

ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА НИЗКООРБИТЕЛЬНОМ СПУТНИКЕ «КОРОНАС- ФОТОН» ПО ДАННЫМ ПРИБОРОВ СТЭП-Ф И SPHINX

А.В. Дудник^{1,2}, Я. Сильвестер³, П. Подгурски³

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ)

² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
Министерства образования и науки Украины (ХНУ им. В.Н. Каразина)

³ Отделение физики Солнца, Центр космических исследований
Польской академии наук, Польша (ЦКИ ПАН)

Солнечный рентгеновский фотометр SphinX как регистратор частиц высоких энергий

С целью исследования распределений заряженных частиц высоких энергий под радиационными поясами Земли на борту низкоорбитального космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон» был установлен спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф разработки и изготовления ХНУ им. В.Н. Каразина [1]. Благодаря значительному геометрическому фактору телескопа, высокому соотношению полезного сигнала к шуму полупроводниковых детекторов и некоторым другим характеристикам прибора были получены новые научные результаты [2].

В составе комплекса научной аппаратуры КА «КОРОНАС-Фотон» находился также солнечный фотометр в рентгеновском диапазоне SphinX разработки Отделения физики Солнца ЦКИ ПАН [3]. В процессе обработки данных было обнаружено, что темпы счета датчиков спектрофотометра в старших энергетических каналах отличны от нуля даже в ночное время. Скорость счета резко усиливалась при прохождении спутником областей Бразильской магнитной аномалии (БМА) и радиационных поясов (РП), что свидетельствовало о регистрации прибором SphinX частиц высоких энергий. Блок детекторов СТЭП-ФД прибора СТЭП-Ф был расположен в непосредственной близости от прибора SphinX, что позволило провести совместный анализ данных энергетического канала регистрации частиц прибора SphinX и каналов регистрации электронов и протонов промежуточных энергий прибора СТЭП-Ф.

Датчиками рентгеновского спектрофотометра служили 4 независимых друг от друга в процессе

обработки информации кремниевых PIN фото-диода, каждый толщиной 500 мкм, но разной активной площади регистрации. Детекторы были защищены бериллиевыми фольгами толщиной 12,5 мкм от прямого ультрафиолетового излучения Солнца. Дополнительно детектор *Det2* с активной площадью регистрации $S_2 = 0,111 \text{ см}^2$ был закрыт двойной пластиной из тантала общей толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью $S_{2o} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ см}^2$ для регистрации рентгеновских всплесков от мощных солнечных вспышек. Энергетическое разрешение аппаратуры составляло около 0,4 кэВ во всем диапазоне регистрации $\Delta E = 0\text{—}15 \text{ кэВ}$, распределенном по 256 каналам спектрометрических аналого-цифровых преобразователей. При этом минимальный энергетический порог регистрации сигналов, поступающих от детектора *Det1* с активной площадью $S_1 = 0,215 \text{ см}^2$, был выставлен на уровне 1,1 кэВ. Такая же характеристика для детектора *Det2* составила 0,85 кэВ. Ось угла зрения прибора направлена вдоль оси OZ космического аппарата, стабилизированной во время проведения эксперимента по направлению на Солнце. Растворы углов зрения *Det1* и *Det2* составили, соответственно, $1,94 \times 1,94^\circ$ и $1,72 \times 1,72^\circ$. В ходе анализа использовались данные загрузок 254-го и 255-го энергетических каналов спектрометров.

Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф включал в себя блок детекторов СТЭП-ФД и блок обработки цифровой информации СТЭП-ФЭ, находившийся внутри герметического отсека. Детекторная головка блока детекторов СТЭП-ФД содержала 2 идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора D1 и D2 и 2 сцинтилляцион-

ных детектора на основе монокристаллов CsI (Tl). Вспышки люминесценции в сцинтилляторах регистрировались кремниевыми фотодиодами большой площади в детекторном слое D3 и вакуумным фотоэлектронным умножителем в детекторе D4. Последний детектор, с учетом толщин находившихся над ним детекторов D3 (13 мм CsI(Tl)) и детекторов D1 и D2 (760 мкм), а также конструкционных материалов из алюминия, регистрировал вторичные γ -кванты промежуточных энергий от взаимодействия первичных электронов с 3 слоями детекторов и их держателями. Общий угол зрения телескопа составлял $108 \times 108^\circ$ для низких энергий частиц и $98 \times 98^\circ$ для высоких энергий. Эффективные площади каждого из полупроводниковых детекторов — 17 см², сцинтилляционных кристаллических детекторов — 36 и 49 см², соответственно. В таблице представлены некоторые характеристики детекторов и энергетических диапазонов приборов СТЭП-Ф и SphinX, используемые в ходе совместного анализа данных.

