

УДК 550.388.2

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВБЛИЗИ ГЕОМАГНИТНОГО ЭКВАТОРА НА ВЫСОТАХ ДО 1000 км

В.Л. Петров, О.Р. Григорян

LONG-TERM VARIATIONS OF ELECTRON FLUXES NEAR THE GEOMAGNETIC EQUATOR AT HEIGHTS UP TO 1000 km

V.L. Petrov, O.R. Grigoryan

С середины 90-х гг. прошлого века в НИИЯФ МГУ ведется исследование спорадических возрастных потоков электронов с энергиями до нескольких МэВ вблизи геомагнитного экватора на $L < 1.2$. Определены различные характеристики наблюдаемого явления, в том числе энергетический спектр электронов. Спектр имеет сложную форму, в районе энергий 1 МэВ на нем имеется излом. В работе исследуются долговременные вариации потоков таких электронов на низких широтах по данным различных космических экспериментов почти за 30 лет, в частности, по непрерывному ряду данных со спутников серии NOAA POES, «Интеркосмос-24», «Университетский-Татьяна», «Коронас-Ф».

Введение

Исследования потоков заряженных и нейтральных частиц, наряду с наблюдениями электромагнитных полей и волн, являются важнейшим источником информации о свойствах магнитосферы Земли в целом и радиационных поясов в частности. Прямые спутниковые исследования ближайшего к нам космоса ведутся почти полвека, и за прошедшее время накоплен колоссальный объем данных, изучение которого продолжается до сих пор.

В середине 90-х гг. на станции «Мир» (аппаратура НИИЯФ МГУ «Спрут-V») были обнаружены всплески электронов с энергией в десятки–сотни кэВ вблизи геомагнитного экватора. Эффект оказался достаточно неожиданным, поскольку в этой области на высотах ~300–400 км о существовании электронов в литературе ранее не сообщалось, тем более, что по существующим современным моделям радиационных поясов Земли электронов там и не должно быть. Например, общепринятая в настоящее время модель распределения радиации в околоземном космическом пространстве AE-8 (а также все модели на ее основе) рассматривает потоки электронов, начиная с $L > 1.2$ и энергии $E_e > 100$ кэВ. В модели считается, что на $L < 1.2$ потоки электронов отсутствуют. Хорошо изученные на данный момент физические процессы, такие как радиальный дрейф электронов, потери энергии электронами на кулоновское рассеяние, не объясняют наблюдаемые экспериментально потоки электронов. Было высказано предположение, что появление электронов в области экватора может быть результатом взаимодействия частиц радиационных поясов с низкочастотными волнами (которые в спокойных геомагнитных условиях в этой области отсутствуют) либо ускорения электронов в локальных электрических полях молниевых разрядов во время гроз. Возможных источников таких волн может быть три: молниевые разряды (низкочастотные волны, генерируемые молниями); эффект резонанса электронов с такими волнами известен с начала 60-х гг. в области авроральных широт), землетрясения, а также антропогенный фактор, которым на экваторе можно пренебречь [1, 2].

Обнаружение эффекта

В середине 1990-х гг. электронные образования на экваторе были зарегистрированы прибором «Спрут-V», а позднее прибором «Рябина-2» на борту орби-

тальной станции «Мир» [3]. В работах [3, 4] приведены основные особенности обнаруженного явления:

- спорадически регистрировались всплески интенсивности потока электронов с энергиями в десятки–сотни кэВ на $L < 1.2$ (вероятность регистрации не превышала 10 %);
- в распределении всплесков наблюдалась явно выраженная долготная зависимость, в которой авторы выделили три основных долготных интервала: ($80^\circ \text{ W} - 0^\circ - 35^\circ \text{ E}$), ($90^\circ \text{ E} - 120^\circ \text{ E}$), ($160^\circ \text{ E} - 180^\circ - 135^\circ \text{ W}$);
- пики регистрировались в основном в двух широтных интервалах: $L < 1.1$ и $1.1 < L < 1.2$;
- вблизи геомагнитного экватора регистрировались, как правило, более энергичные электроны, т. е. наблюдалось ужесточение спектра электронов начиная с 500–600 кэВ;
- интенсивность потока электронов таких энергий на экваторе не превышала $10 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$;
- электроны регистрировались в основном в утренние (04:30–05:00) и вечерние (до 20:00) часы MLT;
- появление всплесков слабо зависело от уровня геомагнитной активности.

В дальнейшем, при исследовании измерений потоков на различных спутниках было обнаружено, что подобные всплески присутствуют в данных различных космических экспериментов, полученных за большой промежуток времени с различным уровнем солнечной активности на разных орбитах и высотах, а также совершенно разными приборами (табл. 1) в широком энергетическом диапазоне.

Как результат работы с данными был построен обобщенный дифференциальный энергетический спектр потоков электронов на $L < 1.2$ (рис. 1). Поток электронов предполагался изотропным, т. е. нормировался на единицу телесного угла, геометрический фактор прибора, энергетический интервал, в котором работал детектор. Поток суммировался для всех значений магнитного поля, однако область магнитной аномалии исключалась из рассмотрения.

