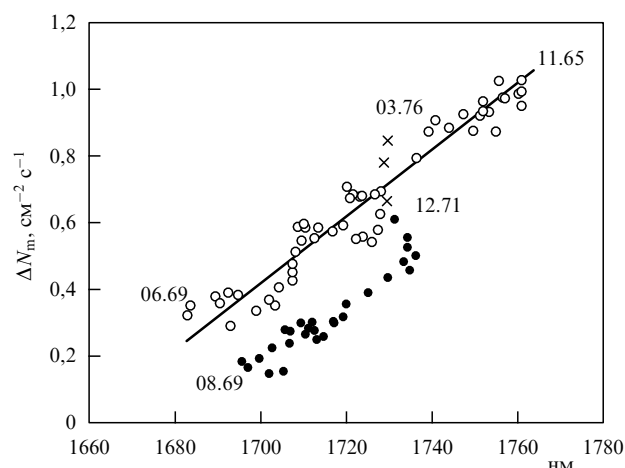


Рис. 6. Регрессия между потоками галактических КЛ малых энергий ΔN_m ($E \approx (0,5–1,5)$ ГэВ) и больших энергий ($E > 12$ ГэВ). Потоки частиц малых энергий получены из измерений в полярной и средне-широтной атмосфере на высотах 18–23 км. Данные экваториального нейтронного монитора Уанкайо дают поток высокоэнергичных частиц. Различные символы соответствуют разным временным интервалам: светлые кружки — 02.1965 г. – 07.1969 г., тёмные кружки — 08.1969 г. – 12.1971 г., крестики — 01.1972 г. – 03.1972 г. Цифры указывают периоды измерений (месяц.год). Как правило, имеется линейная связь между низкоэнергичными и высокоэнергичными потоками галактических КЛ, которая показана прямой. Однако в период инверсии общего магнитного поля (07.1969–12.1971 гг.) эта связь нарушается: значения, показанные тёмными кружками, выпадают из общей закономерности.

циента диффузии частиц от их жёсткости. Гистерезис в галактических КЛ наблюдается в каждом периоде инверсии магнитных полей, но наиболее ярко он проявился в 1969–1972 гг. (рис. 6).

Неожиданный эффект в модуляции галактических КЛ был обнаружен в конце 2008 г. – начале 2009 г. В этот период был зарегистрирован самый высокий уровень потока этих частиц за более чем полувековую историю их наблюдений (см. рис. 5). В начале 2009 г. в полярных широтах величина N_m превзошла уровень 1965 г. приблизительно на 15 % (на нейтронных мониторах на уровне моря превышение составило не более 2 %).

Высокая величина потока галактических КЛ на орбите Земли была вызвана очень длительным низким уровнем солнечной активности. Величина межпланетного магнитного поля составляла $B \approx 3,5$ нТл. Обычно в периоды минимумов солнечной активности $B \approx 5$ нТл. В середине 2010 г. поток КЛ практически достиг уровня, наблюдавшегося в минимуме солнечной активности 1965 г.

Нужно отметить, что минимум текущего, 24-го, солнечного цикла является беспрецедентно длительным и продолжается до сих пор. С большой степенью вероятности мы вступили в период продолжительной низкой солнечной активности, подобного минимуму Маундера (1645–1715 гг.) или минимуму Дальтона (1790–1820 гг.).

За открытие частых вспышек солнечных КЛ, наблюдаемых в стратосфере, открытие эффектов в КЛ, вызываемых общим магнитным полем Солнца, и уникальные экспериментальные данные по модуляции КЛ и их связи с солнечной активностью группа сотрудников Долгопрудненской научной станции ФИАН во главе с

А.Н. Чарахчьяном была удостоена Ленинской премии (1976 г.).

Примерно 15–20 лет назад стало ясным, что КЛ являются необходимой составляющей во всех электрических явлениях, наблюдаемых в атмосфере Земли [14]. КЛ теряют в атмосфере большую часть энергии, которая идёт на ионизацию и возбуждение атомов воздуха. КЛ создают ионы практически на всех высотах атмосферы — от уровня Земли до ≈ 35 км. Эти ионы обеспечивают работу глобальной электрической цепи, участвуют в образовании грозных облаков. Высокоэнергичные космические частицы с энергиями более 10^{14} эВ образуют ливни в земной атмосфере, состоящие из множества вторичных заряженных частиц. Во время грозы по одному из ионизованных треков этих частиц распространяются молниевые разряды.

Через процесс образования заряженных центров конденсации (ионы, рождённые КЛ, прилипают к нейтральным центрам конденсации) КЛ влияют на рост облачности и грозной облачности, что, в свою очередь, сказывается на уровне осадков. Наблюдается уменьшение уровня осадков во время резких падений потоков КЛ (так называемых форбуш-понижений) и увеличение осадков после прихода на Землю дополнительных потоков частиц, ускоренных в мощных солнечных вспышках [14].

С 2009 г. на ускорителе в ЦЕРНе с участием сотрудников Долгопрудненской научной станции ФИАН проводится международный эксперимент "Cloud", главная цель которого заключается в установлении физических механизмов влияния заряженных частиц на атмосферные характеристики.

6. Будущее регулярных наблюдений космических лучей в земной атмосфере

Несмотря на финансовые и кадровые трудности, которые переживает наша наука за последние примерно 20 лет, регулярные наблюдения потоков заряженных частиц в атмосфере продолжают осуществляться благодаря грантам РФФИ и программам Президиума РАН.

