

УДК 523.165

ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ТРОПОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Г. А. Базилевская, М. Б. Крайнев, В. С. Махмутов, А. К. Свиржевская,
Н. С. Свиржевский, Ю. И. Стожков

Представлены результаты измерений заряженных частиц в тропосфере полярных и средних широт с 1957 г. по настоящее время. Если в стратосфере потоки вторичных космических лучей хорошо воспроизводят вариации первичного космического излучения, в основном 11-летний цикл, связанный с солнечной активностью, то в тропосфере добавляются другие вариации, по-видимому, атмосферного происхождения. В частности, повышенные амплитуды вариаций наблюдались до 1973 и после 1991 г. В Северном полушарии в вариациях присутствует годовая волна с максимумом в зимний период. Фаза волны соответствует ожидаемому температурному эффекту, но его амплитуда в 90-е годы в несколько раз больше ожидаемой.

В течение полувека Физический институт им. П. Н. Лебедева проводит мониторинг космических лучей в атмосфере Земли [1–4] с помощью радиозондов. Прибор, поднимаемый на метеорологическом баллоне, представляет собой телескоп из двух гейгеровских счетчиков, между которыми помещен алюминиевый фильтр для разделения частиц по энергии. Показания одного из счетчиков и телескопа передаются по радио на приемный пункт вместе с информацией о высоте прибора. Счетчик регистрирует электроны с энергией $E \geq 0.2$ МэВ, протоны с $E \geq 5$ МэВ, мюоны практически с эффективностью 100%, а также рентгеновское излучение с $E \geq 0.02$ МэВ с эффективностью менее 1%. Телескоп чувствителен к электронам с $E \geq 5$ МэВ, протонам с $E \geq 30$ МэВ и мюонам. Подъем радиозондов осуществляется регулярно в нескольких пунктах земного шара

(см. таблицу). Частота запусков радиозондов до начала 90-х годов прошлого века была ежедневной, в настоящее время составляет 3–4 раза в неделю.

Геомагнитное поле позволяет проникать в атмосферу только частицам с жесткостью выше пороговой [5], указанной в табл.; атмосфера тоже является спектрометром частиц по энергии, поэтому эксперимент дает возможность изучать вариации потоков галактических и солнечных космических лучей с энергией выше 100 МэВ, а также высыпания в атмосферу магнитосферных электронов.

Т а б л и ц а

Основные станции зондовых измерений космических лучей

Место запуска радиозонда	Географические координаты	Пороговая жесткость R_c , ГВ	Период измерений
Ст. Оленья, Апатиты, Мурманская обл.	68°57'N 33°03'E 67°33'N 33°20'E	0.6	1957–2002 2002 – наст. время
г. Долгопрудный, Московская обл.	55°56'N 37°31'E	2.35	1957 – наст. время
Алма-Ата, Казахстан	43°15'N 76°55'E	6.7	1962–1991
Ст. Мирный, Антарктида	66°34'S 92°55'E	0.03	1963 – наст. время

В исследованиях ФИАН наблюдаемая в эксперименте интенсивность заряженных частиц на разных глубинах атмосферы использовалась для получения информации о вариациях космических лучей разных энергий, падающих на границу атмосферы извне.

В последнее десятилетие возрос интерес к роли космических лучей в атмосферных процессах, поскольку космические лучи являются основным источником ионизации в атмосфере, по крайней мере, на высотах от ~ 3 до ~ 50 км [6–8]. В работе [9] показана высокая корреляция между временным поведением интенсивности космических лучей и облачного покрова на высотах ниже 3 км. Для исследования связи космических лучей с атмосферными процессами большое значение имеют изменения во времени потоков заряженных частиц в нижних слоях атмосферы. Эти явления изучались в работах Т. Н. Чарахчян [10 и ссылки там], но природа их осталась невыясненной. В данной работе мы показываем результаты наблюдений потоков заряженных частиц в атмосфере Земли и показываем, что вариации в верхней атмосфере (> 10 км) и в

тропосфере существенно различаются. Особое внимание уделяется вариациям потоков в тропосфере.