Регистрация смешанной компоненты частиц прибором SphinX

С целью определения энергетических диапазонов частиц, регистрируемых датчиками *Det1* и *Det2* прибора SphinX, был проведен совместный анализ данных в окрестности слабой геомагнитной бури ($D_{st} = -26$ нТ) 8 мая 2009 г. [4]. Обнаружено наличие откликов датчиков *Det1* и *Det2* на прохождение космического аппарата через РП и БМА, в целом совпадающее с возрастаниями потоков электронов в каналах прибора СТЭП-Ф. Загрузки датчика *Det1* были практически всегда выше загрузок датчика *Det2* в ~ 5 –10 раз. Исключением явилась область БМА, где темп счета обоих датчиков был почти одина-

ков, а вблизи центра БМА интенсивность счета в канале *Det2* становилась даже больше интенсивности, чем в канале *Det1*. Т. е. показания датчиков оказались чувствительными к изменению спектра первичных частиц в различных областях внутренней магнитосферы. Высокие темпы счета обоих детекторов в очень узких полях зрения, несоответствие их отношения разнице в активных площадях указывало на вклад дополнительной компоненты в загрузки каналов, а именно — вторичных γ -квантов низких энергий, генерированных в результате взаимодействия первичных электронов с конструкционными материалами детекторной головки, прибора ТЕСИС и самого КА. Таким образом, датчики *Det1* и *Det2* прибора SphinX регистрировали смешанную компоненту, состоящую из электронов низких энергий и вторичного γ -излучения, рождаемого электронами более высоких энергий. Это позволило ввести понятие эффективной пороговой энергии регистрации электронов E_{thr1} и E_{thr2} детекторами *Det1* и *Det2*, соответственно, которые могут изменяться в зависимости от формы энергетического спектра первичных электронов.

Эффективные энергии захваченных электронов, регистрируемые рентгеновским спектрофотометром внутри БМА

Захваченные электроны на высоте полета КА «КОРОНАС-Фотон» регистрировались внутри области БМА. Для анализа распределений потоков частиц по L-оболочкам были выбраны 5-е с начала суток витки восходящих узлов орбиты КА. На рис. 1 в качестве примера показаны распределения плотностей потоков частиц для 4-х каналов прибора СТЭП-Ф и обоих каналов прибора SphinX 11 мая 2009 г. Отчетливо заметно изменение соотношений в нагрузках каналов при-

Наименования и характеристики каналов регистрации и соответствующих детекторов приборов SphinX и СТЭП-Ф

Характеристика прибора	SphinX		СТЭП-Ф			
	<i>Det1</i>	<i>Det2</i>	D1e	D1p	D2e	D4e
Наименование детектора/канала	<i>Det1</i>	<i>Det2</i>	D1e	D1p	D2e	D4e
Энергетический диапазон регистрации, МэВ	—	—	Электроны $\Delta E_e = 0,18$ — $0,51$ + протоны $\Delta E_p = 3,5$ — $3,7$	Протоны $\Delta E_p = 3,7$ — $7,4$ + электроны $\Delta E_e = 0,55$ — $0,95$	электроны $\Delta E_e = 0,35$ — $0,95$	Вторичное γ -излучение от электронов с $E_e \geq 0,6$ – $0,8$
Тип детектора	Si PIN	Si PIN	Si PIN	Si PIN	Si PIN	CsI(Tl) + вакуумный ФЭУ
Толщина детектора, мкм	500	500	380	380	380	5000
Активная площадь, см ²	0,215*	0,111*	17	17	17	49

* Активная площадь детектора для регистрации частиц ограничена внутренним коллиматором. Для регистрации рентгеновского излучения активная площадь имеет другую величину из-за наличия внешнего коллиматора.

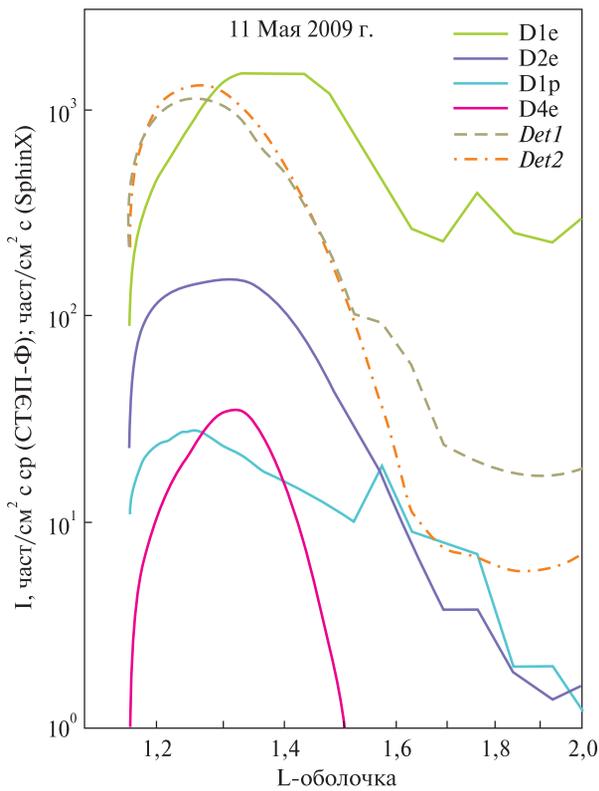


Рис. 1. Распределения интенсивностей частиц по L-оболочкам внутри БМА на 5-ом с начала суток витке восходящего узла орбиты КА 11 мая 2009 г. Потоки частиц для прибора SphinX не нормированы на телесный угол

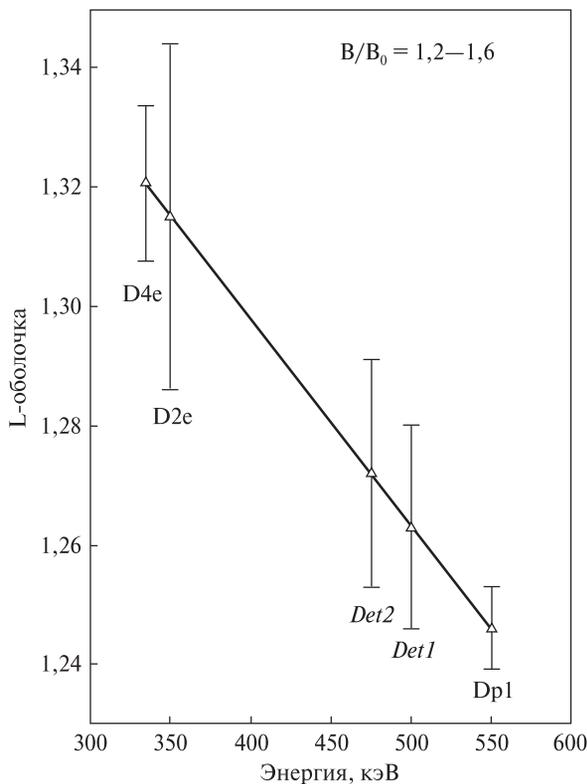


Рис. 2. Зависимость значений L-оболочек с максимальными значениями потоков частиц в БМА от их энергии для восходящих узлов 5-х витков орбиты КА в период с 1 по 14 мая 2009 г.

бора SphinX при переходе от значений $L \sim 1,25$ до $L \sim 1,85$. Значительное уменьшение темпов счета в канале *Det2* на больших L-оболочках показывает изменение характера энергетического спектра первичных электронов в сторону преобладания низких энергий. Характер хода интенсивности в канале *D1e* при изменении L-оболочек от $L \sim 1,5$ до $L \sim 1,9$, резкий спад потоков электронов в каналах *D2e* и *D1p* в этих пределах параметра Мак-Илвайна и исчезновение загрузок в канале *D4e*, отвечающем за регистрацию вторичного γ -излучения, подтверждают изменение формы энергетического спектра первичных электронов.

Усредненные за 14 дней величины L-оболочек, на которых были зарегистрированы максимумы интенсивностей частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г. для 5 каналов обоих приборов, позволили определить значения E_{thr1} и E_{thr2} для датчиков *Det1* и *Det2* прибора SphinX, а также значение эффективной энергии регистрации E_{D4e} детектора *D4e* прибора СТЭП-Ф. При этом отношения магнитного поля Земли к магнитному полю на геомагнитном экваторе для рассматриваемого периода принимали значения $V/B_0 \approx 1,2-1,6$. На рис. 2 представлен график зависимости L-оболочек, на которых наблюдались максимумы потоков частиц, от энергии электронов с привязкой к каналам *D2e* и *D1p* прибора СТЭП-Ф. Из графика видно, что значения E_{thr1} и E_{thr2} очень близки друг к другу и составляют ~ 500 кэВ для *Det1* и 475 кэВ для *Det2*. Однако разброс этих значений достаточно большой и связан не только с малой статистикой (14 дней), но и ежесуточным смещением КА по долготе при фиксированной широте относительно первоначальной точки измерений, в связи с чем наблюдаемый спектр электронов трансформируется от дня к дню.

Из этого же графика была определена величина $E_{D4e} \approx 335$ кэВ, однако ее значение также испытывает изменения ото дня к дню и варьирует от 230 кэВ до 350 кэВ в рассматриваемый период с 1 по 14 мая. Более низкие значения энергии регистрации электронов последним детектором в телескопической системе блока детекторов СТЭП-ФД в сравнении с E_{thr} и E_{thr2} прибора SphinX обусловлены высокой эффективностью регистрации сцинтилляционным детектором, его большой активной площадью и очень низкими шумами фотоэлектронного умножителя.

Профили радиационных поясов по данным обоих приборов вне области БМА

Сравнение распределений интенсивностей в каналах регистрации обоих приборов вне обла-

ти БМА показало несовпадение появлений максимумов темпов счета в РП как во времени, так и по L-оболочкам практически на протяжении всего периода. Исключением были дни максимума и начальной фазы восстановления слабой геомагнитной бури 8–10 мая, когда во внешнем РП относительные распределения по L-оболочкам были очень похожи. На рис. 3 показаны распределения интенсивностей частиц в каналах регистрации обоих приборов в северном полушарии 8 мая (рис. 3, а) и изменений этих распределений в каналах *Det1* и *Det2* прибора SphinX в южном полушарии 3 и 9 мая (рис. 3, б). Рис. 3, а показывает, что прибор СТЭП-Ф регистрировал 3 электронных пояса в 2-х энергетических каналах, причем электроны 3-го дополнительного пояса имеют мягкий энергетический спектр, поскольку их интенсивность при $E \geq 0,55$ МэВ резко падает [5–7].

Прибор SphinX, возможно, также регистрировал внутренние РП, о чем свидетельствует укрупнение хода интенсивности при $L = 1,6$ и ее спад при $2,5 \leq L \leq 2,8$ в канале *Det1*, однако чувствительности прибора было недостаточно для надежной регистрации РП [8]. Второй причиной, по которой не видно в явном виде внутренние РП в обоих каналах, могла быть разница в углах обзора 2-х приборов и, соответственно, наличие узконаправленных потоков электронов, которые попадали в углы обзора в разные временные промежутки. Распределение интенсивностей по L-оболочкам в южном полушарии в 2-х каналах прибора SphinX для 3 и 9 мая 2009 г. показывает (рис. 3, б), что SphinX регистрировал внутренний РП датчиком *Det1* как в магнитоспокойный период, так и на начальной фазе восстановления магнитной бури. Видно также, что темпы счета в канале *Det2* и чувствительность к изменениям потоков значительно ниже, чем в канале *Det1*, что еще раз подтверждает вывод о регистрации этим каналом более высокоэнергетической компоненты в спектре электронов.

