

Космические лучи в атмосфере Земли

Ю. И. Стожков^a, Г. А. Базилевская^b

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

E-mail: ^a stozhkov@fian.fjandns.mipt.ru, ^b gbaz@rambler.ru

Статья поступила 30.12.2009, подписана в печать 06.02.2010

Дан краткий исторический обзор исследований космических лучей в земной атмосфере, инициированных и возглавляемых С. Н. Верновым в течение более чем 50 лет. Представлены основные результаты этих исследований, полученные за последние несколько десятков лет. Они включают в себя изучение процессов генерации и распространения солнечных космических лучей, модуляции галактических космических лучей в гелиомагнитосфере, роль космических лучей в атмосферных процессах.

Ключевые слова: космические лучи, атмосфера Земли.

УДК: 523.165. PACS: 95.85.Ry.

Введение

Сергей Николаевич Вернов был признанным лидером в исследованиях космических лучей (КЛ) в СССР. Его интересовали все аспекты физики КЛ (ядерное, космофизическое и астрофизическое направления) и весь энергетический спектр КЛ от $\sim 10^5$ до 10^{20} эВ. Он начал свою деятельность в 30-х годах прошлого столетия с изучения КЛ в земной атмосфере и был первым исследователем КЛ в космическом пространстве. Под его руководством в Московском университете и в Якутске были созданы крупнейшие установки по изучению широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых в атмосфере частицами сверхвысоких энергий. С. Н. Вернов вместе с Н. В. Пушковым создали в СССР сеть станций для непрерывных измерений КЛ наземными установками, которые теперь входят в мировую сеть мониторинга КЛ. Одновременно С. Н. Вернов начал уникальный эксперимент — регулярные, практически ежедневные измерения КЛ в стратосфере на нескольких широтах. В те же годы С. Н. Вернов возглавил работы по изучению радиации околоземного пространства на спутниках и космических аппаратах.

Работы С. Н. Вернова, посвященные изучению КЛ в атмосфере Земли, можно разделить на два этапа. Первый этап с 1933 по 1957 г. был направлен на выяснение природы первичных КЛ и процессов их взаимодействия с ядрами атомов воздуха. Результаты этих работ важны не только для астрофизики, но даже в большей степени для ядерной физики, где КЛ используются как источник высокоэнергичных заряженных частиц. Второй этап исследований КЛ в атмосфере, начавшийся во время Международного Геофизического года (1957), был нацелен на исследование модуляционных эффектов КЛ под действием изменяющейся солнечной активности. Результаты этих работ важны для физики Солнца, межпланетной среды и магнитосферы. Все научные направления, инициированные С. Н. Верновым, плодотворно развиваются и в настоящее время.

1. Начало исследований С. Н. Вернова и работы по ядерному аспекту физики космических лучей

Открытие космических лучей произошло в 1912 г., когда выяснилось, что проникающее излучение высокой

энергии приходит на Землю извне — из пространства, окружающего Землю [1]. В 1920–1930-е гг. этим явлением занимались такие выдающиеся ученые, как В. Ф. Гесс, Р. А. Милликен, А. Х. Комптон, Д. В. Скобельцын и др., но работы были сопряжены с большими трудностями. Для выяснения природы КЛ было необходимо поднимать аппаратуру в атмосферу и производить там регистрацию излучения, а затем возвращать прибор на Землю, что не всегда заканчивалось удачей. В 1934 г. С. Н. Вернов, тогда аспирант Радиевого института, предложил использовать недавно изобретенный П. А. Молчановым метеорологический радиозонд [2] для передачи данных о КЛ в атмосфере по радио [3]. В России начались измерения КЛ в атмосфере Земли — направление, инициированное С. Н. Верновым, которое продолжает развиваться и в настоящее время.

В довоенные годы С. Н. Вернову удалось провести измерения КЛ в атмосфере на разных широтах — в Ленинградской области, в Ереване, в Индийском океане — и показать, что КЛ состоят из заряженных частиц [4]. Однако знак заряда частиц был определен уже после войны, когда в экваториальной экспедиции 1949 г. была измерена восточно-западная асимметрия потока КЛ и показано, что КЛ — это положительно заряженные частицы [5].

