

— 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.fiands.mipt.ru

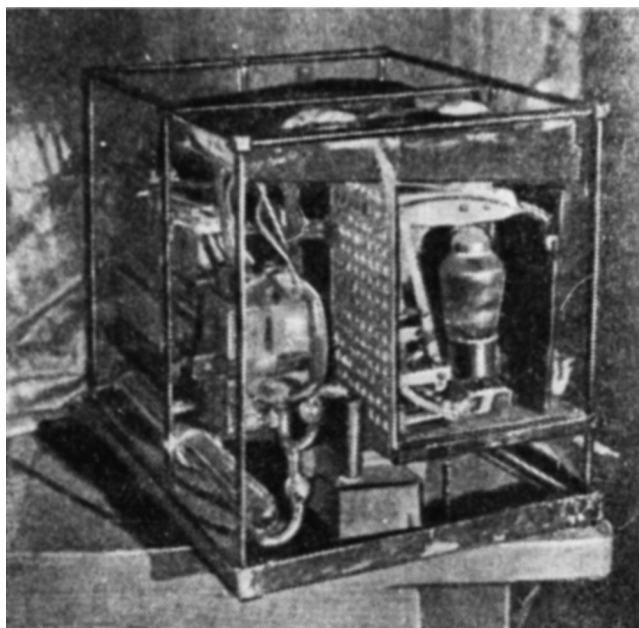


Рис. 1. Разработанный С.Н. Верновым первый радиозонд для измерения потоков КЛ на различных высотах в атмосфере Земли. Впервые информация о КЛ передавалась на Землю по радио. Вес радиозонда 28,6 кг.

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

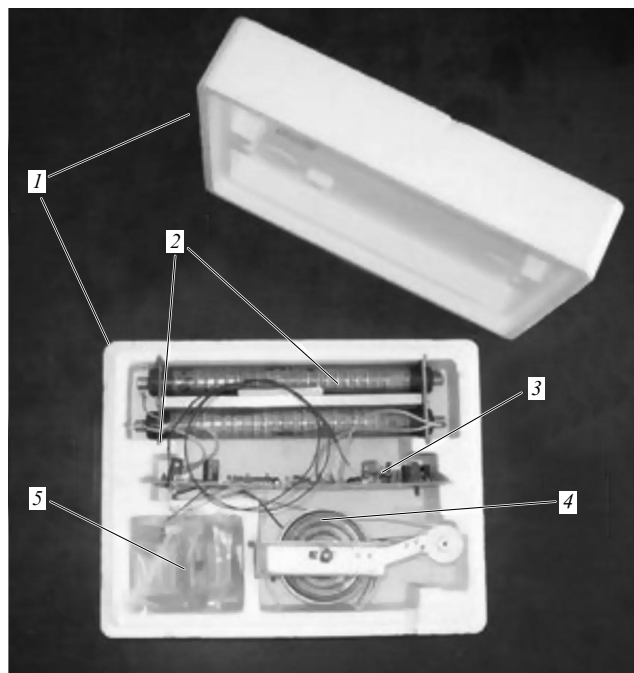


Рис. 2. Стандартный радиозонд для измерения заряженных частиц в земной атмосфере: 1 — пенопластовая коробка; 2 — детекторы заряженных частиц, состоящие из двух газоразрядных счётчиков СТС-6 отечественного производства с алюминиевым фильтром толщиной 7 мм между ними, позволяющим отделять радиоактивные 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.

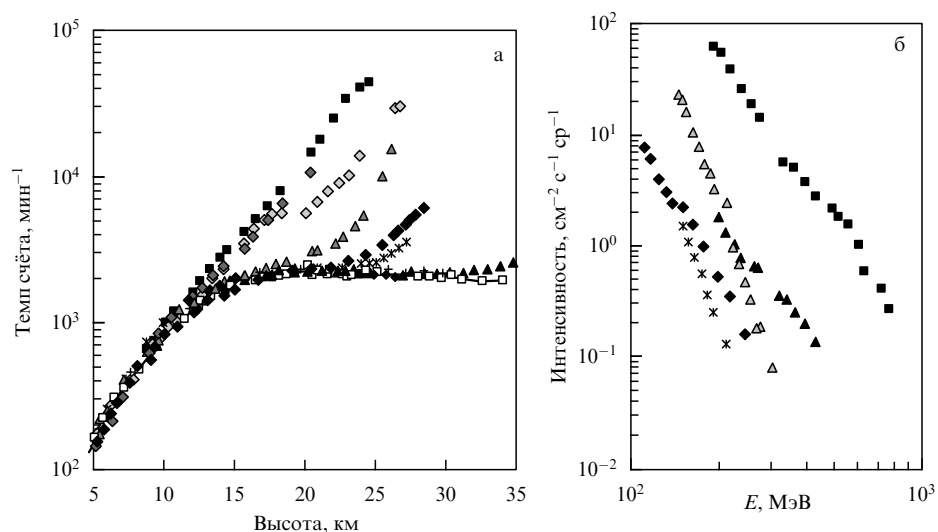


Рис. 3. (а) Высотный ход КЛ, зарегистрированный в нескольких полётах радиозондов до и после серии мощных солнечных вспышек, произошедших 9, 14 и 16 июля 1959 г. Измерения проведены в северных полярных широтах с 9 по 17 июля 1959 г. Данные разных полётов показаны разными символами. Фон от галактических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