Результаты разных экспериментов, как можно увидеть из рис. 1, неплохо согласуются между собой. Определенный разброс связан с высотной зависимостью потока электронов (диапазон высот, на которых проводилась регистрация: 300–1100 км), однако он несущественен.

Список экспериментов

Название эксперимента	Год	Параметры орбиты	Прибор	Энергии электронов
«Спрут-6» на борту ОС «Мир»	1999	350–400 км, 51.6°	«Спрут-6»	500–4600 кэВ
Микроспутник «Колибри-2000»	март–апрель 2002	<350 км, 51.6°	АЧП	>75 кэВ, >300 кэВ, >600 кэВ
ИСЗ «Интеркосмос-24»	1989–1993	500–2500 км, 82.6°	SPE-1	18–480 кэВ в 6 каналах
Микроспутник «Университетский-Татьяна»	2005	1000 км, 83°	БД	300–600 кэВ, 700–900 кэВ
ИСЗ «Космос-900»	1977–1979	470–530 км, 83°		30–210 кэВ в 4 каналах
ИСЗ «Коронас-И»	1994–1998	~500 км, 82.3°	МКЛ	0.5–1.3 МэВ
ИСЗ «Коронас-Ф»	2001–2004	~500 км, 82.5°	СКЛ	0.3–12 МэВ в 5 каналах
ИСЗ NOAA POES-17	с 2002	833 км, 98.8°	Mered	>30 кэВ, >100 кэВ, >300 кэВ
ИСЗ NOAA POES-18	с 2005			
Косм. обсерватория «Гамма»	1990	385 км, 51.6°	«Гамма-1»	50–200 МэВ
ИСЗ SAMPEX	с 1992	550–670 км, 82°	РЕТ	2.5–14 МэВ в 2 каналах

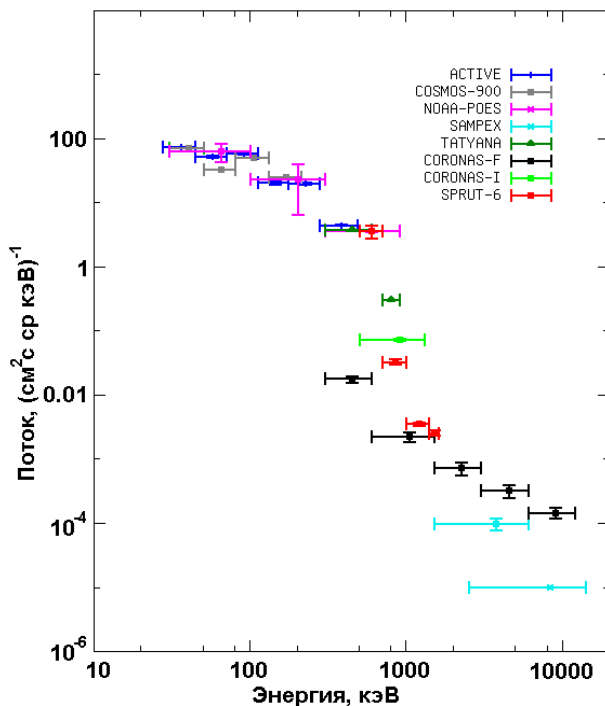


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр потока электронов на $L < 1.2$ по данным различных экспериментов.

Также большая статистика экспериментального материала позволяет сгладить малые временные вариации интенсивности потока.

Долговременные вариации

Возникает вопрос – можно ли использовать данные различных космических аппаратов, полученные больше чем за два цикла солнечной активности? Существует ли зависимость потоков электронов под

поясами от солнечной активности? Ответить на эти вопросы можно, используя данные спутников серии NOAA [5]. Спутники этой серии работают на орбите с конца 70-х гг., а с 1991 г. над Землей одновременно может находиться несколько аппаратов. Они запускаются на одинаковые орбиты с изначальной высотой 833 км и наклоном 98.8°. Измерительная аппаратура на всех спутниках идентичная и, по заверению авторов эксперимента, калибруется одинаково. Таким образом, спутники серии NOAA могут дать непрерывный график измерения потока электронов под радиационными поясами, что позволяет проверить зависимость потока электронов от времени.

Сначала было проверено утверждение авторов об одинаковой калибровке аппаратуры спутников – сравнивались показания детекторов разных аппаратов, усредненные за одни и те же промежутки времени, много большие времени прохождения одного витка. Данные разных приборов хорошо совпадали в пределах погрешности. Некоторое расхождение показаний детекторов обусловлено немного отличающейся высотой орбит аппаратов – спутники медленно теряют высоту со временем.

Затем был построен непрерывный ряд зависимости потока электронов трех различных энергий на $L < 1.2$ от времени за промежуток с 1998 по 2007 г. Дополнительных критериев отбора потоков не использовалось. Усреднение данных велось за календарный месяц. Это позволяет практически исключить влияние кратковременных событий на зависимость потока от времени и четче выявить вариации долговременного масштаба. На рис. 2 можно увидеть график зависимости потока электронов на $L < 1.2$ от времени.