Безусловно, необходимо проводить эти измерения и исследовать модуляционные эффекты в космических лучах в период текущего и последующих солнечных циклов. С большой вероятностью, ближайшие циклы солнечной активности будут аномально низкими. Это позволит разработать практическую модель, связывающую процессы на Солнце и в космических лучах. Ценность этих исследований состоит в обоснованном прогнозе космической погоды в солнечной системе. Такой прогноз необходим для обеспечения радиационной безопасности длительных космических полётов.

Новым направлением, в котором КЛ играют определяющую роль, является изучение их связи с электрическими явлениями, наблюдаемыми в земной атмосфере. КЛ ответственны за все наблюдаемые атмосферные электрические явления. В последние годы много работ посвящено исследованию влияния потоков КЛ на атмосферные процессы и климат Земли.

Сотрудники, занятые в эксперименте по мониторингу космических лучей в атмосфере Земли, приложат все усилия для получения новых экспериментальных данных и новых научных результатов в ближайшие десятилетия.

7. Заключение

Сергей Николаевич Вернов обладал уникальной интуицией в выборе перспективных направлений исследований в области физики КЛ. Одной из самых удачных и плодотворных идей, выдвинутых им в далёкие 30-е годы прошлого века, было исследование КЛ в атмосфере Земли. Предложенный им метод частого регулярного стратосферного зондирования принёс фундаментальные знания о модуляционных эффектах КЛ, их связи с солнечной активностью и о роли КЛ в атмосферных процессах. Эти исследования до сих пор успешно продолжаются, дают новые результаты и имеют большие перспективы на будущее.

Список литературы

1. Вернов С Н, в сб. *Труды Всесоюз. конф. по изучению стратосферы, 31 марта–6 апреля 1934 г.* (Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1935) с. 423
2. Vernoff S *Nature* **135** 1072 (1935)
3. Вернов С Н *ДАН СССР* **14** 263 (1937)
4. Вернов С Н *Изв. АН СССР* (5/6) 738 (1938)
5. Вернов С Н *ДАН СССР* **23** 141 (1939)
6. Вернов С Н, Миронов А В *ДАН СССР* **23** 138 (1939)
7. Вернов С Н и др. *ДАН СССР* **68** 253 (1949)
8. Зацепин Г Т *ДАН СССР* **57** 993 (1949)
9. Базилевская Г А, Стожков Ю И, в сб. *Академик Сергей Николаевич Вернов: к 100-летию со дня рождения* (М.: Изд-во МГУ, 2010) с. 315
10. Шафер Г В, Шафер Ю Г *Прецизионные наблюдения космических лучей в Якутске* (Новосибирск: Наука, 1984) 733 с.
11. Чарахчьян А Н *УФН XXXIII* **83** 35 (1964) [Charakhch'yan A N *Sov. Phys. Usp.* **7** 358 (1964)]
12. Стожков Ю И и др. "Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007)", Препринт № 14 (М.: ФИАН, 2007)
13. Stozhkov Y I et al. *Adv. Space Res.* **44** 1124 (2009)
14. Stozhkov Y I *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **29** 913 (2003)

PACS numbers: **01.65.+g**, 94.20.wq, 96.50.S–
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102m.0223

С.Н. Вернов и исследования космических лучей в Якутии

Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский

Скоро будет отмечаться 100-летие с момента открытия космических лучей. Многие направления физики космических лучей связаны с именем Сергея Николаевича Вернова, его коллег, учеников и последователей. Когда С.Н. Вернов начинал исследования, прошло всего 20 лет после открытия космических лучей, о которых тогда мало что было известно: было не ясно, являются ли они заряженными частицами, какова масса и заряд этих частиц, где и как они возникают. В своих пионерских работах С.Н. Вернов смог ответить на некоторые из этих вопросов, а на другие вопросы искали, находили и продолжают находить ответы его многочисленные коллеги и последователи, составляющие обширную научную школу С.Н. Вернова.

Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский. Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, РФ
E-mail: berezhko@ikfia.ysn.ru, krymsky@ikfia.ysn.ru

Формированию этой школы, поддержке соответствующих исследований в разных регионах СССР и за его пределами Сергей Николаевич уделял много времени и щедро расходовал на это свою колоссальную энергию. Мы считаем своим долгом осветить некоторую часть этой огромной работы: становление исследований в области физики космических лучей в одном из самых удалённых регионов страны — в Якутии.

Начало этим работам было положено в довоенный период благодаря энтузиазму молодого выпускника Томского университета Ю.Г. Шафера. Ю.Г. Шафер начинает в 1938 г. изучение космических лучей на кафедре физики в Якутском педагогическом институте. Вместе с директором института он направляет в ФИАН адресованное Д.В. Скобельцыну письмо, в котором сообщается, что институт утвердил план научно-исследовательских работ на 1939 г. по регистрации космического излучения и сопоставлению данных космической радиации с барометрическим, температурным, геомагнитным факторами, интенсивностью солнечной радиации и явлениями северных сияний на широтах Якутской республики. В письме также отмечалось, что ранее было получено предварительное согласие Д.В. Скобельцына и С.Н. Вернова "путём письменной связи консультировать эту работу и оказывать ей всемерную поддержку". Авторы просили Д.В. Скобельцына "в случае необходимости защитить своим авторитетом постановку этой темы в плане научной работы института перед Наркомпросом РСФСР". С этого момента в течение многих последующих десятилетий С.Н. Вернов являлся научным руководителем работ, ведущихся по этой тематике в Якутске.