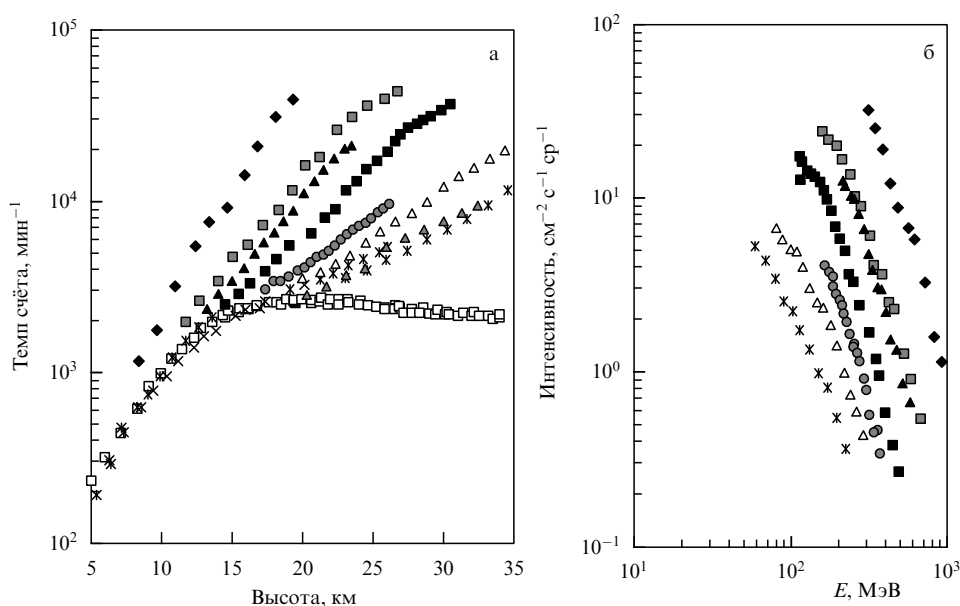


Рис. 4. Высотный ход КЛ, зарегистрированный в одной из последних мощных вспышек солнечных КЛ, произошедшей 5 января 2005 г. Измерения проведены в северных полярных широтах с 20 по 21 января 2005 г. Фон от галактических КЛ показан светлыми квадратами. (б) Интегральные спектры солнечных протонов, полученные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

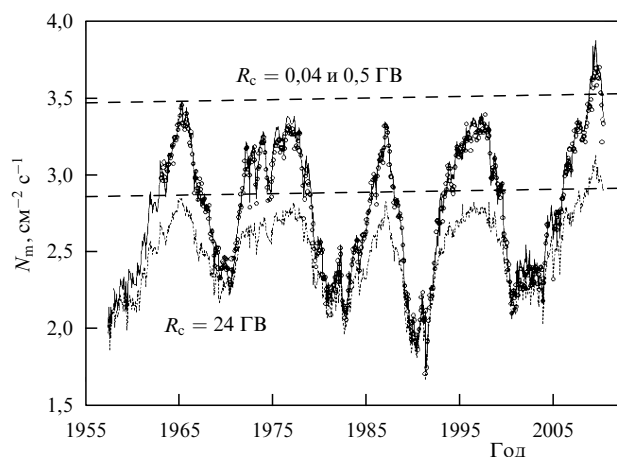


Рис. 5. Среднемесячные значения потока галактических КЛ в максимуме переходной кривой в атмосфере N_m . Данные получены в северных полярных широтах с геомагнитной жёсткостью обрезания $R_c = 0,5$ ГВ (верхняя сплошная кривая), в Антарктиде с $R_c = 0,04$ ГВ (светлые кружки) и в средних широтах с $R_c = 2,4$ 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-

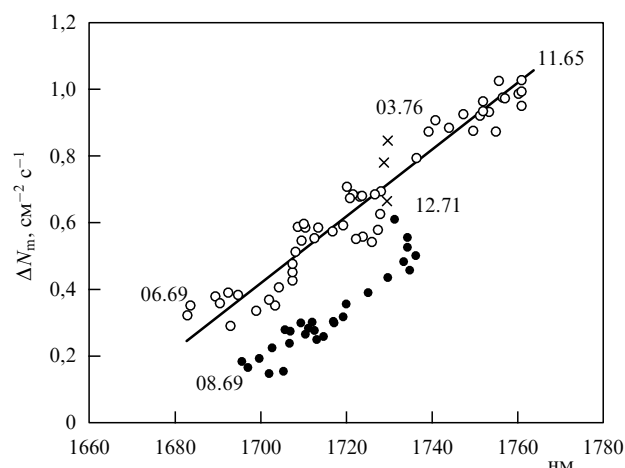


Рис. 6. Регрессия между потоками галактических КЛ малых энергий ΔN_m ($E \approx (0,5–1,5)$ ГэВ) и больших энергий ($E > 12$ ГэВ). Потоки частиц малых энергий получены из измерений в полярной и средне-широтной атмосфере на высотах 18–23 км. Данные экваториального нейтронного монитора Уанкайо дают поток 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