Регистрация трех электронных радиационных поясов Земли прибором СТЭП-Ф

Особенностью орбиты КА «КОРОНАС-Фотон» было его пересечение одних и тех же областей околоземного пространства через каждые 15 витков, которые совершались в течение одних суток. Поскольку распределение потоков частиц высоких энергий внутри магнитосферы зависит от долготы, широты и высоты КА, то правомерно сравнить интенсивности в одних и тех же или близких по координатам точках пространства в

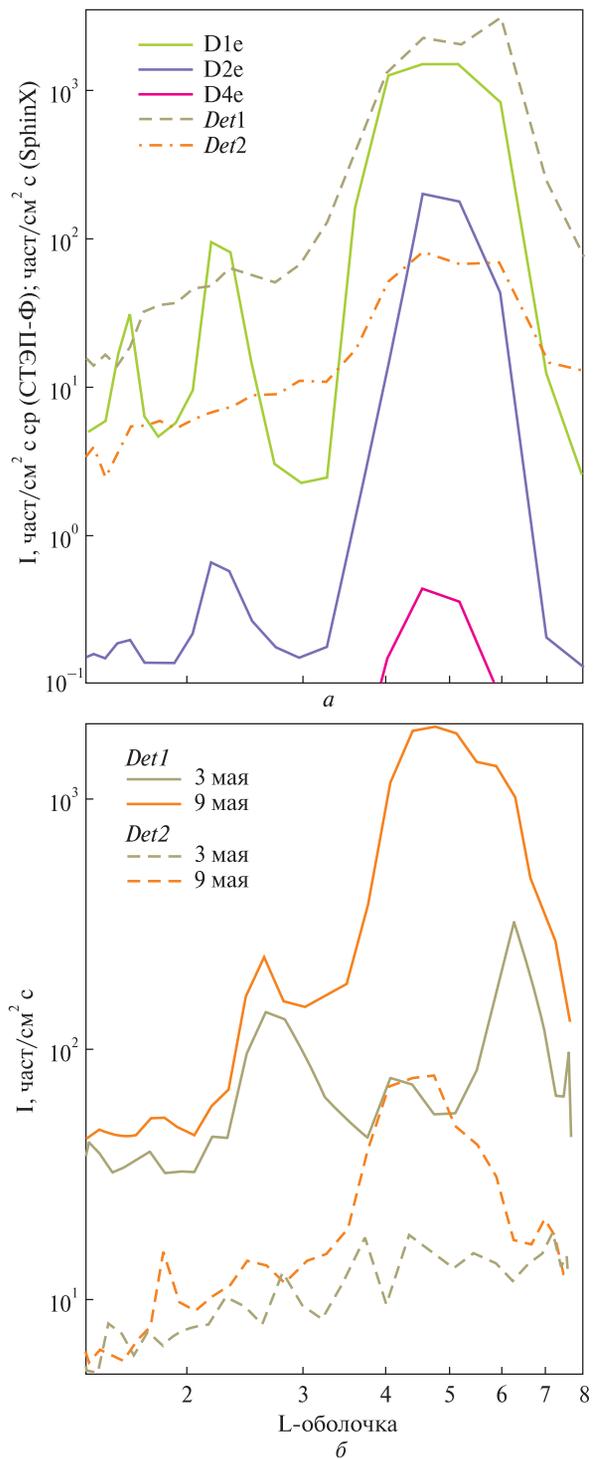


Рис. 3. а — распределение по L-оболочкам потоков частиц в РП в северном полушарии на 9-ом с начала суток восходящем узле орбиты КА в 5 каналах регистрации обоих приборов 8 мая; б — распределение по L-оболочкам потоков частиц в РП в южном полушарии на 1-ом нисходящем узле орбиты КА в каналах *Det1* и *Det2* 3 и 9 мая 2009 г.

разные промежутки времени. Ввиду орбиты КА, близкой к круговой, эти требования ограничиваются двумя параметрами — широтой и долготой. В рассматриваемом случае одни и те же точки

пространства, куда он попадает периодически, наступают через 24 часа. При этом сдвиг по долготу при фиксированной широте составляет не более $2,5^\circ$. Объединение всех данных в течение одного и того же витка орбиты КА дало возможность проследить динамику изменений потоков электронов. На рис. 4 показан временной ход плотности потока электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18-0,51$ МэВ в период с 1 по 31 мая 2009 г. на 9-ом с начала суток (в мировом времени UT) витке орбиты спутника для восходящих узлов с 1-й по 48-ю минуты полета КА. При этом в качестве 0-й минуты начала движения КА считалась точка достижения спутником максимальной широты в южном полушарии. Проекция 9-х витков орбиты КА на поверхность Земли далеко отстояли от зоны Бразильской магнитной аномалии.

Рис. 4 демонстрирует регистрацию дополнительного внутреннего радиационного пояса Земли на 14-й и 34-й минутах полета КА в течение рассматриваемого периода, что соответствует параметру Мак-Илвайна $L \approx 1,6$; внутреннего пояса Ван-Аллена ($L \approx 2,8$); внешнего радиационного пояса в обоих полушариях Земли. Заметно усиление интенсивности частиц во всех трех поясах в окрестности слабой геомагнитной бури 8 мая 2009 г. Сравнительный анализ потоков, зарегистрированных на 9-х ежесуточных витках в северном полушарии в максимумах числа час-

тиц поясов, показал, что соотношение интенсивностей в дополнительном и основном поясах превышает 1 в 25 случаях из 31 для энергий электронов $\Delta E = 0,18-0,51$ МэВ, и меньше 1 в 26 случаях из 31 для энергий электронов $\Delta E = 0,35-0,95$ МэВ. Это говорит в пользу того, что энергетические спектры в обоих внутренних поясах сильно отличаются: в поясе Ван-Аллена наблюдается более жесткий спектр в сравнении с дополнительным спорадически появляющимся поясом.