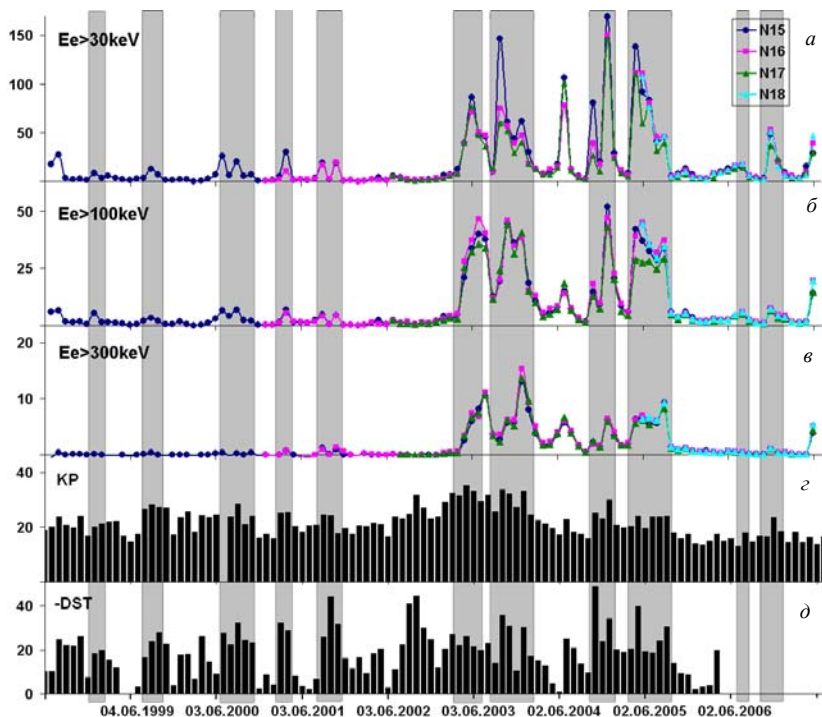


Рис. 2. Зависимость потока захваченных электронов на $L < 1.2$ от времени по данным NOAA POES-15, -16, -17, -18. $a - E_e > 30$ кэВ; $b - E_e > 100$ кэВ; $v - E_e > 300$ кэВ; z и d – индексы геомагнитной активности D_{st} и K_p соответственно. Данные усреднены за 1 мес. Серым цветом выделены периоды регистрации повышенных потоков электронов.

Характерно, что существенные вариации масштаба нескольких месяцев испытывают потоки электронов с энергиями как в десятки кэВ, так и в сотни кэВ. Время существования повышенных потоков электронов примерно равно времени жизни квазизахваченных электронов таких энергий в радиационных поясах. Также на этом рисунке представлены вариации индексов геомагнитной активности D_{st} и K_p . Данные о геомагнитной обстановке взяты из базы данных [6]. Видно, что все месяцы повышенного счета электронов сопровождалось геомагнитными возмущениями, однако не все геомагнитные события вызывали продолжительное появление электронов на $L < 1.2$. Представлены данные за время последнего солнечного цикла, однако можно заметить, что прямой связи величины наблюдаемых потоков с солнечной активностью не наблюдается.

Заключение

В данной работе рассматривались потоки электронов с энергиями в десятки–сотни кэВ на $L < 1.2$ под радиационными поясами Земли. Существенно для физики околоземного пространства, что эти потоки отличны от нуля. Для возможности сравнения данных различных космических экспериментов необходима информация о долговременных вариациях таких потоков. В качестве калибровочного эксперимента были выбраны данные ИСЗ серии NOAA POES. Проверка показала возможность использования этих данных для исследования долговременных вариаций потоков приэкваториальных электронов. В результате получено, что потоки электронов непо-

средственно не зависят от солнечной активности, однако отдельные геомагнитные события могут вносить значительный вклад в величину потоков электронов вблизи геомагнитного экватора под радиационными поясами. Механизм заброса электронов на эти L -оболочки требует дальнейшего изучения, так как существующие модели не обеспечивают наблюдаемые времена жизни таких электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян О.Р., Климов С.И., Кузнецов С.Н., Панасюк М.И. Антропогенный фактор электромагнитного загрязнения ближнего космоса // Инж. Экология. 1996. № 4. С. 25–41.
2. Petrov V.L., Grigoryan O.R., Petrov A.N. High-energy electrons at low latitudes: Is their connection with thunderstorms possible? WDS'05 Proceedings of Contributed Papers. 2005. Part II. P. 257–262.
3. Biryukov A.S., Grigoryan O.R., Kuznetsov S.N., et. al. Low-energy charged particles at near-equatorial latitudes according to «Mir» orbital station data // Adv. Space Res. 1996. V. 17, N 10. P. (10)189–(10)192.
4. Grigoryan O.R., Sinyakov A.V., Klimov S.I. Energetic electrons on $L < 1.2$. Connection to lightning activity // Adv. Space Res. 1997. V. 20, N 3. P. 389–392.
5. <http://poes.ngdc.noaa.gov/data/>
6. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва