

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Динамика потоков релятивистских электронов в околоземном космическом пространстве в 2001–2005 гг.И. Н. Мягкова^a, А. В. Богомолов, Ю. С. Шугай*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^airina@srd.sinp.msu.ru*

Статья поступила 29.12.2009, подписана в печать 04.02.2010

Представлены данные по регистрации потоков релятивистских электронов (1.5–3 МэВ) на высотах 360–500 км (ИСЗ КОРОНАС-Ф). Показано, что с августа 2001 по сентябрь 2003 г. наблюдался значительный рост среднемесячных значений потоков этих частиц во внешнем радиационном поясе Земли (РПЗ). Также обнаружено, что в период с августа 2001 по июль 2004 г. имела место сильная корреляция среднемесячных значений потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ со среднемесячными значениями скорости солнечного ветра и Kp -индекса, которая нарушилась после июля 2004 г. Обсуждаются возможные причины обнаруженных закономерностей.

Ключевые слова: электроны, радиационные пояса Земли, солнечный ветер.

УДК: 550.385.4. PACS: 92.60.hw, 94.30.Xy, 96.60.Vg.

Введение

Несмотря на тот факт, что исследование вариаций потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) ведется практически с момента открытия внешнего пояса, проблема мониторинга потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ и поиск причин вариаций их потоков остаются актуальными по сей день. Это связано с тем, что общепринятая теория ускорения электронов до релятивистских энергий в магнитосфере Земли, достаточно полно описывающая основные обнаруженные экспериментально особенности их вариаций, пока не создана. Исследования вариаций потоков релятивистских электронов важны также и с прикладной точки зрения, поскольку релятивистские электроны могут являться одной из причин ионизации микросхем, входящих в состав приборов, используемых на космических аппаратах, что может привести к серьезным сбоям в их работе, вплоть до потери космического аппарата.

Как уже было сказано выше, экспериментальные исследования вариаций потоков электронов внешнего РПЗ проводились как в России, так и за рубежом разными научными коллективами (см. работы [1–5] и ссылки в них). В этих работах убедительно демонстрируется связь вариаций потоков релятивистских электронов с параметрами солнечного ветра, в частности с его скоростью. Так в работе [3], выполненной на основе данных, полученных в эксперименте на ИСЗ SAMPEX (высота орбиты 600 км, наклонение 82°), показано, что существует корреляция между потоками релятивистских электронов внешнего РПЗ со скоростью солнечного ветра (коэффициент корреляции ~ 0.4) с запаздыванием на 2 сут на $L = 10$ и 4 сут на $L = 6.6$. На основании выполненного анализа авторами [6] был сделан вывод, что электроны солнечного ветра не могут рассматриваться в качестве основного источника релятивистских электронов РПЗ. Динами-

ка потоков электронов РПЗ с энергией 0.3–3 МэВ на высотах 400–500 км во время наиболее сильных магнитных бурь 2001–2005 гг. подробно рассмотрена в работах [7–9]. Известно, что заметное воздействие на магнитосферу Земли оказывают также высокоскоростные потоки солнечного ветра, как квазистационарные, так и спорадические. Источником квазистационарных высокоскоростных потоков, вызывающих рекуррентные геомагнитные возмущения средней и слабой интенсивности, являются корональные дыры на Солнце, а спорадические высокоскоростные потоки в настоящее время принято связывать с корональными выбросами массы (КВМ) и солнечными вспышками. Геоэффективность солнечного ветра, т. е. эффективность передачи энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли зависит и от ориентации межпланетного магнитного поля — она максимальна при отрицательной, южной ориентации и при больших величинах B_z .

В работе исследуются не отдельные события, а крупномасштабная динамика потоков релятивистских электронов на малых высотах и ее связь с изменениями в солнечном ветре. Ранее этот вопрос исследовался нами по данным первого полугодия работы КОРОНАС-Ф [10].