Дополнительный пояс наблюдался не только в зонах, далеко отстоящих от области БМА, но и внутри самой магнитной аномалии. На рис. 5 показано распределение потоков частиц по L-оболочкам в области БМА и внешнем радиационном поясе южного полушария Земли в 10 энергетических каналах детектора D3 и канале регистрации детектора D4 9 августа 2009 г. Хотя приближение L—В координат не совсем применимо для области БМА, видно структурирование потоков частиц на две зоны внутри области БМА: зону с более широким распределением по L, соответствующую внутреннему поясу Ван-Аллена, и зону с узким распределением для малых значений L-координаты. Такое двухзональное распределение повторяется для всех 10 энергетических диапазонов канала регистрации детектора D3, однако не характерно для канала регистрации датчика D4.

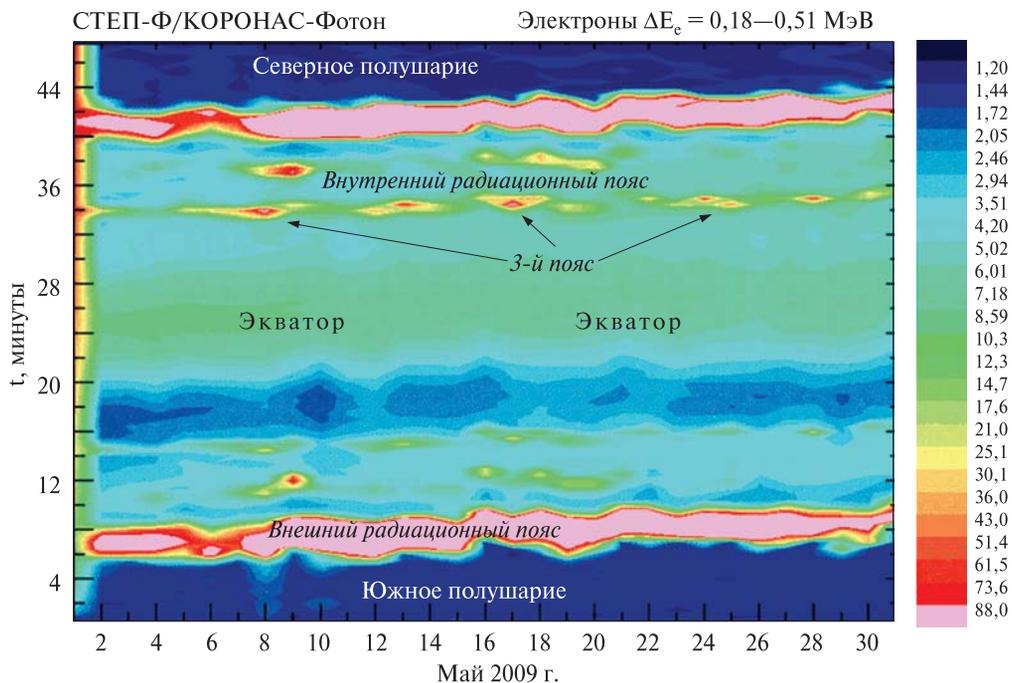


Рис. 4. Временной ход спектральной плотности потока частиц канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18-0,51$ МэВ в период с 1 по 31 мая 2009 г. на восходящих узлах одного и того же, 9-го с начала суток витка орбиты КА «КОРОНАС-Фотон»

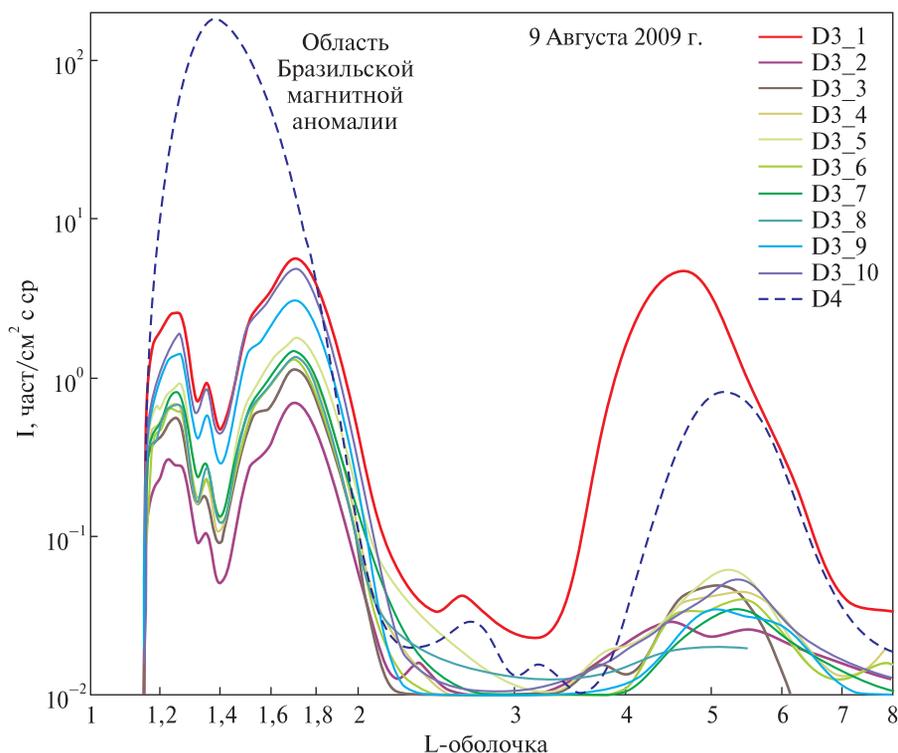


Рис. 5. Распределение потоков частиц по L-оболочкам в области БМА и внешнем радиационном поясе южного полушария Земли в 10 энергетических каналах детектора D3 и канале регистрации детектора D4 прибора СТЭП-Ф 9 августа 2009 г.