Космические лучи представляют собой незаменимый инструмент ядерной физики. Заряженные частицы, ускоренные природой, обладают энергией, достичь которую на земных ускорителях не представляется возможным даже в настоящее время. В 1940-е гг., когда ядерная физика доказала свое первостепенное оборонное значение, стала ясна практическая важность изучения КЛ, так как они давали возможность исследовать процессы взаимодействия заряженных частиц с веществом при подъеме в атмосферу аппаратуры с различными поглощающими фильтрами. В 1946 г. для исследований КЛ в атмосфере была создана Долгопрудненская научная станция, которая теперь носит имя С. Н. Вернова. В 1946–1957 гг. под руководством С. Н. Вернова сотрудниками ФИАН и НИФИ 2 МГУ (теперь — НИИЯФ МГУ) был выполнен ряд работ по изучению поглощения первичных протонов и генерации вторичной компоненты КЛ. Сложные приборы весом



Рис. 1. Подъем аппаратуры для изучения космических лучей в атмосферу. Ош, 1957 г.

до 100 кг поднимались в атмосферу на гирляндах резиновых шаров (рис. 1).

В ходе этих работ были изучены основные характеристики процессов взаимодействия протонов высоких энергий с атомными ядрами, зависимость этих процессов от энергии в интервале $3 \cdot 10^9 - 4 \cdot 10^{10}$ эВ. Был сделан фундаментальный вывод о примерном постоянстве эффективного сечения и коэффициента неупругости при столкновении протонов с ядрами атомов воздуха при этих энергиях и показано, что в актах множественного рождения пионов налетающий протон большую часть энергии оставляет себе (лидирующая частица). Цикл работ 1946–1957 гг. позволил выяснить механизм возникновения в атмосфере вторичного излучения и дать количественное описание этого процесса [6].

2. Космофизический аспект физики космических лучей

Космические лучи несут в себе удивительную информацию об окружающем нас межпланетном и межзвездном пространстве. Распространяясь в магнитном поле гелиосферы, потоки КЛ реагируют на динамику этих полей, связанную с постоянно изменяющейся солнечной активностью. Измеряя вариации потока КЛ, можно изучать физические условия на Солнце и в гелиосфере. В 1935–1936 гг. С. Форбуш начал непрерывную регистрацию КЛ с помощью наземных ионизационных камер. В СССР ионизационные каме-

ры для непрерывных измерений КЛ были сделаны Ю. Г. Шафером и Н. Л. Григоровым под руководством С. Н. Вернова и установлены в 1949 г. в Якутске и в Москве. В 1957 г., к началу Международного геофизического года, была создана советская сеть станций для мониторинга КЛ. Эта сеть является важной составной частью мировой сети нейтронных мониторов, которая успешно работает и в настоящее время.

Геомагнитное поле действует как анализатор частиц по жесткости, позволяя изучать наземными приборами спектр вариаций КЛ с энергиями от нескольких до десятков ГэВ. Между тем наибольшее воздействие солнечной активности испытывают КЛ малых энергий, для регистрации которых нужно подниматься в атмосферу или даже выходить за ее пределы. Измерения в атмосфере с помощью ионизационных камер стал проводить Х. В. Неер [7, 8], используя большие баллоны. Однако эти измерения были достаточно редки.

2.1. Модуляционные эффекты галактических космических лучей

В 1957 г. С. Н. Вернов и А. Н. Чарахчян начали проводить мониторинг космических лучей в атмосфере Земли, который продолжается и в настоящее время [9–11]. Измерения с помощью легкого радиозонда выполняются регулярно (ежедневно до начала 1990-х гг., три раза в неделю в настоящее время) на нескольких широтах: в Мурманской и Московской областях, в Антарктиде (с 1963 г.), в Алма-Ате (1962–1992). В разное время запуски радиозондов проводились в Крыму, Ленинградской области, Ереване, Тикси, Норильске, Дальнереченске и др. В 1962–1987 гг. было выполнено шесть морских экспедиций, когда баллоны запускались на пути в Антарктиду и обратно. Очень важно, что измерения проводятся идентичными приборами, детектирующая часть которых остается неизменной все время с начала эксперимента и тщательно калибруется. Прибор представляет собою телескоп из двух счетчиков Гейгера с прокладкой из алюминия. Измеряется вертикальный поток протонов с $E \geq 30$ МэВ и электронов с $E \geq 5$ МэВ, а также (одиночным счетчиком) глобальный поток протонов с $E \geq 5$ МэВ и электронов с $E \geq 200$ кэВ. Одиночный счетчик чувствителен также к рентгеновскому излучению с эффективностью менее 1%. Информация о потоках заряженных частиц передается на землю по радио вместе с данными о высоте прибора. В каждом полете радиозонда измеряется переходная кривая интенсивности КЛ в атмосфере, форма которой зависит от порога геомагнитного обрезания и спектра КЛ в околоземном пространстве. Последний определяется уровнем солнечной активности. На рис. 2 изображены переходные кривые в атмосфере на разных широтах, полученные во время морской экспедиции 1987 г. в минимуме солнечной активности [12].