В 1947 г. была создана Якутская научно-исследовательская база АН СССР. Председатель Совета филиалов и баз АН СССР академик В.Г. Волгин писал президенту АН СССР С.И. Вавилову: "При определении структуры Якутской базы Академии наук СССР были учтены ходатайства Физического института АН СССР им. Лебедева, Института земного магнетизма Главного управления Гидрометслужбы при Совете Министров СССР, Второго научно-исследовательского института физики МГУ и представителей якутских научных учреждений о включении в программу работ Базы исследований в области космических лучей и организации при Якутской базе АН СССР Станции космических лучей". Для ведения этой работы был рекомендован вернувшийся с фронта Ю.Г. Шафер. Постановлением Президиума АН СССР от 25 декабря 1947 г. был утверждён состав Учёного совета Якутской базы в количестве 30 человек. В него вошёл доктор физико-математических наук С.Н. Вернов.

В том же 1947 г. академик В.Г. Волгин и директор Научно-исследовательского института земного магнетизма (теперь Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)) Н.В. Пушков обратились к академику С.И. Вавилову с обоснованием необходимости создания на территории СССР сети станций непрерывной регистрации космических лучей, оснащённых прецизионной аппаратурой, которую предполагалось закупить в США. Поскольку попытки закупить эту аппаратуру — ионизационные камеры — не дали результата, было решено разработать отечественные приборы. Ю.Г. Шаферу, получившему соответствующее задание, была создана

возможность организовать её на базе лаборатории космических лучей Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) МГУ. Работа с самого начала пользовалась поддержкой С.Н. Вернова. К ней были привлечены конструкторские и технологические силы, имевшиеся в НИИЯФ. Эту часть работы возглавил заведующий мастерскими А.С. Муратов. Н.Л. Григоров, имевший опыт разработки и изготовления высокоточных крутильных электрометров оригинальной конструкции, также был привлечён к этой работе. Вот что он написал в воспоминаниях: "Опытный образец (прибор С-2) был разработан и изготовлен в течение 1947–1948 гг. Он представлял собой сферическую стальную камеру объёмом в 20 л, наполненную химически чистым аргонном. Внутри основной камеры находилась компенсационная камера, в которой ионизационный ток создавался β -частицами радиоактивного препарата. Компенсационный ток по величине равен току, создаваемому космическими лучами в основной камере, но имеет противоположный знак. Поэтому прибор измерял отклонения ионизационного тока, созданного космическими лучами, от некоторого среднего значения, компенсируемого током компенсационной камеры. Этот так называемый нуль-метод обеспечивал высокую чувствительность прибора".

Опытный образец ионизационной камеры в 1948 г. прошёл успешные испытания в Якутске. За разработку и создание прибора коллективу в составе Ю.Г. Шафера, Н.Л. Григорова и А.С. Муратова в 1950 г. была присуждена Сталинская премия.

На базе опытного образца были разработаны ионизационные камеры АСК-1 и АСК-2 объёмом 900 и 50 л. В течение 1950–1952 гг. на заводе "Физприбор" были изготовлены первые серии этих приборов и ими были оснащены девять советских станций космических лучей.

Прецизионные регистраторы на некоторых станциях проработали более 30 лет, а прибор АСК-1, установленный в Якутске в 1953 г., продолжает функционировать и сейчас! Сеть станций, помимо её научного значения, сыграла роль "катализатора", способствовавшего запуску научных исследований на обширной территории СССР.

Уже в первый период работы новой аппаратуры в Якутске удалось детально проверить теорию метеорологических вариаций интенсивности космических лучей, созданную Е.Л. Фейнбергом и Л.И. Дорманом. Резко континентальный климат Якутии способствовал изучению годовых вариаций, предсказываемых этой теорией. Причина этих вариаций состоит в том, что с повышением температуры атмосферы её вертикальная протяжённость увеличивается и мюоны, образованные в верхних слоях атмосферы в столкновениях космических лучей с атомами атмосферы, на пути к прибору испытывают более частые распады, что уменьшает их наблюдаемую интенсивность.

Вариации интенсивности космических лучей, измеряемые ионизационной камерой, наблюдались во время прохождения циклонов и во время магнитных бурь. Наблюдались также периодические вариации, имеющие период солнечных суток. Высказывалось предположение, что последние также связаны с колебаниями температуры атмосферы. Однако А.И. Кузьмин, используя данные температурного зондирования в Якутске и применив теорию метеоэффектов, показал, что введение

температурных поправок приводит не к уменьшению, а к увеличению амплитуды суточных вариаций. Было доказано, что прибор наблюдает анизотропию космических лучей [1].

Исследованию характеристик этого явления, раскрытию его физической природы и изучению следствий, вытекающих из этих результатов, были посвящены экспериментальные и теоретические работы А.И. Кузьмина и его учеников в течение многих лет. Для этого были сконструированы мюонные телескопы, состоящие из газоразрядных счётчиков Гейгера–Мюллера. Счётчики помещались в лотки по несколько штук, а лотки располагались в три горизонтальных ряда, один над другим. Система совпадений отбирала одновременные срабатывания счётчиков во всех трёх рядах. При этом лотки, в которых схема отбирала совпадения, комбинировались таким образом, чтобы отбирать события прохождения мюона с севера или с юга (с востока–запада). Каждая такая комбинация лотков именовалась мюонным телескопом. Соответственно телескопы, регистрирующие мюоны из северного и южного направлений, образовывали систему "скрещенных телескопов". Скрещенные телескопы были установлены на поверхности земли и в шахте, в штреках на глубинах 7, 20 и 60 м водного эквивалента (реальная глубина примерно в 1,8 раза меньше). Якутский подземный комплекс скрещенных телескопов явился инструментом, с помощью которого удалось очень точно определить характеристики анизотропии космических лучей и её энергетический спектр, а также спектры других вариаций космических лучей.

