

УДК 550.385.4

О ПИТЧ-УГЛОВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ

© 2009 г. Е. А. Муравьева

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

Поступила в редакцию 17.07.2008 г.

PACS: 94.30.Xy, 94.30.Lg

Радиационные пояса Земли во время сильных магнитных бурь претерпевают значительные изменения: во внешнем электронном поясе появляются свежееускоренные потоки субрелятивистских и релятивистских энергий, в протонный пояс захватываются солнечные протоны с энергией 1–20 МэВ [1]. Поскольку измерения этих избыточных потоков электронов и протонов на $L < 6$ были сделаны, за редким исключением, на низковысотных спутниках, их ПУР неизвестно. Вместе с тем, эта характеристика важна как для понимания физики процессов, происходящих в радиационных поясах после магнитных бурь, так и для оценки прикладных последствий для космической погоды.

Магнитная буря 22–30.VII.2004 года привела к значительному росту (более чем на два порядка) потоков протонов с энергией 1–15 МэВ и электронов 0.3–3.0 МэВ в радиационных поясах на $L > 2.5$. Первые результаты анализа динамики частиц во время бури и последующих изменений во времени были опубликованы в [2, 3]. Измерения проводились спектрометрами заряженных частиц на двух низковысотных спутниках *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1*, оба с полярной орбитой с высотой 500 и 1000 км соответственно. При анализе был отмечен спад в интенсивности энергичных частиц во всех каналах телескопа *КОРОНАС-Ф* в сентябре 2004 г., который нельзя было отнести за счет естественных вариаций в поясе, так как аналогичного провала детектор на ИСЗ *SERVIS-1* не обнаружил (рис. 1). Было сделано предположение о влиянии ориентации детектора на темп счета, что возможно при анизотропном ПУР частиц в магнитосферной ловушке. Проведенные расчеты не только подтвердили правильность этого предположения, но и позволили определить характер ПУР свежеезахваченных частиц.

Описание эксперимента. ИСЗ *КОРОНАС-Ф* работал с 30.VII.2001 г. по декабрь 2005 г. Орбита спутника – полярная, практически круговая, с наклоном $\sim 82.5^\circ$. Высота орбиты – 500 км в начальный период работы, и постепенно уменьша-

лась, достигнув к 2005 г. ~ 350 км. Спектрометр МКЛ, установленный на ИСЗ *КОРОНАС-Ф*, состоял из двух полупроводниковых детекторов толщиной 0.05 мм и 2.0 мм и CsI кристалла толщиной 1.0 см. Последний был окружен пластическим сцинтиллятором толщиной 0.5 см, включенным на антисовпадения [4]. Регистрировались электроны от 0.3 до 12 МэВ и протоны от 1 до 90 МэВ в различных энергетических диапазонах. В настоящей работе использовались данные о потоках электронов с энергиями 0.3–0.6, 1.5–3 и 3–6 МэВ и протонов в канале 1–5 МэВ.

Апертура телескопа составляла $\sim 23^\circ$. Вследствие прецессии орбиты спутника, угол наклона детектора заряженных частиц относительно силовой линии магнитного поля Земли изменялся, что позволило нам определить вид ПУР частиц. Угол наклона детектора (ψ) изменялся от 0 до 180° с квазипериодом около 6 месяцев.

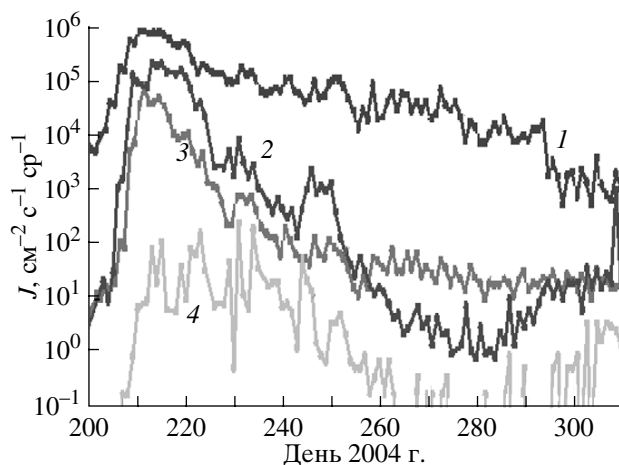


Рис. 1. Потоки электронов на $L = 3$, измеренные детекторами на ИСЗ *КОРОНАС-Ф* и ИСЗ *SERVIS-1* в июле–октябре 2004 г.

1 – *SERVIS-1*, $e = 0.3\text{--}1.7$ МэВ; 2 – *КОРОНАС-Ф*, $e = 0.3\text{--}0.6$ МэВ; 3 – *SERVIS-1*, $e = 1.7\text{--}3.4$ МэВ; 4 – *КОРОНАС-Ф*, $e = 1.5\text{--}3.0$ МэВ.