За все время эксперимента произведено более 85 000 полетов радиозондов, в результате которых получены самые длинные в мире однородные ряды данных о потоках заряженных частиц на разных широтах и высотах в атмосфере. В качестве примера на рис. 3 даны потоки частиц в Мурманской области. Хорошо видна модуляция потоков КЛ в противофазе с 11-летним циклом солнечной активности.

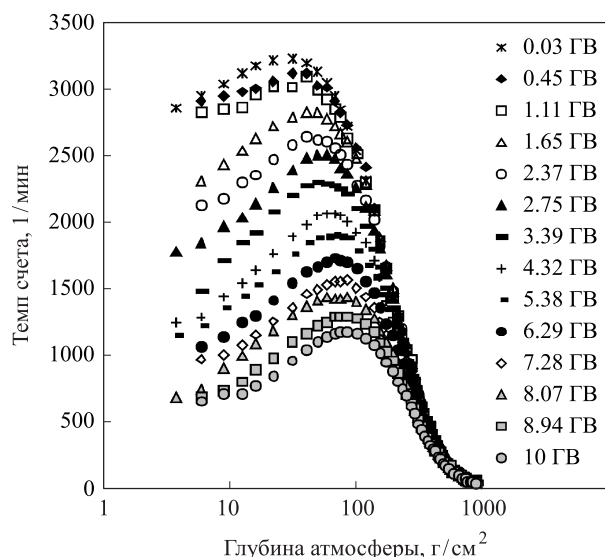


Рис. 2. Переходные кривые потока КЛ в атмосфере на разных широтах. Разными значками изображены данные для указанных справа порогов геомагнитного обрезания

Атмосфера Земли, как и геомагнитное поле, является энергетическим анализатором для заряженных частиц. Благодаря этому атмосферное зондирование дает информацию о временном распределении первичных КЛ в диапазоне энергий от 100 МэВ до ~ 20 ГэВ. Этот интервал энергий находится между энергиями, мониторинг которых осуществляют наземные установки (нейтронные мониторы) и космические аппараты. В настоящее время частое стратосферное зондирование продолжается в полярных и средних широтах, хотя запуски радиозондов сократились до трех раз в неделю в связи с экономическими трудностями. Таблицы результатов измерений КЛ в атмосфере приведены в работе [13] и на сайте [14].

Теперь в полной мере можно оценить прозрачность С. Н. Вернова, организовавшего эти измерения и настаивавшего на их продолжении без изменения детектирующей части зонда. Благодаря его настойчивости мы имеем в настоящее время единственный в мире однородный ряд данных продолжительностью более 50 лет. В 2009 г. был зафиксирован абсолютный максимум потока КЛ за все время их наблюдения.

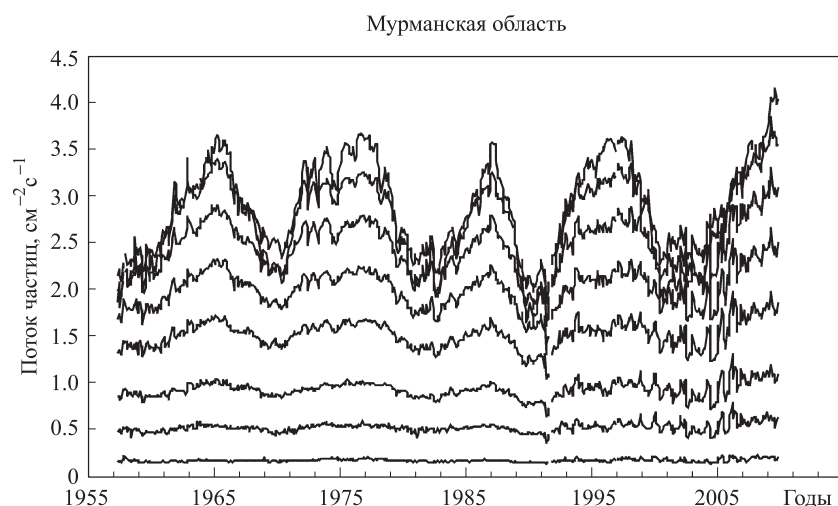


Рис. 3. Временной ход потоков заряженных частиц на разных высотах в атмосфере (сверху вниз): 25–43, 16–20, 15–16, 13–14, 11–12, 9–10, 7–8, 4–5 км