Вариации потоков заряженных частиц на разных уровнях в атмосфере. Потоки заряженных частиц, измеряемые счетчиком Гейгера, усреднялись за месячный интервал на разных высотах атмосферы. На рис. 1 в качестве примера представлены данные, полученные в Мурманской области на 9 уровнях атмосферы, в интервалах давлений 0–25, 25–55, 55–100, 100–300, 300–400, 400–500, 500–600, 600–700 и 700–900 г · см⁻², что соответствует средним высотам 29.5, 22.1, 17.9, 11.9, 8.2, 6.5, 5.0, 3.7 и 2.1 км соответственно. На высотах выше 10–12 км вариации потоков заряженных частиц демонстрируют отчетливую модуляцию в 11-летнем цикле солнечной активности (с амплитудой до 50%) и хорошо отражают модуляцию потоков галактических космических лучей (рис. 1(а)). По мере продвижения в глубь атмосферы 11-летний цикл становится менее выраженным, и на высоте порядка 4 км его амплитуда составляет 15–20%, но в то же время существенно возрастают другие вариации потоков заряженных частиц (рис. 1(б)).

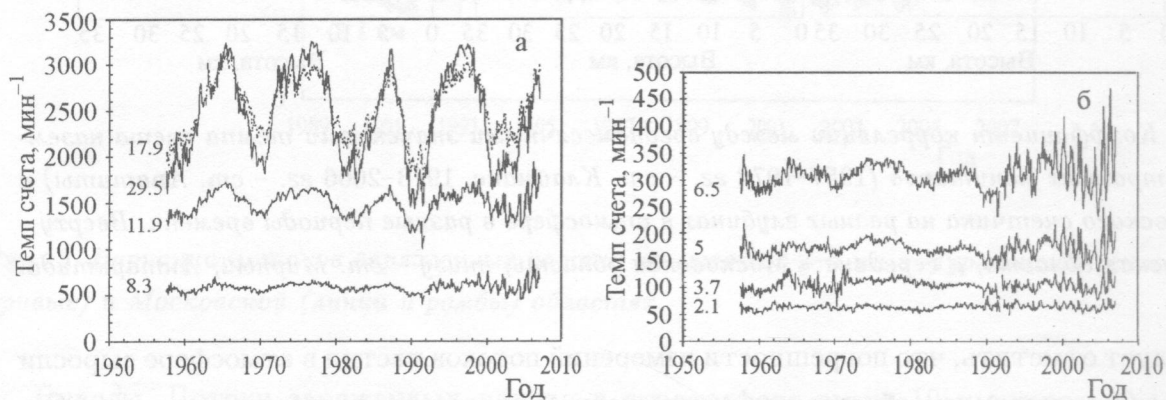


Рис. 1. Среднемесячные значения темпа счета заряженных частиц на разных высотах атмосферы (сбоку указаны высоты в км): (а) – на высотах 8–30 км, (б) – на высотах ниже 8 км.

На высотах ниже 10 км в потоках частиц наблюдается 3 продолжительных периода с разной возмущенностью потоков частиц: 1957–1972 и 1991–2006 гг. – возмущенные периоды, 1973–1990 гг. – спокойный период. Это справедливо для всех станций, за исключением Алма-Аты, где в 1971–1991 гг. возмущенность была выше, чем до 1971 г. (в 1991 г. измерения были прекращены). В спокойный период (1973–1990 гг.) 11-летний цикл прослеживался в стратосфере и тропосфере вплоть до ~ 5 км, в возмущенные периоды до ~ 10 км. Об этом свидетельствует рис. 2, где приведены коэффициенты корреляции среднемесячных потоков частиц на разных уровнях атмосферы с данными

нейтронного монитора (НМ) для разных периодов наблюдений. Для периода с 1957 г. по 1972 год использованы данные НМ Клаймакс [11], с 1973 г. – данные НМ Апатиты [12]. На рис. 2 видно, что на стратосферных высотах наблюдается исключительно высокая корреляция среднемесячных значений баллонных измерений с данными НМ, которая постепенно уменьшается с ростом глубины в атмосфере, оставаясь значимой. Изменения коэффициента корреляции с высотой существенно отличаются в спокойные и возмущенные периоды.