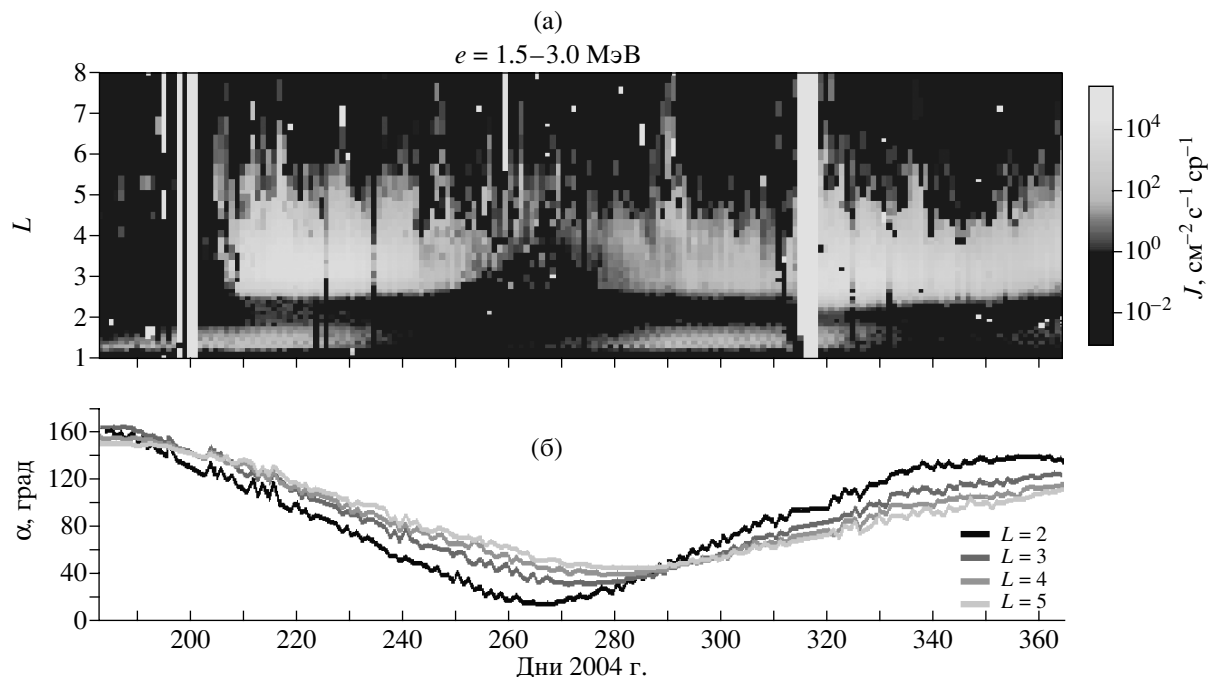


Рис. 2. а) Гистограмма динамики широтного распределения потоков электронов в период июль–декабрь 2004 г. из-меренных детектором на ИСЗ *КОРОНАС-Ф* при пролете спутника через область Южно-Атлантической аномалии; б) – ориентация детектора (угол наклона детектора к силовой линии) на $L = 2, 3, 4, 5$.

Провал в темпе счета электронных и протонных каналов телескопа в сентябре 2004 г. наблюдался, когда поле зрения детектора было направлено ближе к направлению магнитной силовой линии. Это утверждение иллюстрируют рис. 2а, 2б, где приводится гистограмма темпа счета электронов в канале 1.5–3 МэВ и результаты расчета угла наклона телескопа по данным штатной телеметрии спутника. Видно, что амплитуда эффекта спада интенсивности больше на малых расстояниях от Земли в соответствии с характером изменения угла наклона детектора. Падение темпа счета при повороте телескопа относительно силовой линии свидетельствует о захваченном характере ПУР частиц. Представляет несомненный интерес определить функцию ПУР более точно.

Результаты расчета питч-углового распределения частиц в магнитосферной ловушке. ПУР частиц задавалось в виде

$$p_{\text{pitch}}(\alpha) = \frac{dJ}{d\alpha}(\alpha) = \sin^n(\alpha),$$

где α – питч угол, и n – искомый показатель степени нормального ПУР, зависящий от типа и энергии частиц и расстояния дрейфовой орбиты от центра Земли (изотропное распределение соответствует показателю $n = 1$).