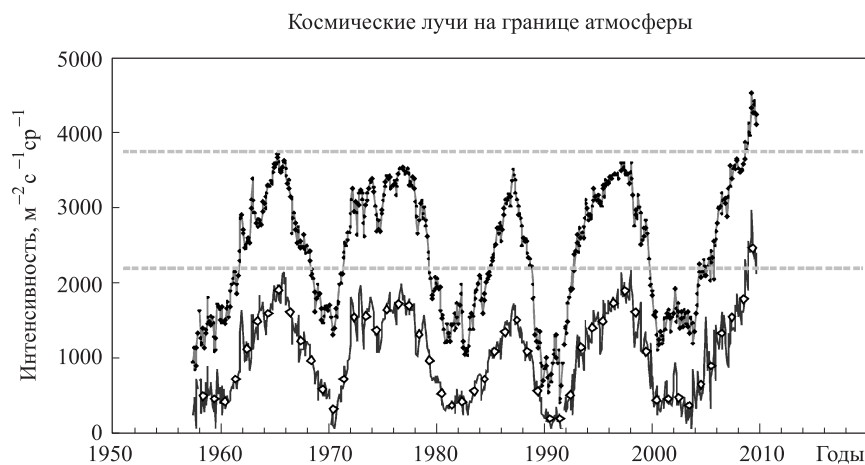


Рис. 4. Временной ход интенсивности КЛ на границе атмосферы. Верхняя кривая относится к энергиям выше 100 МэВ, нижняя — в интервале энергий 100–1500 МэВ. Пунктирными линиями показан максимальный уровень интенсивности, достигнутый в измерениях 1957–2009 гг.

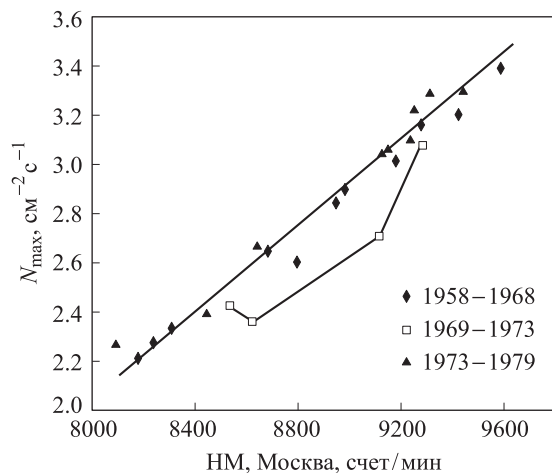


Рис. 5. Гистерезис между потоками КЛ в максимуме переходной кривой в стратосфере над Мурманской обл. ($N_{\max}$) и счетом нейтронного монитора в Москве [18]

В интервале 0.5–2.5 ГэВ этот поток превысил предыдущий максимум почти на 40%. Этот подъем потока КЛ, который хорошо виден на рис. 4, связан с аномально низкой солнечной активностью в 2008–2009 гг. и еще ждет своего детального исследования.

Результаты измерений КЛ в стратосфере позволили выявить ряд закономерностей в модуляции потоков КЛ солнечной активностью, в частности, впервые были показаны влияние общего магнитного поля Солнца на модуляцию КЛ и роль гелиоширотного распределения солнечной активности [15–17]. Были исследованы особенности модуляции КЛ в ходе 11-летнего цикла солнечной активности. Одной из таких особенностей является энергетический гистерезис в потоке КЛ, наблюдаемый в периоды инверсии общего магнитного поля Солнца. На рис. 5 показана связь между потоком КЛ сравнительно малых энергий, измеренных в атмосфере полярных широт, и данными нейтронного монитора в Москве [18], чувствительного к космическим частицам с энергией $E > 1.5$ ГэВ. Наблюдается петля, или

гистерезис, в период с 1969 по 1971 г. В этот период происходила инверсия общего магнитного поля Солнца, которая вызвала изменение структуры магнитного поля в гелиосфере и как следствие изменение зависимости коэффициента диффузии от жесткости частиц и направления дрейфа частиц [17].