Комплекс скрещенных телескопов позволил выделить суточные вариации интенсивности космических лучей, обусловленные анизотропией их углового распределения в околоземном космическом пространстве. Эти вариации, в отличие от вариаций любой другой природы, в том числе метеорологического происхождения, различались в разных телескопах по амплитуде и фазе. Зная геометрию телескопов, можно было определить точные параметры анизотропии. Исследования анизотропии и её изменений со временем позволили установить её физическую природу. В среднем наблюдаемая анизотропия обусловлена избытком космических лучей, приходящих на вечернюю сторону Земли. Её природа обусловлена переносом космических лучей солнечным ветром и вмороженным в него межпланетным магнитным полем [2]. Этот перенос создаёт направленное движение частиц космических лучей радиально от Солнца. Дефицит космических лучей во внутренней Солнечной системе, возникающий вследствие этого, компенсируется их диффузией внутрь. Если бы межпланетное магнитное поле было полностью неупорядоченным (турбулентным), то диффузия внутрь создавала бы также радиально направленное движение космических лучей, но только в сторону Солнца. В итоге в стационарных условиях не наблюдалось бы никакой анизотропии. Однако межпланетное поле имеет регулярную компоненту, которая вытянута в радиальном направлении и закручена вращением Солнца в спираль Архимеда. Поэтому диффузия космических лучей происходит преимущественно под углом к радиальному направлению. Диффузия в радиальном направлении уравнивается конвективным выносом космических лучей солнечным ветром, тангенциальная же компонента диффузионного потока, направленная

перпендикулярно линии Солнце–Земля, оказывается нескомпенсированной. Подсчёт величины этого эффекта показал, однако, что теория даёт величину на 15–20 % меньшую, чем наблюдается в эксперименте.

Разрешение парадокса связано с адиабатическим изменением энергии быстрых заряженных частиц, которое они испытывают, распространяясь в рассеивающей среде: в расширяющейся среде энергия частиц уменьшается, а в случае сжимающейся среды — увеличивается.

Плазма солнечного ветра повсеместно испытывает расширение. Поэтому внутри орбиты Земли происходят потери энергии частицами космических лучей, что обуславливает их дополнительный дефицит. Компенсация этого дефицита дополнительной диффузией устраняет парадокс. Разрешение парадокса привело к установлению правильного уравнения переноса космических лучей [2] для их функции распределения $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla f) - \mathbf{w} \nabla f + \nabla \mathbf{w} \frac{\mathbf{p}}{3} \frac{\partial f}{\partial p}.$$

Здесь t — время, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, $\mathbf{p}$ — импульс частиц космических лучей. Первый член в правой части описывает пространственную диффузию космических лучей с тензором диффузии κ ; второй — конвективный перенос, обусловленный движением рассеивающей среды со скоростью $\mathbf{w}$; третий член описывает адиабатическое изменение энергии космических лучей в сжимаемой среде. Несколько позднее это уравнение было выведено в работе Е. Паркера [3], а затем на основе последовательного кинетического подхода — А.З. Долгиновым и И.Н. Топтыгиным [4].

Уравнение переноса, как оказалось, способно описывать процессы ускорения частиц в тех средах, в которых вместо расширения имеет место сжатие. Такая ситуация реализуется на фронтах ударных волн, где реализуются условия для наиболее эффективного ускорения космических лучей — процесса регулярного ускорения. Когда была решена задача об ускорении заряженных частиц сильной ударной волной [5], Сергей Николаевич Вернов высоко оценил полученный результат и представил статью в *Доклады АН СССР*. Следует упомянуть о том, что у С.Н. Вернова были свои эксперты, на мнение которых он мог опираться. Чаще всего в их роли выступали сотрудники НИИЯФ МГУ. В данном случае его внимание к полученному решению привлек Борис Аркадьевич Тверской. Обнаруженный механизм регулярного ускорения имеет довольно широкие приложения в астрофизике космических лучей (см., например, обзор [6]). Развитие теории регулярного ускорения космических лучей в остатках сверхновых, в особенности нелинейной теории, последовательно учитывающей обратное воздействие ускоренных частиц на структуру и динамику ударной волны [7], даёт веские основания полагать, что наблюдаемый спектр космических лучей с энергией вплоть до 10^{17} эВ формируется в галактических остатках сверхновых (см. обзоры [8, 9]). Важно отметить, что нелинейная теория способна детально предсказывать свойства нетеплового излучения остатков сверхновых, порождаемого ускоренными в остатках космическими лучами. Сравнивая предсказания теории для индивидуальных остатков сверхновых с измерениями, которые ведутся в широком диапазоне длин волн — от радиодиапазона до гамма-диапазона включительно, можно получать решающие подтверждения относительно как