1. Эксперимент

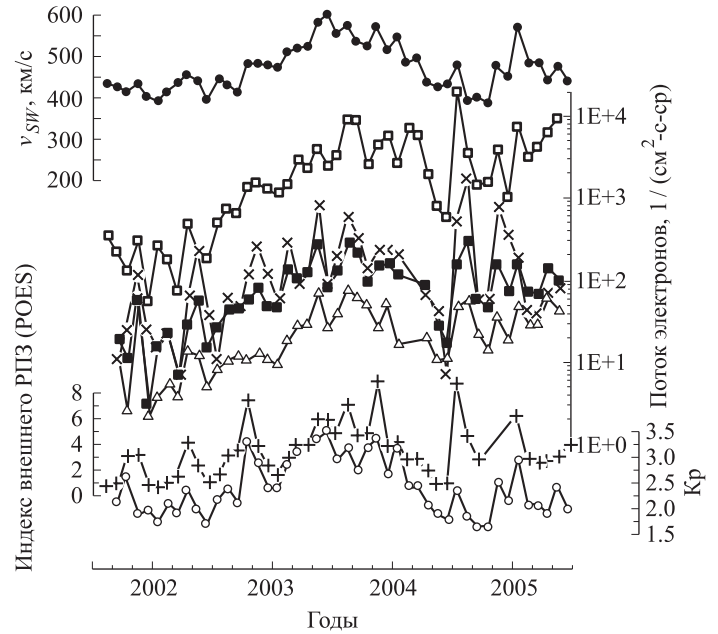
Поскольку российская солнечная обсерватория КОРОНАС-Ф имела полярную круговую орбиту (первоначальная высота 500 км, наклонение 82.5°), установленные на ней приборы, регистрирующие заряженные частицы позволили осуществить долговременный мониторинг их потоков в течение всего времени функционирования аппаратуры — с августа 2001 по июнь 2005 г. При помощи установленного на КОРОНАС-Ф прибора МКЛ (Монитор космических лучей) проводились измерения потоков и спектров протонов с энергиями 1–90 МэВ и электронов с энергиями 0.3–12 МэВ [11].

Электроны с энергиями от 300 кэВ до 12 МэВ регистрировались при помощи полупроводникового телескопа, состоявшего из двух полупроводниковых детекторов толщиной 0.05 мм и 2.0 мм и кристалла CsI толщиной 1.0 см, окруженных пластическим сцинтиллятором толщиной 0.5 см, работавшим в режиме антисовпадений. Электроны регистрировались в пяти энергетических диапазонах: 0.3–0.6, 0.6–1.5, 1.5–3, 3–6 и 6–12 МэВ. Апертура телескопа составляла $\sim 23^\circ$, ориентирован он был в антисолнечном направлении. В течение анализируемого периода работы ИСЗ КОРОНАС-Ф высота его орбиты уменьшалась от 500 до 370 км.

2. Анализ экспериментальных данных

При анализе вариаций потоков релятивистских электронов с 2001 по 2005 г. обнаружилось, что среднемесячные значения потоков релятивистских электронов, измерявшихся на L от 3 до 6 в эксперименте на ИСЗ КОРОНАС-Ф, имевшем круговую полярную орбиту, в период с сентября 2001 по сентябрь 2003 г. возросли более чем на порядок. Аналогичный рост потоков релятивистских электронов наблюдался и на геостационарной орбите в эксперименте на ИСЗ GOES-10. L — первая из координат Мак-Илвайна L и B , которые представляют собой номер магнитной оболочки, проходящей через данную точку пространства, по которой движется ведущий центр захваченной заряженной частицы, и напряженность магнитного поля в данной точке пространства. За параметр магнитной оболочки обычно принимается величина L , равная отношению среднего удаления реальной магнитной оболочки от центра Земли в плоскости геомагнитного экватора к радиусу Земли.

На рисунке приведены среднемесячные значения потока релятивистских электронов с энергиями от 1.5 до 3 МэВ в Южном полушарии с августа 2001 по июнь 2005 г. для трех выделенных интервалов L -оболочек ($L=3-4$ — косые кресты, $L=4-5$ — черные квадраты, $L=5-6$ — открытые треугольники). Также на рисунке показаны вариации потоков релятивистских электронов с энергией >2 МэВ на геостационарной орбите (пустые квадраты), вариации индекса внешнего РПЗ (прямые кресты) по данным низковысотного полярного ИСЗ POES, вариации скорости солнечного ветра (черные кружки) по данным ИСЗ ACE и Kp -индекса (открытые кружки) [12].