Как указывалось выше, $E_{D4e} \approx 335$ кэВ; энергетический спектр электронов в дополнительном поясе является быстро спадающим с увеличением энергии. Этим может объясняться отсутствие двухзонной структуры в распределении потоков частиц в канале датчика D4. Одновременно можно сделать вывод о том, что в 10 энергетических каналах детектора D3 накапливалась информация о числе зарегистрированных вторичных гамма-квантов, генерированных первичными электронами с энергиями $E_e \leq 0,3$ МэВ. Исключением был энергетический канал D3_1, непосредственно регистрировавший электроны, прошедшие второй кремниевый матричный детектор D2, что видно из распределения потоков частиц во внешнем поясе. Ввиду того, что энергетический спектр электронов становится более спадающим во внешнем поясе в сравнении со спектром внутри БМА, число зарегистрированных квантов на $L \approx 4-6$ меньше в $\approx 10-100$ раз во всех энергетических диапазонах, как видно из рис. 5.

Радиальная диффузия электронов промежуточных энергий во внешнем радиационном поясе

Поскольку энергетические спектры электронов вне области БМА становятся значительно

мягче, значения эффективных энергий электронов E_{thr1} , E_{thr2} и E_{D4e} для внешнего РП должны быть иными в сравнении с такими же значениями для области БМА. С целью определения значений E_{thr1} , E_{thr2} и E_{D4e} применимы 2 подхода, первый из которых состоит в построении зависимости усредненных значений L-оболочек, на которых наблюдались максимальные значения потоков частиц во внешнем РП, от их энергии. Известно, что чем больше энергия захваченных частиц, тем в более глубоких слоях магнитосферы они дрейфуют от одной зеркальной точки в области полярного овала в северном полушарии к другой точке отражения в южном полушарии, и обратно. Определив значения L-оболочек из данных датчиков *Det1* и *Det2* прибора SphinX, детектора D4 прибора СТЭП-Ф и используя известную зависимость параметра L, на котором регистрируются максимумы интенсивности частиц из данных каналов D1e, D2e и D1p прибора СТЭП-Ф от энергии электронов, можно оценить значения E_{thr1} , E_{thr2} и E_{D4e} .

Второй подход заключается в определении зависимости смещений ΔL L-оболочек, на которых наблюдались максимальные значения потоков электронов в геомагнитно спокойные дни до начала магнитной бури и на фазе ее восстановления. Смещение происходит за счет радиаль-

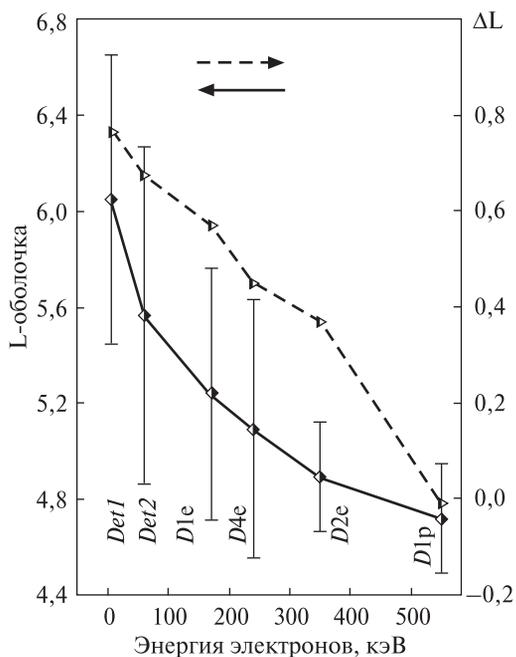


Рис. 6. Зависимость усредненных за период с 1 по 14 мая 2009 г. значений L-оболочек с максимальными потоками частиц во внешнем РП (левая шкала ОУ) от их энергии для восходящих узлов 9-х с начала суток витков в северном полушарии (сплошная линия). Пунктирной линией показана зависимость от энергии электронов наибольших смещений максимальных потоков на величину ΔL (правая шкала ОУ) вглубь магнитосферы в процессе радиальной диффузии во время начальной фазы восстановления магнитной бури 9–11 мая относительно первоначальных положений до ее начала 2–3 мая. Горизонтальные стрелки показывают принадлежность графиков к левой или правой шкале

ной диффузии электронов на скачках магнитного поля Земли во время максимума развития и начальной фазы восстановления бури. Величина смещения ΔL обратно пропорциональна энергии первичных электронов. Определив ΔL из данных *Det1*, *Det2* и *D4* и сопоставив с аналогичными результатами каналов регистрации прибора СТЭП-Ф, можно независимым методом оценить значения E_{thr1} , E_{thr2} и E_{D4e} .