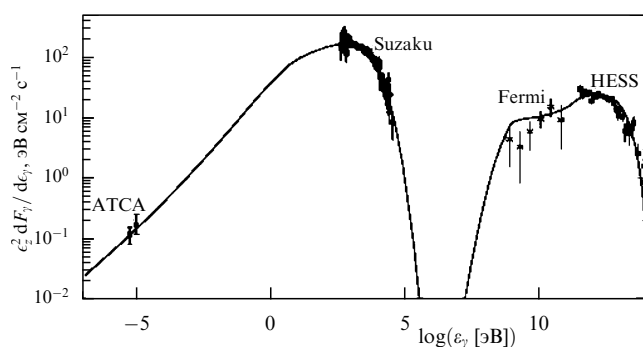


Рис. 1. Поток энергии нетеплового излучения остатка сверхновой RXJ1713.7-3946 как функция энергии фотонов, рассчитанный в рамках кинетической нелинейной теории ускорения космических лучей [10]. Приведены также результаты измерений радиоизлучения (телескоп ATCA (Australia Telescope Compact Array)), рентгеновского (космическая обсерватория "Suzaku") и ТэВ-ного излучения (система гамма-телескопов HESS (HighEnergy Stereoscopic System)). Представлены также измерения ГэВ-ного излучения, полученные космической гамма-обсерваторией им. Ферми в 2009 г.

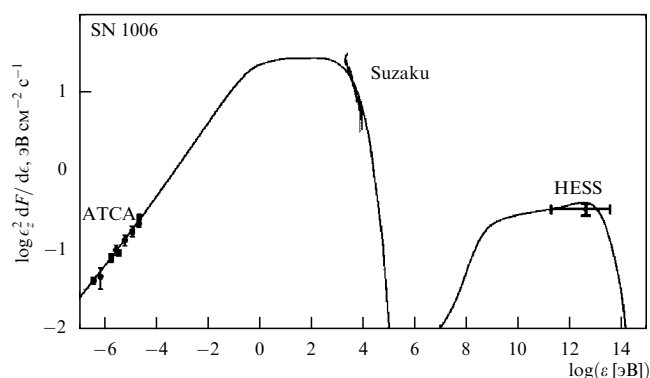


Рис. 2. Поток энергии нетеплового излучения остатка сверхновой SN 1006 как функция энергии фотонов, рассчитанный в рамках кинетической нелинейной теории ускорения космических лучей [11]. Приведены также результаты измерений радиоизлучения (радиотелескоп ATCA), рентгеновского (космическая обсерватория "Suzaku") и ТэВ-ного излучения (система HESS).

природы нетеплового излучения остатков, так и происхождения наблюдаемого спектра космических лучей. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены результаты расчётов потока энергии нетеплового излучения остатков сверхновых RXJ1317.7-3946 и SN 1006 как функции энергии фотонов совместно с данными измерений. Как видно из рисунков, результаты теории хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это даёт основания утверждать, что в указанных остатках с высокой эффективностью происходит генерация космических лучей, согласующаяся с представлением о том, что галактические остатки сверхновых являются источником наблюдаемых космических лучей с энергией вплоть до 10^{17} эВ.

Регистрация космических лучей камерой АСК-1 в Якутске привела к зарождению исследований в ещё одном важном направлении. Ионизационный ток в камере, регистрируемый электрометром камеры, время от времени испытывает резкие (импульсные) усиления. В записи они выглядят как разрывы — "толчки". При изучении вариаций космических лучей толчки являются

помехой и устраняются при обработке. Сотрудник Института космофизических исследований и астрономии (ИКФИА) при Якутском филиале АН СССР Д.Д. Красильников обратил на них внимание и занялся изучением их природы. Спектр толчков по амплитуде оказался степенным с показателем, близким к показателю энергетического спектра космических лучей. Природа этих толчков связана с размножением в оболочке камеры продуктов взаимодействия ядерно-активных частиц (в основном пионов), а также с электромагнитными каскадами, вызванными тормозными фотонами от мюонов высоких энергий. Посредством особых ухищрений Д.Д. Красильников добился избавления от толчков ядерно-активной природы и исследовал мюонные толчки. Интерес к каскадным процессам побудил его к созданию малой установки широких атмосферных ливней (ШАЛ), состоящей всего из трёх лотков со счётчиками Гейгера — Мюллера. Со временем установка была расширена и стала включать в себя пять павильонов на площади около 1 га. Аккуратная обработка данных позволила найти верхний предел анизотропии частиц с энергией 10^{15} эВ с точностью не хуже 0,1 %, что было в то время (1967 г.) лучшим по точности результатом.

Типичные установки ШАЛ в 1950-е годы стали намного информативнее и больше по охватываемой площади. Наиболее крупные установки в СССР являлись установкой НИИЯФ МГУ, которой руководил Г.Б. Христиансен, и Тянь-Шаньская установка ФИАНа, которой руководил С.И. Никольский. За рубежом в то время уже были построены установки ШАЛ площадью более чем 10 км². Уже в 1963 г. Сергей Николаевич поставил задачу проектирования установки ШАЛ, не уступающей по всем основным параметрам лучшим зарубежным аналогам. Работа по проектированию велась под его общим руководством. В ней активно участвовали С.И. Никольский и Г.Б. Христиансен. Работа резко активизировалась после того, как было открыто реликтовое излучение и было предсказано так называемое чернотельное обрезание спектра космических лучей при энергии 6×10^{19} эВ, неминуемо возникающее как результат энергетических потерь космических лучей вследствие их взаимодействия с фотонами реликтового излучения, если космические лучи предельно высоких энергий имеют внегалактическое происхождение. Местом создания установки был определён Якутск. Не последним аргументом в пользу такого выбора был опыт, накопленный в ИКФИА, и наличие в нём квалифицированных кадров. Как это часто бывает, принятие решения о финансировании работ не было лёгким и потребовало значительных усилий, прежде всего, со стороны С.Н. Вернова. Достаточно упомянуть, что первая реакция М.А. Лаврентьева, возглавлявшего Сибирское отделение АН СССР, оказалась не очень благоприятной. Положительного решения о сооружении Якутской установки ШАЛ удалось добиться во многом благодаря активным усилиям С.Н. Вернова. С.Н. Вернов неоднократно встречался с руководителями СО АН СССР. Им было организовано широкое обсуждение этой проблемы научной общественностью. В связи с этим достаточно привести выдержки из письма В.Л. Гинзбурга, адресованного вице-президенту АН СССР Б.П. Константинову: "Глубокоуважаемый Борис Павлович! Как мне сообщили, Вы хотели бы знать мое мнение по вопросу о целесообразности постройки большой установки для