Поток частиц, регистрируемый детектором при данной ориентации, $P(\psi)$, определяется по формуле

$$P(\psi) = \int_0^{90^\circ} d\beta \sin\beta p_{\text{det}}(\beta) \int_0^{360^\circ} d\phi \frac{P_{\text{pitch}}(\alpha(\psi, \beta, \phi))}{\sin\alpha(\psi, \beta, \phi)}, \quad (1)$$

где ψ – угол между осью детектора и магнитным полем, β – угол между направлением движения частицы и осью детектора, ϕ – угол между плоскостями {направление движения частицы; ось детектора} и {магнитное поле; ось детектора}, $\alpha(\psi, \beta, \phi) = \arccos(\cos\phi\cos\beta + \sin\psi\sin\beta\cos\phi)$ (см. рис. 3).

Задавая значения $\psi(L, t)$, вычисленные по данным о траектории и ориентации спутника в период с июля по октябрь 2004 г., мы изменяли значения показателя n , добиваясь согласия расчетной вариации темпа счета с измеренным темпом счета детектора. Результаты сравнения для канала электронов с энергией 0.3–0.6 МэВ на $L = 3$ приведены на рис. 4. ПУР электронов в данном случае описывается выражением (1) с показателем степени $n = 15$ –20.

Аналогичным образом были найдены значения n для младших энергетических каналов электронов на L от 1.2 до 3 и канала протонов 1–5 МэВ (потоки протонов с энергией больше 12 МэВ к этому времени упали до фонового уровня).

Оценка показателя анизотропии n показывает, что для всех рассмотренных энергетических каналов и диапазонов L значение n не меньше 5. Во внут-

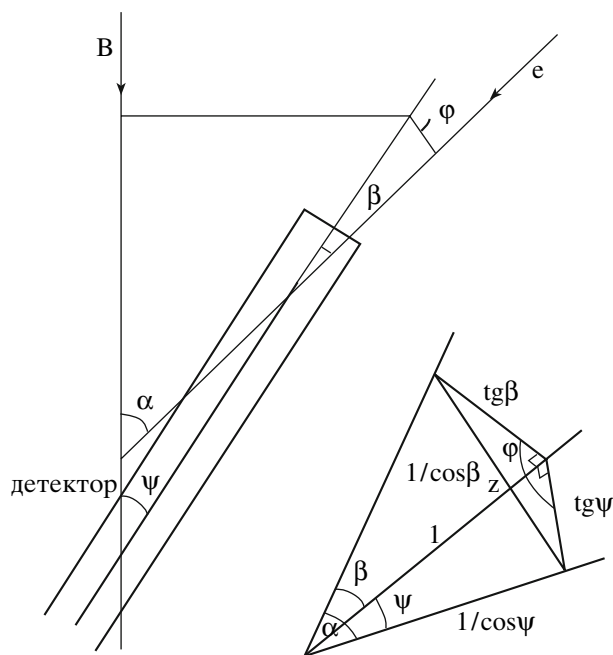


Рис. 3. Схема расчета потока частиц, регистрируемого детектором.

реннем поясе значение n меньше и находится в пределах 5–15 для электронов в каналах 0.3–0.6 МэВ и 1.5–3 МэВ. Во внешнем поясе значение как правило, больше, $n > 15$ для электронов 0.3–0.6 МэВ, может находиться в пределах 10–15 для электронов 1.5–3 МэВ и может находиться в пределах от 5 до 20 для электронов 3–6 МэВ. Отчетливой зависимости от энергии электронов не обнаружено. В канале протонов 1–5 МэВ показатель n может находиться в пределах 2–6 на $L < 2.2$.

Обсуждение результатов и выводы. В спокойное время энергичные электроны радиационных поясов устойчиво захвачены, показатель степени n составляет для электронов от 2 на $L = 5$ до 5.5 на $L = 3$ [5]. В протонном поясе наблюдается захваченное ПУР, которое в возмущенное время трансформируется в ПУР с плоским распределением вне конуса потерь или в ПУР типа “head and shoulders” – плоское на средних питч-углах с выраженным максимумом вблизи 90° [6]. Исходное распределение протонов солнечных космических лучей, которые дают основной вклад в послебуревую протонную популяцию, изотропно.

Во время магнитных бурь происходит перестройка магнитосферы, которая может приводить как к росту поперечной энергии частиц (бетатронное ускорение), так и продольной (механизм Ферми), поэтому начальное ПУР свежееускоренных частиц может принимать различную форму в зависимости от конкретной пространственно-временной динамики магнитосферы и исходной, добуревой, функции распределения частиц.