2.2. Солнечные космические лучи по измерениям в стратосфере

Вскоре после начала регулярных измерений были открыты вспышки солнечных космических лучей (СКЛ) в стратосфере. Во время этих событий солнечные протоны проникают в атмосферу, и происходит деформация переходной кривой КЛ как по данным одиночного счетчика, так и по данным телескопа (рис. 6, а). Измеряя поглощение потока солнечных протонов в воздухе, можно восстановить их интенсивность и энергетический спектр на границе атмосферы. Многократные запуски радиозондов во время солнечного протонного события позволяют найти временной ход интенсивности частиц в атмосфере и за ее пределами.

На рис. 7 для примера показаны результаты измерений в Мурманской области во время солнечного протонного события 20 января 2005 г. Слева — временной ход потоков частиц на разных высотах в атмосфере, справа — энергетические спектры солнечных протонов в разные моменты времени.

На основании результатов первых наземных наблюдений предполагалось, что события СКЛ происходят редко: с 1942 по 1959 г. было зарегистрировано всего 7 событий. В стратосфере только за 1958–1959 гг. тоже было зарегистрировано 7 событий [20, 21], а всего с 1957 по 2009 г. зафиксировано около 120 событий, в которых интенсивность солнечных протонов с $E \geq 100$ МэВ была выше $1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ [22]. В отличие от галактических КЛ частота солнечных протонных событий наибольшая в периоды достаточно высокой солнечной активности. Данные, полученные в стратосферных измерениях, оказались ценными для выяснения механизмов ускорения частиц на Солнце и процессов их распространения в межпланетной среде,

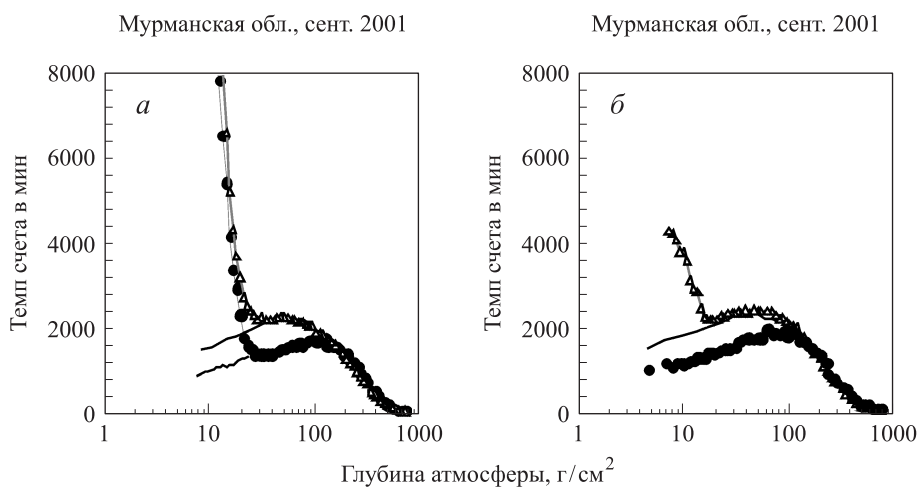


Рис. 6. Деформация переходной кривой КЛ при вторжении в атмосферу солнечных КЛ (а) и при выпадении магнитосферных электронов (б). Светлые треугольники — данные одиночного счетчика, темные кружки — данные телескопа, умноженные на 5, кривые без значков — фоновые потоки частиц, обусловленные галактическими КЛ