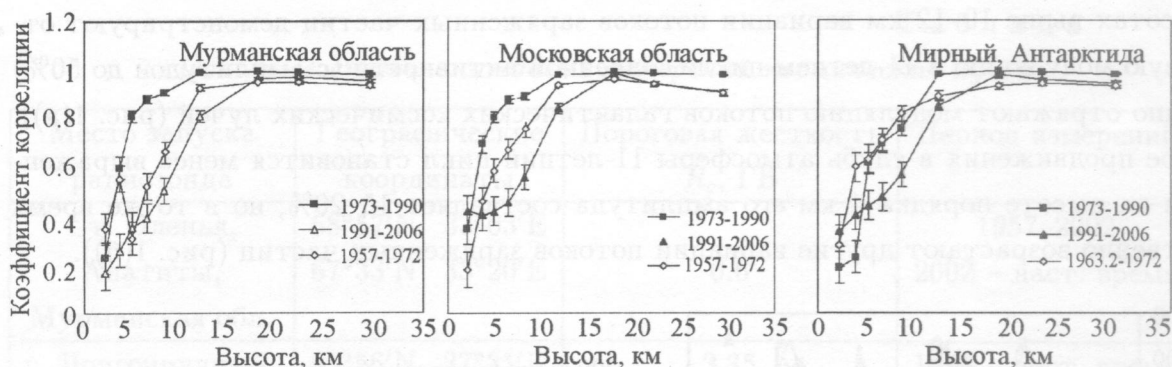


Рис. 2. Коэффициент корреляции между среднемесячными значениями темпа счета наземных нейтронных мониторов (1957–1972 гг. – ст. Клаймакс, 1973–2006 гг. – ст. Апатиты) и гейгеровского счетчика на разных глубинах в атмосфере в разные периоды времени. Вверху – Мурманская область, в середине – Московская область, внизу – ст. Мирный, Антарктида.

Следует отметить, что погрешности измерений потоков частиц в атмосфере выросли с начала 90-х годов, что обусловлено уменьшением частоты запусков радиозондов. Однако детальное рассмотрение вариаций потоков частиц в тропосфере показало, что они синхронны в Мурманской и Московской областях, причем эти вариации нередко имели характер годовой волны (рис. 3). В то же время годовая волна в тропосфере на ст. Мирный (Антарктида) не наблюдалась. Годовая волна в потоках частиц с максимумом в зимние месяцы может быть следствием температурного эффекта мюонной компоненты, которая в приземных слоях атмосферы составляет до $\sim 60\%$ [13]. Известно, что приземная температура в Арктике имеет ярко выраженную годовую волну [14], которая почти не проявляется в Антарктиде. Этим можно объяснить практическое отсутствие годовой волны в потоках частиц на ст. Мирный. Однако ожидаемая в наших измерениях амплитуда годовых вариаций из-за температурного эффекта в приземном слое составляет $\sim 5\%$ [15], что соответствует спокойному периоду 1973–1990 гг. Амплитуда

годовой волны в потоках заряженных частиц в тропосфере Мурманской и Московской областей в 1999–2002 гг. составляла $\sim 15\text{--}20\%$, а в 2005–2006 гг. примерно 30%. Эта волна наблюдалась в 1999–2002 гг. на высотах от 2 до 8 км, в 2005–2006 гг. ее можно было проследить до ~ 10 км.

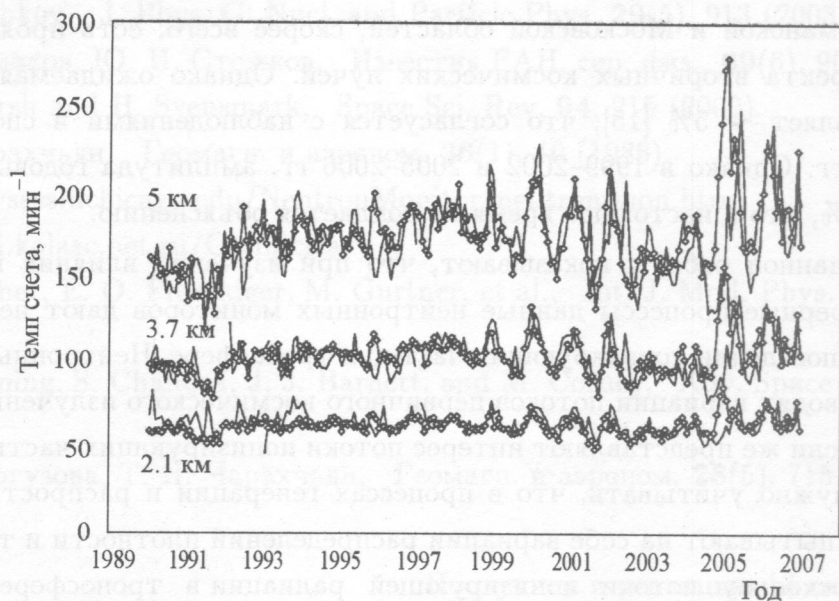


Рис. 3. Вариации потоков заряженных частиц на высотах 2–5 км в Мурманской (сплошные кривые) и Московской (линии и ромбы) областях.