исследования широких атмосферных ливней в г. Якутске. Мое отношение к этому проекту самое положительное ... Наконец, по существу, Якутская установка сможет дать сведения о спектре в интервале $3 \times 10^{17} - 10^{20}$ эВ, где почти нет данных и где можно ожидать существенного вклада метagalacticкой компоненты ... Итак, создание этой установки — это "чистое дело", важно только опять не опоздать и запустить её как можно скорее, а также иметь план расширения с расчётом до 10^{21} эВ. С искренним уважением Ваш В.Л. Гинзбург. 29 января 1968 г."

Усилия С.Н. Вернова увенчались успехом: 11 апреля 1968 г. вышло постановление Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР о сооружении Якутской установки ШАЛ. В нём было сформулировано задание институту, выделены штаты и средства для капитального строительства. Более 200 организаций в той или иной мере были привлечены к созданию установки. С.Н. Вернов в ряде случаев лично принимал участие во встречах с руководством этих организаций.

Якутская установка ШАЛ была принята в эксплуатацию 14 апреля 1973 г. Установка представляет собой систему коррелированно работающих станций наблюдения, размещённых на площади 20 км² (к настоящему времени площадь уменьшена до 12 км²). Регистрация ШАЛ имеет целью определить основные характеристики космических лучей с энергиями более 10^{15} эВ: энергетический спектр, анизотропию и массовый состав. Особенностью Якутской установки ШАЛ является то, что она оснащена детекторами всех основных компонент ШАЛ: электронно-фотонной и мюонной компонент и черенковского света.

Регистрация черенковского света, благодаря тому что это излучение интегрируется по всей глубине атмосферы, даёт возможность довольно точно оценить суммарную энергию электронов, образованных в ливне, и, следовательно, получить надёжную оценку энергии первичной частицы. Эти измерения также позволяют прокалибровать электронно-фотонный канал регистрации.

Поскольку соотношение числа мюонов и электронов в ШАЛ при той же энергии частицы, породившей ШАЛ, чувствительно к массе частицы, регистрация мюонов позволяет оценивать массовый состав космических лучей.

За почти 40-летний период эксплуатации установка модернизировалась. Очередная модернизация производится и в настоящий период. Руководители работ на Якутской установке ШАЛ Н.Н. Ефимов и Д.Д. Красильников в группе авторов в 1982 г. были удостоены звания Лауреатов Ленинской премии.

Одной из основных характеристик космических лучей, изучаемых с помощью установок ШАЛ, является их энергетический спектр в области энергий более 10^{15} эВ. К концу XX в. был накоплен большой объём экспериментальных данных о спектре космических лучей сверхвысоких энергий, позволивший с уверенностью говорить о наличии ряда особенностей в спектре в области энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ. Наряду с установленным в 1958 г. сотрудниками НИИЯФ МГУ под руководством С.Н. Вернова изломом (теперь его принято называть коленом или первым коленом) — укрупнением спектра космических лучей при энергии 3×10^{15} эВ, были найдены другие особенности спектра: второе колено при энергии 5×10^{17} эВ и провал при энергии 6×10^{18} эВ (рис. 3). При

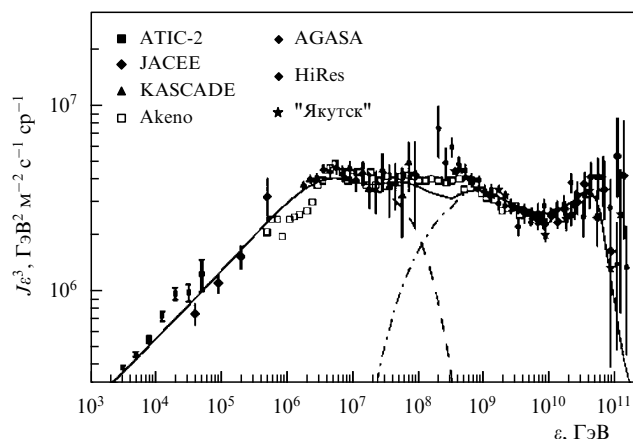


Рис. 3. Интенсивность космических лучей как функция их энергии [13]. Штриховой кривой показан спектр космических лучей, произведённых в галактических остатках сверхновых; штрихпунктирной — спектр от внегалактических источников; сплошная кривая представляет собой их сумму. Приведены результаты измерений, выполненные на баллонах (ATIC-2 (Advanced Thin Ionization Calorimeter), JACEE (Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment)) и наземными установками ШАЛ KASCADE (Karlsruhe Shower Core and Array DEtector), "Akeno", AGASA, HiRes и Якутской установкой ШАЛ ("Якутск").