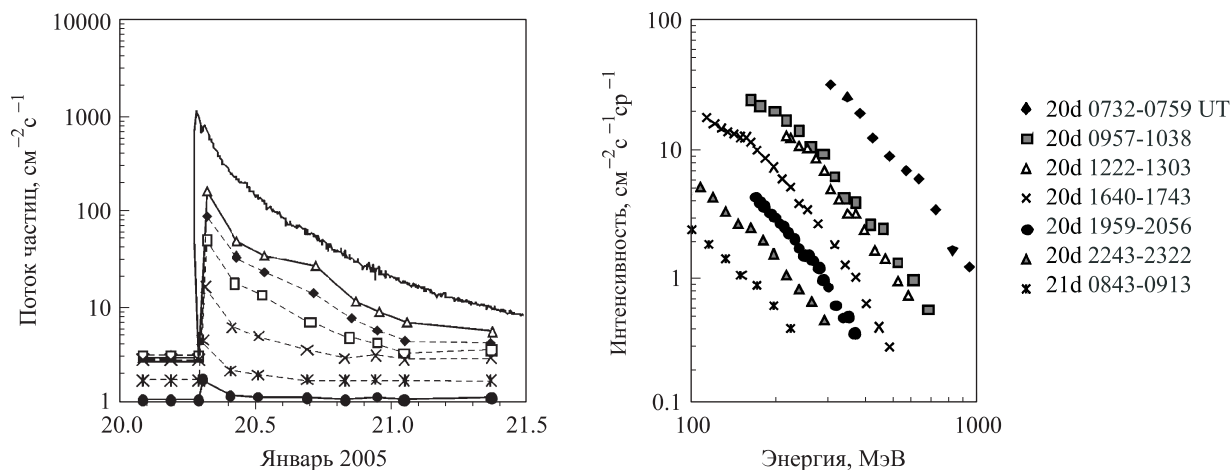


Рис. 7. Слева — временные профили потоков заряженных частиц в период солнечного протонного события. Верхняя кривая — данные геостационарного спутника GOES [19], далее (сверху вниз) данные зондовых измерений на высотах 32, 27, 24, 21, 16, 12 и 9 км над Мурманской обл. Справа — энергетические спектры солнечных протонов

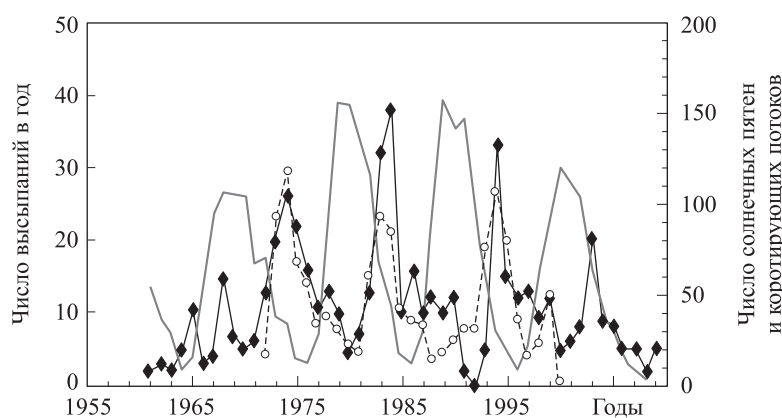


Рис. 8. Высыпания магнитосферных электронов, зарегистрированные в стратосфере (черные ромбы), число солнечных пятен (серая кривая) и число рекуррентных потоков солнечного ветра (светлые кружки) согласно данным из работы [25]

в частности для оценки коэффициента диффузии протонов в межпланетной среде. Анализ гелиодолготного распределения родительских вспышек для событий, зарегистрированных в стратосфере, показал, что максимальная энергия, до которой могут ускоряться протоны за фронтом ударной волны, в 95% случаев не превышает 500 МэВ [23].

2.3. Вторжения высокоэнергичных магнитосферных электронов в атмосферу Земли

В полярных широтах стратосферное зондирование позволяет измерять потоки выпадающих магнитосферных электронов с энергией больше нескольких сотен кэВ. Сами электроны поглощаются на высотах ~ 70 – 100 км, но генерируемое ими тормозное излучение проникает в атмосферу до высот ~ 20 – 35 км, где регистрируется одиночным счетчиком, но не чувствуется телескопом (рис. 6, б). Высыпания, как правило, наблюдаются в Мурманской области и довольно редко в Мирном (Антарктида), который находится в районе открытых силовых линий геомагнитного поля [24]. Всего было зарегистрировано более 500 случаев высыпаний, которые наиболее часты на фазе спада 11-летнего

солнечного цикла и хорошо коррелируют с частотой рекуррентных потоков солнечного ветра, как можно видеть на рис. 8. Наблюдается некоторая связь между максимальными значениями числа высыпаний (1974, 1984, 1994 и 2003 г.) и высотой предшествующих максимумов солнечной активности (1968, 1979, 1989 и 2000 гг.). Анализ показал, что высыпания электронов тесно связаны с возмущениями в межпланетном поле и магнитосфере Земли. Частота высыпаний демонстрирует сезонные вариации с максимумами весной и осенью, что характерно для геомагнитных возмущений [26].