На рис. 6 представлены совмещенные результаты анализа данных, полученных для 9-х с начала суток восходящих узлов орбиты КА в северном полушарии. Значительный разброс значений L-оболочек (левая шкала оси ОУ) обусловлен наличием в рассматриваемый период слабой магнитной бури, и как следствие — смещением ΔL в область меньших значений L из-за радиальной диффузии электронов поперек силовых линий магнитного поля. Статистические ошибки величин ΔL (правая шкала оси ОУ) невозможно определить, поскольку в анализ привлечены данные только одной магнитной бури. Вследствие

этого на графике имеется отрицательное значение $(\Delta L)_6 = -0,01$. Очевидно, применимыми к анализу являются величины ΔL , для которых верно $\Delta L \geq 0,03$.

В итоге, анализ обоих графиков на рис. 6 дает величины $E_{thr1} \approx 5$ кэВ, $E_{thr2} \approx 60$ кэВ и $E_{D4e} \approx 240$ кэВ. Как уже указывалось выше, детектор *Det2* дополнительно закрыт двухслойной танталовой пластиной суммарной толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью $4,9 \times 10^{-3}$ см². При такой толщине защитного слоя вещества с плотностью $\rho = 16,65$ г/см³ и зарядом $Z = 73$ до активного слоя детекторов должны доходить электроны с энергиями $E_e \geq 1,2$ МэВ. Однако, сам защитный слой является хорошей мишенью для генерации вторичного гамма-излучения низких энергий при его облучении первичными электронами высоких энергий.

Тот факт, что величина E_{thr2} для внешнего РП в ≈ 10 раз меньше, чем для БМА, указывает на мягкий характер спектра в РП. Величина E_{thr2} понижается также вследствие прямой регистрации активным слоем фотодиода низкоэнергетических электронов, входящих в открытое окно площадью $4,9 \times 10^{-3}$ см². Вклад электронов прямой регистрации в общую загрузку детектора *Det1* значительно выше, однако наличие очень низкоэнергетических γ -квантов нельзя исключить, исходя из значительных темпов счета в узком поле зрения.

Значения E_{D4e} для БМА и РП не сильно отличаются друг от друга ввиду логики отбора событий в канал *D4e*: запись в этот канал шла лишь в том случае, когда полезные сигналы были одновременно во всех 4-х слоях детекторов телескопической системы блока СТЭП-ФД. Это значит, что электроны, рождающие вторичные γ -кванты в материале сцинтилляционного детектора *D3* или конструкционных материалах детекторной головки, достигают, как минимум, 2-го слоя позиционно-чувствительных кремниевых матричных детекторов. В то же время, уменьшение значения E_{D4e} с ≈ 335 кэВ для БМА до ≈ 240 кэВ для РП также указывает на смягчение характера энергетического спектра в РП, по сравнению с формой спектра в области БМА.

Анизотропные потоки электронов в нижних слоях магнитосферы по данным СТЭП-Ф и SphinX

С целью проверки достоверности предположения, что на высоте полета КА «КОРОНАС-Фотон» в радиационных поясах Земли вне области БМА регистрируются преимущественно анизотропные потоки электронов, были построены

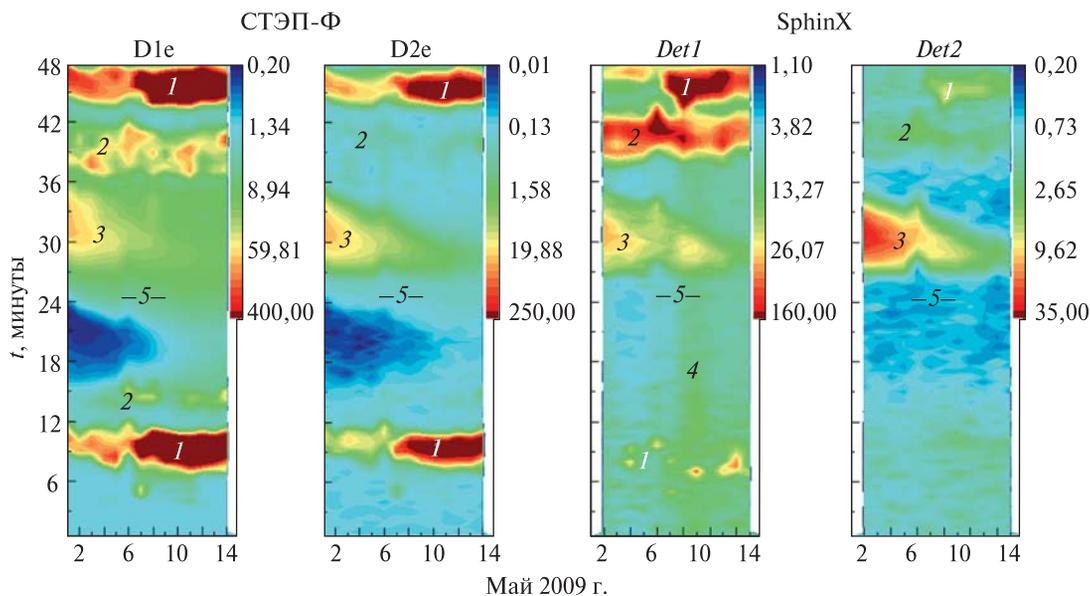


Рис. 7. Потoki частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г. по данным детекторов D1e и D2e прибора СТЭП-Ф и датчиков Det1 и Det2 прибора SphinX на 13-х витках нисходящих узлов орбиты КА. 1 — внешний радиационный пояс; 2 — внутренний радиационный пояс; 3 — периферийная область БМА; 4 — частицы, зарегистрированные датчиком Det1 во время главной фазы геомагнитной бури; 5 — географический экватор

зависимости хода интенсивности частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г. на нисходящих узлах 13-х витков для каналов D1e и D2e прибора СТЭП-Ф и датчиков Det1 и Det2 прибора SphinX.