Вариации среднемесячных значений потока электронов внешнего РПЗ, скорости солнечного ветра и Kp -индекса с августа 2001 по июнь 2005 г.

Из рисунка видно, что вариации потоков релятивистских электронов, измеренные на малых высотах в эксперименте на ИСЗ КОРОНАС-Ф на разных L -оболочках, достаточно близки между собой и хорошо коррелируют с данными по вариациям потока релятивистских электронов как на геостационарной орбите, так и с вариациями индекса внешнего РПЗ по данным POES. В свою очередь вариации потоков релятивистских электронов по данным всех трех ИСЗ коррелируют с изменениями скорости солнечного ветра и Kp -индекса вплоть до конца июля 2004 г., а в последующий период времени указанная корреляция нарушается.

Коэффициенты корреляции потоков релятивистских электронов, измеренных в разных экспериментах, а также со скоростью и плотностью солнечного ветра, Kp -индексом и индексом внешнего РПЗ за весь исследуемый период (с августа 2001 по июнь 2005 г.), приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что коэффициенты корреляции вариаций потоков релятивистских электронов с параметрами солнечного ветра и Kp -индексом достаточно высоки и для полярной, и для геостационарной орбиты.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции потоков релятивистских электронов, измеренных в разных экспериментах, а также со скоростью v_{sw} и плотностью d_{sw} солнечного ветра, Kp -индексом и индексом внешнего РПЗ за весь исследуемый период (с августа 2001 по июнь 2005 г.)

	e 1.5–3 МэВ $L = 3-4$	e 1.5–3 МэВ $L = 4-5$	e 1.5–3 МэВ $L = 5-6$	e (GOES) > 2 МэВ
e (GOES) > 2 МэВ	0.66	0.9	0.82	1.00
POES index	0.72	0.71	0.64	0.71
v_{sw}	0.73	0.81	0.76	0.84
d_{sw}	-0.55	-0.8	-0.8	-0.82
Kp	0.7	0.72	0.6	0.75

Таблица 2

Коэффициенты корреляции потоков релятивистских электронов по данным КОРОНАС-Ф и ИСЗ GOES-10 со скоростью v_{sw} и плотностью d_{sw} солнечного ветра, а также с индексом Kp в различные периоды времени

	09.2001–06.2002	07.2002–06.2003	07.2002–06.2004	07.2004–06.2005
	$v_{sw}/d_{sw}/Kp$			
1.5–3 МэВ, $L = 3-4$	0.33/ - 0.45/0.00	0.58/ - 0.53/0.63	0.84/ - 0.12/0.82	0.04/ - 0.02/0.28
e 1.5-3 МэВ $L=4-5$	0.47/ - 0.87 /0.02	0.76/-0.73/0.76	0.83/ - 0.30/0.77	0.19/ - 0.21/0.39
e 1.5-3 МэВ $L=5-6$	0.56/ - 0.71 /0.08	0.82/-0.82/0.75	0.72/ - 0.32/0.62	0.35/ - 0.45/0.41
e (GOES) >2 МэВ	0.33/ - 0.87 /0.10	0.88/-0.85/0.88	0.82/ - 0.43/0.73	0.52/ - 0.68/0.55