2.4. Космические лучи и атмосферные процессы

Поток энергии солнечного электромагнитного излучения на орбите Земли приблизительно в 10^8 раз больше потока энергии КЛ, падающих на границу атмосферы. Казалось бы, воздействие КЛ на атмосферные процессы пренебрежимо мало. Однако такое заключение является ошибочным. Космические лучи почти всю свою энергию оставляют в атмосфере, тратя ее на ионизацию и обеспечивая работу глобальной электрической цепи. Космические лучи ответственны

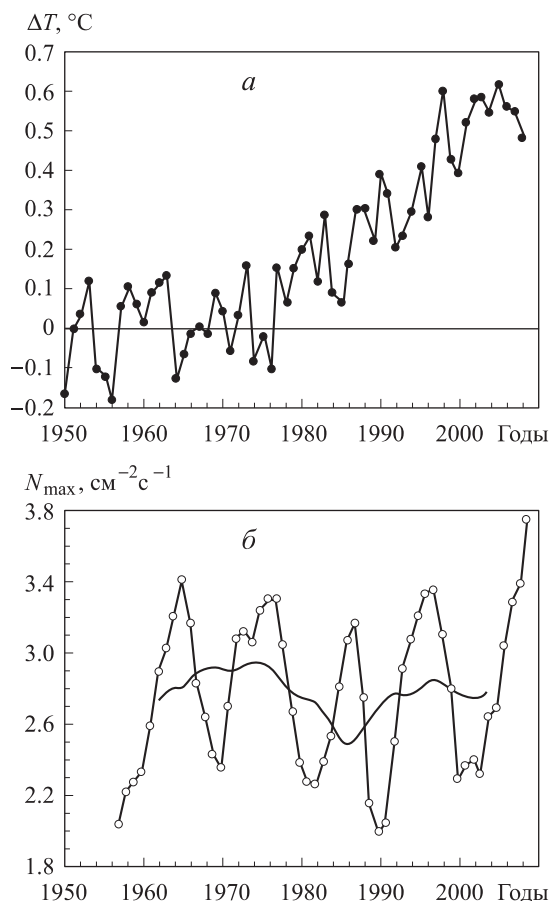


Рис. 9. Годовые значения изменения глобальной температуры [30] (а) и потока КЛ в максимуме переходной кривой в стратосфере над Мурманской обл. (б) (светлые кружки); сплошная кривая — скользящее среднее по 11 точкам

за образование грозных облаков, а частицы с энергией $E > 10^{15}$ эВ образуют ионизованные следы в атмосфере, по которым в грозных условиях распространяется молниевый разряд [27, 28]. В последние годы бурно обсуждается влияние потока КЛ на образование облачности. Ионы, образуемые КЛ в атмосфере, присоединяются к центрам конденсации и существенно облегчают и ускоряют процесс роста водных капель, т.е. образование облаков и разделение заряда в грозных облаках [29].

Однако, по нашему мнению, КЛ не могут быть ответственны за глобальное потепление климата. Этот вывод иллюстрирует рис. 9, на котором приведены данные за последние 50 лет по поведению глобальной температуры [30] и потоков КЛ, измеренных в нашем эксперименте. Видно, что за это время величина ΔT увеличилась приблизительно на 0.5° , в то время как поток КЛ оставался постоянным с высокой степенью точности (испытывая 11-летнюю вариацию).

Заключение

Исследования КЛ в земной атмосфере, инициированные С.Н. Верновым в начале 1930-х гг., оказались плодотворными как для ядерно-физического, так и для космофизического аспектов физики КЛ. В этих

измерениях были получены первые сведения о природе КЛ как астрофизического объекта. В этих же измерениях были заложены основные представления о взаимодействии высокоэнергичных заряженных частиц с веществом, которые широко использовались в ядерной физике. Наконец, начиная с 1957 г. в России проводится непрерывный мониторинг КЛ в атмосфере разных широт, подобного которому нет нигде в мире, поскольку данные мониторинга КЛ наземными приборами относятся к более высоким энергиям, а результаты измерений на спутниках не обладают необходимой однородностью и длительностью. Непрерывные измерения КЛ используются для изучения воздействия солнечной активности на физические процессы в гелиосфере. В последнее время, когда все большее внимание привлекает к себе окружающая нас среда и изменения климата, данные длительных непрерывных измерений заряженных частиц в земной атмосфере необходимы для распознавания сложных взаимосвязей процессов на Солнце, в земной атмосфере и формирования погоды на Земле.