На рис. 7 время t отсчитывается от момента достижения КА максимальной широты в северном полушарии. Соответственно, спутник пересекал внешний радиационный пояс на ≈ 7 –11-й и ≈ 44 –48-й минутах (зона 1); внутренний радиационный пояс — на ~ 15 и 38–42-й минутах (зона 2); край БМА (зона 3).

Рис. 7 показывает, что оба канала прибора СТЭП-Ф регистрировали изменение потоков электронов внешнего пояса идентично в обоих полушариях, в то время как прибор SphinX почти не регистрировал потоки частиц в северном полушарии. Лишь датчик Det1 наблюдал незначительные превышения фона в отдельные дни рассматриваемого периода из-за меньшей в ~ 10 раз величины E_{thr1} в сравнении с E_{thr2} . Такая асимметрия в реакции датчиков Det1 и Det2 на пересечение одного и того же пояса в разных полушариях говорит, с одной стороны, об узких углах зрения датчиков в сравнении с полем зрения детекторной головки блока СТЭП-ФД. С другой стороны, результатом асимметрии могла быть реакция на узконаправленные пучки электронов и несовпадение углов зрения датчиков Det1 и Det2 с направлением прихода электронов.

Еще одной особенностью явилась значительная разница в показаниях датчиков Det1 и Det2 прибора SphinX при пересечении им

внутреннего и внешнего поясов в южном полушарии Земли, в то время как существенной разницы в показаниях детекторов D1e и D2e прибора СТЭП-Ф не было замечено. Такое поведение объясняется преимущественной регистрацией обоими датчиками рентгеновского спектрофотометра вторичных γ -квантов, имеющих резко спадающий спектр с увеличением энергии. Принимая во внимание, что отклик канала D1e на пересечение внутреннего пояса в южном полушарии был практически незаметным, можно сделать вывод о том, что датчик Det1 уверенно регистрировал γ -кванты, рожденные первичными электронами с энергией, намного меньшей пороговой энергии детектора D1e, т. е. $E_e \ll 180$ кэВ. Этот вывод подтверждается регистрацией датчиком Det1 высыпающихся потоков электронов во время главной фазы геомагнитной бури 8 мая 2009 г. на всех широтах (зона 4), включая экватор (зона 5). Заполнение зазора между поясами, а также области между внешним поясом и границей плазмосферы низкоэнергетичными частицами регистрировалось многократно ранее всенаправленными детекторами. В нашем случае, вследствие достаточно узких углов зрения датчиков рентгеновского спектрофотометра и направленных потоков частиц на высоте 550 км, заполнение зазора между поясами в южном полушарии не наблюдалось.

Наконец, ярко регистрируемая датчиком Det2 область края БМА (зона 3) еще раз подтвердила

существенную разницу в энергетических спектрах электронов в области БМА и в радиационных поясах Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник А.В., Персиков В.К., Залюбовский И.И., Тимакова Т.Г., Курбатов Е.В. и др. Высокочувствительный спектрометр-телескоп высокоэнергетических частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-Фотон // *Астрономический вестник*. — 2011. — Т. 45. — № 3. — С. 219—227.
2. Дудник А.В. Динамика электронов радиационных поясов Земли в мае 2009 г. по наблюдениям с помощью аппаратуры СТЭП-Ф // В сборнике «Результаты космического эксперимента «КОРОНАС-Фотон». Предложения по продолжению программы «Коронас»: научные задачи и аппаратура», труды рабочего совещания. 212С. — Серия «Механика, управление и информатика». — М.: ИКИ РАН. — 2012. — С. 103—125.
3. Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M., Bakala J., Kordylewski Z. et al. SphinX soft X-ray spectrophotometer: science objectives, design and performance // *Solar System Research*. — 2011. — Vol. 45. — No.3. — P. 189—199.
4. Podgorski P., Dudnik O., Sylwester J., Gburek S., Kowalinski M. et al. Joint analysis of SphinX and STEP-F instruments data on magnetospheric electron flux dynamics at low Earth orbit / 39th Scientific Assembly of COSPAR (July 14—22, 2012. Mysore, India) Abstracts. — Panel PSW.3: «Space Weather Data: Observations and Exploitation for Research and Applications». — STW-C-119 PSW.3-0028-12. — P. 112.
5. Дудник А., Подгурски П., Сильвестер Я., Гбурек С., Ковалински М. и др. Рентгеновский спектрофотометр SphinX и спектрометр частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-Фотон — предварительные результаты совместного анализа данных // *Астрономический вестник*. — 2012. — Т. 46. — № 2. — С. 173—183.
6. Dudnik O. Unexpected behavior of subrelativistic electron fluxes under Earth radiation belts / 4th International workshop NEPPA/SOLARIS—2012 (9—12 October 2012, Boulder, Colorado, USA). — Abstract book. — P. 15.
7. Дудник А.В. Наблюдения трех электронных радиационных поясов в магнитосфере Земли по данным прибора СТЭП-Ф на космическом аппарате «КОРОНАС-Фотон» / 12-я Украинская конференция по космическим исследованиям (Евпатория, Крым, 3—7 сентября 2012 г.). Сборник докладов. — С. 70.
8. Dudnik O., Sylwester J., Podgorski P., Gburek S. Radiation belts of the Earth: overview, methods of investigations, recent observations on the CORONAS-Photon spacecraft / Conference “Progress on EUV&X-ray spectroscopy and imaging” (20—22 November 2012, Wroclaw, Poland) Abstract book. — P. 3.