3. Обсуждение

Из рисунка хорошо видно, что согласно измерениям на ACE, в период 2001–2003 гг. наблюдался заметный рост средней скорости солнечного ветра. В этот же период растут и среднемесячные потоки релятивистских электронов, измеренные в различных экспериментах. Данный факт не является удивительным, поскольку хорошо известно, что приход высокоскоростных потоков солнечного ветра, как правило, вызывает возмущения в магнитосфере Земли (что и отражено ростом Kp -индекса). После прихода высокоскоростных потоков солнечного ветра наблюдается рост потоков электронов как на малых высотах, так и на геостационарной орбите (см., напр., [3, 4]). Вместе с тем следует отметить, что после серии бурь, произошедших в июле 2004 г., указанная корреляция потоков электронов со скоростью солнечного ветра и уровнем геомагнитных возмущений нарушилась и не восстановилась по крайней мере до мая 2005 г. В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции потоков релятивистских электронов по данным КОРОНАС-Ф на малых высотах и на геостационарной орбите по данным ИСЗ GOES-10 со скоростью v_{sw} и плотностью d_{sw} солнечного ветра, а также с индексом Kp для четырех последовательных примерно равных периодов времени в течение исследуемого временного интервала. Коэффициенты корреляции, имеющие значения выше 0.7, выделены жирным шрифтом. Из табл. 2 хорошо видно, что высокая корреляция как со скоростью солнечного ветра, так и с его плотностью наблюдалась с середины 2002 по середину 2004 г. В последний год наблюдений (с июля 2004 по июнь 2005 г.) корреляция потоков электронов со скоростью, в особенности на близких к земле L -оболочках, резко падает.

Данный наблюдаемый факт может быть связан с секторной структурой межпланетного магнитного поля и потоков солнечного ветра. В настоящее время хорошо известно, что межпланетное магнитное поле имеет секторную структуру с полями положительной и отрицательной полярности, которые чередуются с цикличностью, почти совпадающей с периодом вращения Солнца [13]. На фазе спада 23-летнего цикла приблизительно с середины 2002 до середины 2004 г. существовала стабильная двухсекторная структура межпланетного магнитного поля. Каждому сектору межпланетного магнитного поля соответствовал рекуррентный высокоскоростной поток солнечного ветра, связанный с прохождением обширных корональных дыр по диску Солнца. На протяжении од-

ного солнечного оборота крупные корональные дыры дважды появлялись на центральном меридиане Солнца. Эти корональные дыры имели противоположные магнитные полярности, отвечающие геометрии наклонного магнитного диполя относительно оси вращения Солнца в это время. Одна из корональных дыр была больше другой, что создало преобладание одного из высокоскоростных потоков солнечного ветра [14]. Так, в 2003 г. в среднем максимальная скорость одного потока солнечного ветра была равна 750 ± 40 км/с, а другого — 600 ± 45 км/с. Двухсекторная структура межпланетного магнитного поля и крупномасштабные структуры на Солнце практически не менялись вплоть до середины 2004 г. В работе [15] отмечается, что с мая 2004 г. началась медленная перестройка двухсекторной структуры межпланетного магнитного поля в четырехсекторную. Перестройка секторной структуры происходила в течение июня–октября 2004 г. Во время и после перестройки, в июле и ноябре 2004 г., наблюдалось несколько мощных эруптивных событий (28.07.04 и 07–08.11.04), которые вызвали сильные геомагнитные бури на Земле. С октября 2004 г. регистрировалась стабильная четырехсекторная структура межпланетного магнитного поля, которой соответствовало три высокоскоростных потока солнечного ветра. Такая структура просуществовала до сентября–октября 2005 г. [16].

Таким образом, высокая корреляция потоков релятивистских электронов со скоростью и плотностью солнечного ветра, наблюдалась в период существования двухсекторной структурой межпланетного магнитного поля, связанной с двумя высокоскоростными потоками солнечного ветра, источником которых были низкоширотные корональные дыры. Период, когда корреляция потоков электронов со скоростью солнечного ветра резко падает, приходится на период перестройки структуры межпланетного магнитного поля с двухсекторной на четырехсекторную (июнь 2004 — сентябрь 2005 гг.).

Заключение

На основании выполненных в настоящей работе исследований нами были сделаны следующие выводы.

1. По данным КОРОНАС-Ф, на высотах 400–500 км в период с августа 2001 по сентябрь 2003 г. наблюдался значительный рост потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли.

2. Среднемесячные значения потоков релятивистских электронов как на малых высотах на L от 3 до 6, так и на геостационарной орбите в период времени с августа 2001 по июль 2004 г. хорошо коррелируют со

скоростью солнечного ветра и с уровнем геомагнитной активности (*Kp*-индекс).