С.Н. Вернов неоднократно подчеркивал роль стратосферного зондирования КЛ в научных исследованиях и пресекал попытки заменить, казалось бы, «устаревшую» технику шаров-зондов на измерения на спутниках. Время показало, что потенциал измерений заряженных частиц в атмосфере чрезвычайно высок, и необходимо продолжение этих экспериментов в будущем.

Список литературы

1. Hess V.F. // Physik. Zeitschr. 1912. **13**. P. 1084.
2. Молчанов П.А. Краткий курс аэрологии. Л.; М., 1933.
3. Вернов С.Н. // Тр. Всесоюз. конф. по изучению стратосферы (31 марта 1934 г.). Л.; М., 1935. С. 423.
4. Вернов С.Н. // Докл. АН СССР. 1939. **23**. С. 141.
5. Вернов С.Н., Григорьев Н.Л., Добротин Н.А. и др. // Докл. АН СССР. 1949. **68**. С. 253.
6. Вернов С.Н. // ЖЭТФ. 1949. **19**. С. 622.
7. Neher H.V., Forbush S.E. // Phys. Rev. 1952. **87**, N 5. P. 889.
8. Neher H.V. // J. Geophys. Res. 1967. **72**, N 5. P. 1527.
9. Чарахчян А.Н. // Космич. лучи. 1961. **3**. С. 134.
10. Чарахчян А.Н. // УФН. 1964. **83**, № 1. С. 35.
11. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. // Adv. Space Res. 2009. **44**, N 10. P. 1124.
12. Golenkov A.E., Svirzhevskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Stozhkov Yu.I. // Proc. 21st ICRC. Adelaide, 1990. **7**. P. 14.
13. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007). Препр. ФИАН № 14. М., 2007.
14. http://sites.lebedev.ru/DNS_FIAN/
15. Вернов С.Н., Чарахчян А.Н., Стожков Ю.И., Чарахчян Т.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. **39**, № 2. С. 316.
16. Вернов С.Н., Чарахчян А.Н., Базилевская Г.А. и др. // VII Ленинградский междунар. семинар «Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера». Л., 1975. С. 389.
17. Чарахчян А.Н., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И., Чарахчян Т.Н. // Тр. ФИАН. 1976. **88**. С. 3.
18. <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>
19. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>
20. Рымко Н.П., Тулинов В.Ф., Чарахчян А.Н. // ЖЭТФ. 1959. **36**, № 6. С. 1687.

21. Чарахчян А.Н., Тулинов В.Ф., Чарахчян Т.Н. // Геомагн. и аэрон. 1961. **1**, № 2. С. 150.
22. Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I. et al. // Adv. Space Res. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.009>
23. Базилевская Г.А., Крайнев М.Б., Махмутов В.С. и др. // Геомагн. и аэрон. 2003. **43**, № 4. С. 442.
24. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Арктика и Антарктика. М., 2004. Вып. 3 (37). С. 114.
25. Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. // Geophys. Res. Lett. 2001. **28**. P. 132569.
26. Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. **67**, № 10. С. 1449.
27. Ермаков В.И., Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С. // Тр. V Росс. конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003. **1**. С. 63.
28. Stozhkov Y.I. // J. Phys. G: Nucl. Particle Phys. 2003. **29**, N 5. P. 913.
29. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Механизм образования электричества грозных облаков (Mechanism of thundercloud electricity production). Препр. ФИАН № 25. М., 2002.
30. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/annual.land_ocean.90S.90N.df_1901-2000mean.dat

Cosmic rays in the Earth's atmosphere

Y. I. Stozhkov^a, G. A. Bazilevskaya^b

P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a stozhkov@fian.flandns.mipt.ru, ^b gbaz@rambler.ru.

A brief historical overview on research of cosmic rays in the Earth atmosphere as it was initiated and headed by S. N. Vernov during more than 50 years is presented. The main results of investigations of the last decades are presented. They include the study of solar cosmic rays, galactic cosmic ray modulation in the heliosphere, and the role of cosmic rays in the atmospheric processes.

Keywords: cosmic rays, Earth's atmosphere.

PACS: 95.85.Ry.

Received 30 December 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторах

1. Стожков Юрий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 485-42-63, e-mail: stozhkov@fian.flandns.mipt.ru.

2. Базилевская Галина Александровна — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр.; тел.: (495) 485-42-63, e-mail: gbaz@rambler.ru.