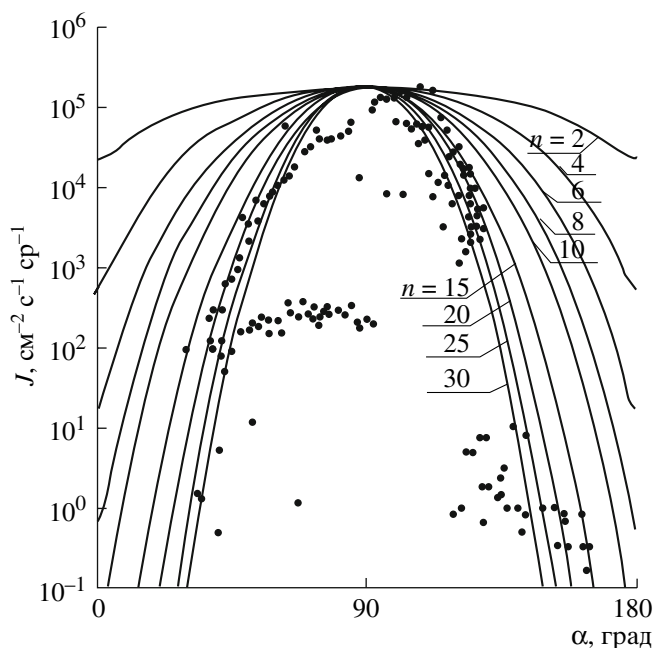


Рис. 4. Зависимость темпа счета детектора от его ориентации для электронов 0.3–0.6 МэВ (точки). Расчетные значения темпа счета детектора при заданном ПУР для различных n .

Можно ожидать, что процессы ускорения в сочетании с питч-угловой диффузией частиц приведут к захваченному распределению, однако как скоро это распределение установится, и насколько велика будет степень анизотропии – априори неизвестно.

Результаты настоящей работы показывают, что анизотропное распределение устанавливается быстро, не дольше, чем за 10–20 суток, и что степень анизотропии велика, такая же, что и у стабильного радиационного пояса.

Следует отметить, что использованная методика имеет некоторые ограничения. Во-первых, форма ПУР может иметь более сложный характер, чем принятый при расчетах. Во-вторых, форма спектра и степень анизотропии могут меняться во времени, что здесь не учитывалось.

Тем не менее, результаты данной работы важны не только для понимания физических процессов релаксации радиационных поясов после сильных магнитных бурь, но и для учета эффектов космической погоды, так как существенно повышенные потоки энергичных электронов (“киллеров”) остаются в магнитосфере длительное время, десятки суток и месяцы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе временного хода потоков энергичных электронов и протонов на спутниках КОРОНАС-Ф и SERVIS-1 было обнаружено расхождение характера спада интенсивности в опре-

деленные интервалы времени. Было предложено следующее объяснение эффекта: изменение угла наклона узконаправленного детектора частиц *КОРОНАС-Ф* по отношению к вектору магнитного поля может привести к модуляции темпа счета при анизотропном ПУР частиц в магнитосферной ловушке.

Наклон угла зрения детектора по отношению к силовой линии магнитного поля был рассчитан по данным о траектории спутника и модели магнитного поля IGRF за вторую половину 2004 года.

С учетом апертуры детектора была рассчитана зависимость темпа счета от угла наклона детектора при разных предположениях о ПУР распределения частиц. В качестве критерия правильности предположения привлекалось подобие скорректированного темпа счета детекторов *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1*.

Было показано, что и электроны и протоны в магнитосферной ловушке имеют захваченное распределение с высоким показателем степени синусоиды: $n \sim 5-20$ на L от 2.5 до 4.5 для электронов и $n \sim 2-6$ на $L < 2.2$ для протонов в широком диапазоне энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н. Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47. № 2. С. 187.
2. Lazutin L., Muravieva E., Hasebe N., et al. Comparative analysis of the energetic electron and solar proton dynamics during strong magnetic storms // Proceedings of the 31st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, 26–29 February, 2008.
3. Hasebe N., Sukurai K., Hareyama M. et al. Variations of the radiation belts energetic particles after the July 22–30, 2004 magnetic storms // Proceedings of the 31st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, 26–29 February, 2008.
4. Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Y.V. CORONAS-F satellite: Tasks for study of particle acceleration // Advances in Space Research. 2002. V. 30. № 7. P. 1857.
5. Thorne R.M., O'Brien T.P., Shprits Y.Y., et al. Timescale for MeV electron microburst loss during geomagnetic storms // J. Geophysical Research: 2005. V. 110, a09202. doi:10.1029/2004ja010882.
6. Biryukov A.S., Ivanova T.A., Kovrygina L.M., et al. Boundary of solar cosmic ray penetration into the magnetosphere according to data of "Interkosmos-17" and "Cosmos-900" // Acta Phys. Slov. 1984. V. 34. № 2–3. P. 153.