3. С середины 2004 г. (после июльских бурь) указанная корреляция со скоростью солнечного ветра нарушилась и не восстановилась по крайней мере до середины 2005 г.

4. Высокий уровень корреляции потоков релятивистских электронов со скоростью и плотностью солнечного ветра, а также с индексом геомагнитной активности *Kp* наблюдался в период существования двухсекторной структуры межпланетного магнитного поля, с которой были связаны два квазистационарных высокоскоростных потока солнечного ветра. Источником высокоскоростных потоков солнечного ветра были долгоживущие обширные низкоширотные корональные дыры различной полярности. Падение корреляции потоков релятивистских электронов со скоростью солнечного ветра соответствует периоду перестройки структуры межпланетного магнитного поля с двухсекторной на четырехсекторную и четырехсекторной структуре межпланетного магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-02-92004-ННС-а и 07-02-00147-а).

Список литературы

1. Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J. // J. Geophys. Res. 1968. **73**. P. 5673.
2. Вакулов П.В., Коврыгина Л.М., Минеев Ю.В., Тверская Л.В. // Геомагнетизм и аэрномия. 1975. **15**, № 6. С. 1028.
3. Li X., Baker D.N., Temerin M. et al. // J. Geophys. Res. A. 1997. **102**. P. 14; 123.
4. Li X., Baker D.N., Temerin M. et al. // Space Weather. 2005. **3**. S. 04001. doi:10.1029/2004SW000105.
5. Кузнецов С.Н., Тверская Л.В. Модель космоса. Т. I. Физические условия в космическом пространстве. Гл. 3.4. Радиационные пояса. М., 2007.
6. Мягкова И.Н., Романова Н.В., Пилипенко В.А. и др. // Тр. ежегод. конф. «Солнечная и солнечно-земная физика». 7–12 июля 2008. СПб.; Пулков. С. 251.
7. Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. // Косм. иссл. 2004. **42**, № 5. С. 509.
8. Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. **45**, № 1. С. 1.
9. Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др. // Астрон. вестн. 2007. **41**, № 4. С. 338.
10. Kuznetsov S.N., Myagkova I.N. // The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling. Geophysical Monograph. 2005. **155**. P. 121.
11. Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P. et al. // Adv. Sp. Res. 2002. **30**, P. 1857.
12. GOES-10, POES, *Kp* data at WEB <http://www.swpc.noaa.gov>
13. Hoeksema J.T., Wilcox J.M., Scherrer P.H. // J. Geophys. Res. A. 1982. **87**, N 12. P. 10331.
14. Veselovsky I.S., Dmitriev A.V., Zhitnik I.A. et al. // Solar System Research. 2005. **39**. P. 169.
15. Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. **47**, № 1. С. 27.
16. Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Персианцев И.Г. // Солнечно-земная физика. 2008. **12**, № 1. С. 105.

Relativistic electron fluxes dynamics in the near-Earth space during 2001-2005

I. N. Myagkova^a, A. V. Bogomolov, Yu. S. Shugai

D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^airina@srd.sinp.msu.ru.

Data of relativistic electron fluxes (1.5–3 MeV) measured at altitudes 360–500 km onboard CORONAS-F satellite are presented. It is shown that significant increase of monthly-averaged fluxes of these particles was observed in the outer Earth's Radiation Belt since August, 2001 till September, 2003. It was also found that in the time period since August, 2001 till July, 2004 the monthly-averaged fluxes of the outer Earth's Radiation Belt's relativistic electrons strongly correlate with the month-averaged values of the solar wind and *Kp* index. This correlation broke after July, 2004. Possible reasons of the founded regularities are discussed.

Keywords: electrons, Earth's radiation belt, solar wind.

PACS: 92.60.hw, 94.30.Xy, 96.60.Vg.

Received 29 December 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2010).

Сведения об авторах

1. Мягкова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-44-87, e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.
2. Богомолов Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: aabboogg@rambler.ru.
3. Шугай Юлия Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-46-19, e-mail: jshugai@srd.sinp.msu.ru.