Выводы. Потоки заряженных частиц в стратосфере выше 10 км хорошо воспроизводят временной ход интенсивности первичных космических лучей, падающих на границу атмосферы, и хорошо коррелируют с данными наземных нейтронных мониторов. В тропосфере наблюдаются дополнительные вариации потока заряженных частиц, приводящие к уменьшению корреляции с данными НМ и с вариациями потоков частиц в стратосфере. На высотах ниже 5 км эта корреляция отсутствует. На высотах выше 15 км 11-летний цикл в полярных широтах имеет амплитуду до 50%, на высоте 5 км его амплитуда $\sim 15\text{--}20\%$.

Имеются особенности вариаций потоков частиц в тропосфере, носящие длительный характер. На высотах ниже 10 км наблюдался повышенный уровень вариаций с конца 1950-х до начала 1970-х и с начала 1990-х годов. Это явление можно проследить по данным полярных станций Мурманск, Мирный и среднеширотной станции Москва. В

1973–1990 гг. потоки частиц в тропосфере значительно лучше воспроизводили ситуацию в стратосфере, чем в возмущенные периоды.

В тропосфере Мурманска и Москвы иногда прослеживаются синхронные годовые вариации потока частиц с максимумом в зимнее время, тогда как на ст. Мирный (Антарктида) эти вариации выражены слабо. Годовая волна потоков заряженных частиц в тропосфере Мурманской и Московской областей, скорее всего, есть проявление температурного эффекта вторичных космических лучей. Однако ожидаемая амплитуда вариаций составляет $\sim 5\%$ [15], что согласуется с наблюдениями в спокойный период 1973–1990 гг. Однако в 1999–2002 и 2005–2006 гг. амплитуда годовых вариаций достигала 20–30%, что в настоящее время не поддается объяснению.

Результаты данной работы показывают, что при изучении влияния космических лучей на атмосферные процессы данные нейтронных мониторов дают недостаточное представление о поведении ионизирующих частиц в тропосфере. Нейтронные мониторы хорошо воспроизводят вариации потоков первичного космического излучения на границе атмосферы. Если же представляют интерес потоки ионизирующих частиц в глубине атмосферы, то нужно учитывать, что в процессах генерации и распространения эти частицы сами испытывают на себе вариации распределений плотности и температуры в атмосфере. Поскольку потоки ионизирующей радиации в тропосфере испытывают долговременные изменения, пока не нашедшие объяснения, необходимо продолжать измерения потоков космических лучей в атмосфере Земли, ведущиеся в ФИАН с 1957 г.

Авторы выражают благодарность за предоставление через Интернет данных нейтронных мониторов ст. Апатиты и ст. Клаймакс (последние поддержаны NSF грантом АТМ-0339527). Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 05-02-16185а, 05-02-17346а, 07-02-01019а, 07-02-10018к), а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Нейтронная физика”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. Н. Чарахчян, УФН **83**(1), 35 (1964).
- [2] G. A. Bazilevskaya, M. B. Krainev, Yu. I. Stozhkov, et al., J. Geomagn. Geoelectr. **43**(Suppl.), 893 (1991).
- [3] Ю. И. Стожков, Н. С. Свиржевский, Г. А. Базилевская и др., Сб. Арктика и Антарктика, Наука, Москва, вып. 3(37), 114 (2004).

- [4] Ю. И. Стожков, Н. С. Свиржевский, Г. А. Базилевская и др., Препринт ФИАН, No. 14 (ФИАН, Москва, 2007).
- [5] M. A. Shea and D. F. Smart, *Adv. Space Res.* **34**, 420 (2004).
- [6] В. И. Ермаков, Ю. И. Стожков, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, No. 8, 3 (2004).
- [7] Y. I. Stozhkov, *J. Phys. G: Nucl. and Particle Phys.* **29**(5), 913 (2003).
- [8] В. И. Ермаков, Ю. И. Стожков, *Известия РАН, сер. физ.*, **69**(6), 904 (2005).
- [9] N. D. Marsh and H. Svensmark, *Space Sci. Rev.* **94**, 215 (2000).
- [10] Т. Н. Чарахчян, *Геомагн. и аэроном.* **26**(1), 10 (1986).
- [11] <http://ulysses.uchicago.edu/NeutronMonitor/neutron.mon.html>
- [12] <http://pgi.kolasc.net.ru/CosmicRay/>
- [13] L. Desorgher, E. O. Flueckiger, M. Gurtner, et al., *Int. J. Mod. Phys. A* **20**(29), 6802 (2005).
- [14] E. L. Fleming, S. Chandra, J. J. Barnett, and M. Corney, *Adv. Space Res.* **10**(12), 11 (1990).
- [15] А. И. Кургузова, Т. Н. Чарахчян, *Геомагн. и аэроном.* **23**(5), 715 (1983).

Поступила в редакцию 18 сентября 2007 г.