этом данные разных установок ШАЛ (Fly's Eye и HiRes в США, AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) в Японии и Якутская установка) хорошо согласовывались между собой по форме измеренного спектра космических лучей, но различались по амплитуде и энергетическому положению особенностей спектра. Как неоднократно предполагалось (см., например, [12]), эти различия практически полностью устраняются, если определяемую в каждом эксперименте энергию ε индивидуальной частицы заменить величиной $\lambda\varepsilon$, где параметр λ лежит в пределах $0,8 < \lambda < 1,2$ (см. рис. 3, на котором приведены данные измерений на трёх упомянутых установках ШАЛ). Такая процедура вполне уместна, если учесть тот факт, что точность определения энергии космических лучей в таких экспериментах около 20 %.

До 2007 г. измерения не позволяли дать однозначного заключения о существовании чернотельного обрезания спектра космических лучей. Как видно из рис. 3, данные Якутской установки ШАЛ не противоречили наличию обрезания. Однако ввиду ограниченной статистики измерений при энергии $\varepsilon > 4 \times 10^{19}$ эВ сделать обоснованное заключение на основе этих измерений затруднительно. В то же время измерения на установке AGASA, более чем на порядок превосходившей Якутскую установку ШАЛ по светосиле, довольно определённо свидетельствовали об отсутствии какого-либо укрупнения спектра космических лучей при энергиях $\varepsilon < 10^{20}$ эВ. Только в 2007 г. в экспериментах HiRes и "Auger" с достаточной обоснованностью было установлено существование чернотельного обрезания. Этот факт достаточно определённо свидетельствует о том, что космические лучи максимально высоких энергий рождаются во внегалактических источниках. На повестке дня стоит проблема отыскания этих источников, установления спектра внегалактической компоненты космических лучей и экспериментального определения области перехода между двумя компонентами в наблюдаемом спектре космических лучей.

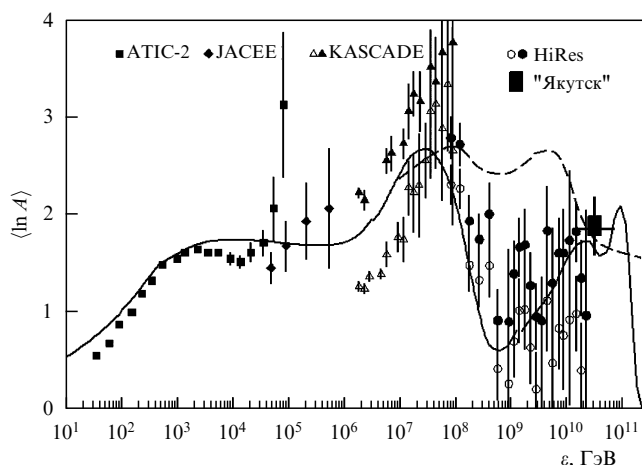


Рис. 4. Средний логарифм атомного числа космических лучей как функция энергии [16]. Сплошная и штриховая кривые отвечают двум разным сценариям формирования спектра космических лучей в области энергий $\varepsilon > 10^{17}$ эВ. Приведены результаты измерений, выполненные на баллонах (ATIC-2, JACEE) и наземными установками ШАЛ: KASCADE, HiRes и Якутской установкой [17] ("Якутск").

По соображениям энергетического характера наиболее вероятными внегалактическими источниками космических лучей предельно высоких энергий являются активные галактические ядра (см., например, [12]). В пользу этого свидетельствует корреляция направлений прихода космических лучей с энергиями $\varepsilon > 3 \times 10^{19}$ эВ с угловым местоположением активных галактических ядер, установленная в эксперименте "Auger" [14] и по измерениям на Якутской установке ШАЛ [15].

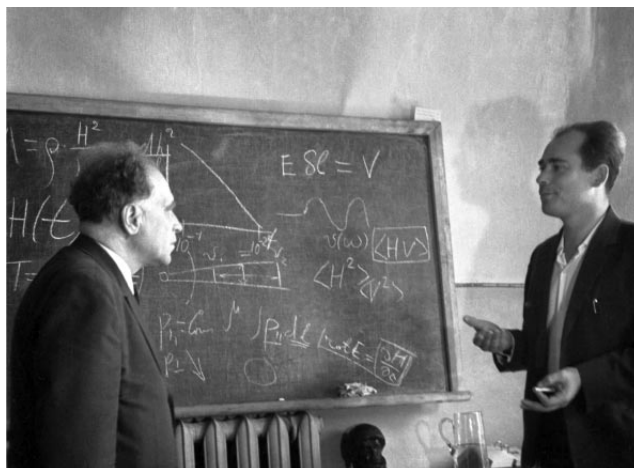
Существует два различных сценария формирования суммарного спектра космических лучей. В первом из них внегалактическая компонента преобладает при энергиях $\varepsilon > 2 \times 10^{17}$ эВ (см. рис. 3), тогда как во втором это происходит только при $\varepsilon > 10^{19}$ эВ. В последнем случае галактическая компонента доминирует в наблюдаемом спектре космических лучей при энергиях вплоть до $\varepsilon \approx 3 \times 10^{18}$ эВ. Остаётся неясным, способны ли галактические остатки сверхновых ускорять частицы до столь высокой энергии или помимо сверхновых в Галактике работает дополнительный источник (или механизм доускорения).

Важным является то обстоятельство, что двум упомянутым выше сценариям соответствует существенно разный массовый состав космических лучей в области энергий $\varepsilon > 10^{17}$ эВ (см. рис. 4, на котором приведены результаты расчётов среднего логарифма атомного числа космических лучей как функции их энергии для двух сценариев). Данные лучше согласуются с первым сценарием. Однако достаточно большая их неопределённость не позволяет сделать окончательного заключения на этот счёт. Для более надёжного определения массового состава космических лучей Якутская установка ШАЛ дооснащается (модернизируется) дифференциальными детекторами черенковского света, способными раздельно регистрировать черенковское излучение, приходящее с разных высот над уровнем наблюдения.

С момента организации Института космических исследований и астрономии (ИКФИ) СО РАН в 1962 г. его деятельность находилась в сфере внимания Сергея Николаевича Вернова. Возглавляемый им Научный



С.Н. Вернов (в центре) с якутскими космофизиками: слева от С.Н. Вернова — А.И. Кузьмин, справа — Г.В. Шафер и Ю.Г. Шафер (Якутск, 1967 г.).



С.Н. Вернов (слева) с Г.Ф. Крымским на семинаре в ИКФИА (Якутск, 1967 г.).

совет АН СССР по космическим лучам регулярно организовывал Всесоюзные конференции по физике космических лучей в разных городах нашей страны.

В 1967 г. силами ИКФИА была проведена очередная конференция в Академгородке под Новосибирском. С.Н. Вернов во время конференций организовал рабочее совещание в Институте ядерной физики. Перед началом конференции он посетил ИКФИА и на месте провёл обсуждение вопросов, связанных с созданием Якутской установки ШАЛ.

В Якутске Всесоюзные конференции по космическим лучам были проведены в 1962 г., 1977 г. и 1984 г. В 1972 г. на базе уже созданной установки ШАЛ был организован симпозиум, в работе которого приняли участие специалисты из научных центров СССР и стран Восточной Европы. Был рассмотрен широкий круг вопросов физики космических лучей, но особый акцент был сделан на космических лучах сверхвысокой энергии. Сергей Николаевич счёл необходимым сделать научный доклад в Якутском обкоме КПСС, на котором присутствовали все руководители республиканского уровня. Он посетил также практически созданную к тому моменту Якутскую установку ШАЛ.



С.Н. Вернов (на первом плане) с якутскими космофизиками (слева направо — А.И. Кузьмин, И.Е. Слепцов, А.С. Рымарь, В.А. Орлов, Д.Д. Красильников) на территории установки ШАЛ (Якутск, 1972 г.).

В 1976 г. Президиум СО АН в очередной раз рассматривал деятельность ИКФИА СО АН СССР. С.Н. Вернов, принимавший участие в заседании, сделал подробный доклад и дал высокую оценку научным достижениям института. Под эгидой Международного союза чистой и прикладной физики (IUPAP) раз в два года организуются конференции по космическим лучам в разных странах. Сергей Николаевич лично формировал советскую делегацию на каждую из этих конференций. С 1959 г. во всех конференциях принимали участие представители из Якутска.

Сергей Николаевич всячески способствовал установлению связей с нашими иностранными коллегами. В 1981 г. один из нас (Г.Ф.К.) получил приглашение из

Института ядерной физики в г. Гейдельберге (ФРГ) для работы там в качестве гостя. Сергей Николаевич оказал поддержку, и визит состоялся. В последующие годы сотрудничество между двумя институтами активизировалось, и оно продолжается на регулярной основе до сих пор.

В завершение следует сказать, что становление и развитие фундаментальных исследований в области физики космических лучей в Якутии состоялось во многом благодаря активной поддержке и участию С.Н. Вернова и его ближайших соратников и учеников.

Список литературы

1. Кузьмин А И *ЖЭТФ* **28** 614 (1955) [Kuz'min A I *Sov. Phys. JETP* **1** 560 (1955)]
2. Крымский Г Ф *Геомагнетизм и астрономия* **4** 977 (1964)
3. Parker E N *Planet. Space Sci.* **13** 9 (1965)
4. Долгинов А З, Топтыгин И Н *ЖЭТФ* **51** 1771 (1966) [Dolginov A Z, Toptygin I N *Sov. Phys. JETP* **24** 1195 (1967)]
5. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977) [Krymskii G F *Sov. Phys. Dokl.* **22** 327 (1977)]
6. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **154** 49 (1988) [Berezhko E G, Krymskii G F *Sov. Phys. Usp.* **31** 27 (1988)]
7. Бережко Е Г, Елшин В К, Ксенофонов Л Т *ЖЭТФ* **109** 3 (1996) [Berezhko E G, Elshin V K, Ksenofontov L T *JETP* **82** 1 (1996)]
8. Berezhko E G *Adv. Space Sci.* **35** 1031 (2005)
9. Berezhko E G *Adv. Space Sci.* **41** 429 (2008)
10. Berezhko E G, Völk H J *Astron. Astrophys.* **451** 981 (2006)
11. Berezhko E G, Ksenofontov L T, Völk H J *Astron. Astrophys.* **505** 169 (2009)
12. Berezhinsky V, Gazizov A, Grigorieva S *Phys. Rev. D* **74** 043005 (2006)
13. Berezhko E G, Völk H J *Astrophys. J.* **661** L175 (2007)
14. Abraham J et al. (The Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007)
15. Иванов А А *Письма в ЖЭТФ* **87** 215 (2008) [Ivanov A A *JETP Lett.* **87** 185 (2008)]
16. Berezhko E G *Astrophys. J.* **698** L138 (2009)
17. Glushkov A V et al. *Письма в ЖЭТФ* **87** 220 (2008) [*JETP Lett.* **87** 190 (2008)]