

УДК 52-854:52-72:520.6.05:520.662

## РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР SphinX И СПЕКТРОМЕТР ЧАСТИЦ СТЭП-Ф СПУТНИКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА КОРОНАС-ФОТОН – ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

© 2012 г. А. В. Дудник<sup>1</sup>, П. Подгурски<sup>2</sup>, Я. Сильвестер<sup>2</sup>, С. Гбурек<sup>2</sup>, М. Ковалински<sup>2</sup>, М. Сиарковски<sup>2</sup>, С. Плоциеньяк<sup>2</sup>, Я. Бонкала<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

<sup>2</sup>Центр космических исследований Польской академии наук, Отделение физики Солнца, Вроцлав, Польша

Поступила в редакцию 18.07.2011 г.

Проводится совместный анализ данных, полученных с помощью солнечного рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф в мае 2009 г. в ходе осуществления научного космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН. С целью определения энергий и сортов частиц к анализу записей спектрофотометра привлечены данные об интенсивностях электронов, протонов и вторичного гамма-излучения с прибора СТЭП-Ф, который был расположен в непосредственной близости от прибора SphinX. Указывается на идентичную реакцию обоих приборов на пересечение спутником областей Бразильской магнитной аномалии и радиационных поясов Земли. Показано, что фотодиоды большой площади, служащие датчиками рентгеновского спектрофотометра, надежно регистрируют потоки электронов низких и промежуточных энергий, а также потоки вторичного гамма-излучения от конструкционных материалов детекторных модулей, космической обсерватории ТЕСИС и самого космического аппарата. Динамика потоков электронов, зарегистрированная с помощью прибора SphinX в окрестности слабой геомагнитной бури, дополняет информацию о процессах радиальной диффузии электронов, исследованной с помощью прибора СТЭП-Ф.

### ВВЕДЕНИЕ

Научные приборы на космических аппаратах, предназначенные для изучения разных явлений и объектов, могут основываться на однородных или близких по структуре датчиках. Такие датчики могут откликаться не только на интересующий вид излучения, но и на другие, неожиданные типы, которые могут служить “помехой” для избранного направления исследований. Так, аппаратура АВС, предназначенная для изучения характеристик потоков жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек и установленная на борту низкоорбитального космического аппарата КОРОНАС-Ф (Glyanenko и др., 2009), накопила большое количество информации об изменяющихся скоростях счета в низкоэнергетическом и высокоэнергетическом  $\gamma$ -диапазонах несолнечного происхождения. Распределение темпов счета по географическим координатам Земли отчетливо показало области полярных шапок, радиационных поясов (РП), Бразильской магнитной аномалии (БМА) (Arkhangelskaja и др., 2008). С помощью этой аппаратуры были обнаружены также всплесковые события и квазистационарные экваториальные высыпания разных типов.

Рентгеновский спектрофотометр SphinX разработан и изготовлен Отделением физики Солнца Центра космических исследований Польской академии наук как составная часть комплекса научной аппаратуры “Фотон” космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН (Kotov, 2011). Он предназначен для изучения энергетических спектров рентгеновского излучения Солнца в диапазоне энергий 1.2–15 кэВ. В процессе первичной обработки данных выяснилось, что темпы счета датчиков прибора в старших энергетических каналах отличны от нуля даже в ночное время. Скорость счета резко усиливается при прохождении спутником областей БМА и РП, что свидетельствует о возможной регистрации спектрофотометром частиц высоких энергий.

Блок детекторов СТЭП-ФД спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф, основной задачей которого было изучение динамики потоков высокоэнергетических заряженных частиц, был расположен в непосредственной близости от прибора SphinX. Таким образом, появилась возможность проведения совместного анализа данных из каналов регистрации частиц прибора SphinX и каналов регистрации электронов, протонов и вторичного гамма-излучения прибора

СТЭПФ. Анализ данных с 30-секундным временным разрешением проведен для периода наблюдений с 1 по 14 мая 2009 г.

### РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР SphinX И СПУТНИКОВЫЙ ТЕЛЕСКОП ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ СТЭП-Ф

Датчиками солнечного рентгеновского спектрофотометра SphinX (Sylwester и др., 2008; Gbuhek и др., 2011a; 2011b) служили 4 независимых друг от друга в процессе обработки информации кремниевых PIN фотодиода, каждый толщиной 500 мкм, но разной активной площади регистрации. Фотодиоды были интегрированы в детекторные узлы типа XR-100CR, изготавливаемые фирмой Amptek (<http://www.amptek.com/xr100cr.html>). Активные площади детекторов защищены бериллиевыми фольгами толщиной 12.5 мкм слоями из алюминизированного майлара толщиной 3.8 мкм от прямого ультрафиолетового излучения Солнца. Дополнительно детектор с активной площадью регистрации  $S_2 = 0.111 \text{ см}^2$ , обозначенный далее Det2, закрыт двойной пластиной из тантала общей толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью  $S_{20} = 4.9 \times 10^{-3} \text{ см}^2$  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 с активной площадью  $S_1 = 0.215 \text{ см}^2$ , обозначенного далее Det1, был выставлен на уровне 1.2 кэВ. Такая же характеристика для детектора Det2 составила 0.85 кэВ. Рабочие напряжения обратного смещения для детекторов Det1 и Det2 были выбраны соответственно 130 и 100 В. Ось угла зрения прибора направлена вдоль оси OZ космического аппарата, стабилизированной во время проведения эксперимента по направлению на Солнце. Растворы углов зрения детекторов Det1 и Det2 составили соответственно  $1.94^\circ \times 1.94^\circ$  и  $1.72^\circ \times 1.72^\circ$ . Временное разрешение записи информации, используемой в данной работе, составляло 1 или 5 с в зависимости от уровня солнечной активности. В ходе анализа использовались данные загрузок 254 и 255 энергетических каналов спектрометров.

Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф включал в себя блок детекторов СТЭП-ФД, установленный на внешней площадке космического аппарата, и блок обработки цифровой информации СТЭП-ФЭ, находивший-

ся вместе с другими блоками электроники внутри герметического отсека, заполненного аргонно-воздушной смесью под давлением 1 атм. (Dudnik и др., 2011). Детекторная головка блока детекторов СТЭП-ФД, построенная по принципу телескопической системы, содержала 2 идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора D1 и D2 и 2 сцинтилляционных детектора на основе монокристаллов CsI(Tl), просматриваемых кремниевыми фотодиодами большой площади в детекторном слое D3 и фотоэлектронным умножителем в детекторе D4. Последний детектор, с учетом толщин находившихся над ним детекторов D3 (13 мм CsI(Tl) + 2 мм MgO) и детекторов D1 и D2 (общая толщина 760 мкм), а также конструкционных материалов из алюминия, регистрировал вторичные гамма-кванты низких и промежуточных энергий от взаимодействия первичных электронов с 3-мя слоями детекторов и их держателями. Общий угол зрения телескопа –  $108^\circ \times 108^\circ$  для низких энергий частиц и  $98^\circ \times 98^\circ$  для высоких энергий. Эффективные площади каждого из полупроводниковых детекторов –  $S_1 = S_2 = 17 \text{ см}^2$ , сцинтилляционных кристаллических детекторов –  $S_3 = 36$  и  $S_4 = 49 \text{ см}^2$  соответственно. Информационные кадры, передаваемые с прибора в бортовую систему сбора и регистрации научной информации через каждые 30 с, содержали усредненные полуминутные и 2-секундные данные о сортах, потоках и угловых распределениях частиц. В табл. 1 представлены некоторые характеристики детекторов и энергетических диапазонов приборов СТЭП-Ф и SphinX, используемые в ходе дальнейшего анализа.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПОВ СЧЕТА СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ ПРИБОРА SphinX ПО ГЕОГРАФИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ

Амплитуды сигналов с датчиков спектрофотометра SphinX, соответствующие различным энергиям рентгеновского излучения, записаны в 256 каналах, последние из которых идентифицированы как каналы записи сигналов от прохождений высокоэнергетических частиц. Накопленные за весь период наблюдения в 2009 г. данные о скоростях счетов с последних энергетических каналов двух датчиков были спроецированы на географическую карту поверхности Земли. На рис. 1 показано распределение скоростей счета по географическим координатам, записанное с помощью детектора Det2 на восходящих узлах орбиты спутника.

Отчетливо видны области БМА и РП в северном и южном полушариях, характерные для распределения частиц высоких энергий. Однако со-

**Таблица 1.** Наименования и характеристики каналов регистрации и соответствующих детекторов приборов SphinX и СТЭП-Ф

Наименование детектора/канала	SphinX		СТЭП-Ф			
	Det1	Det2	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 $\gamma$ -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 <sup>2</sup>	0.215*	0.111*	17	17	17	49

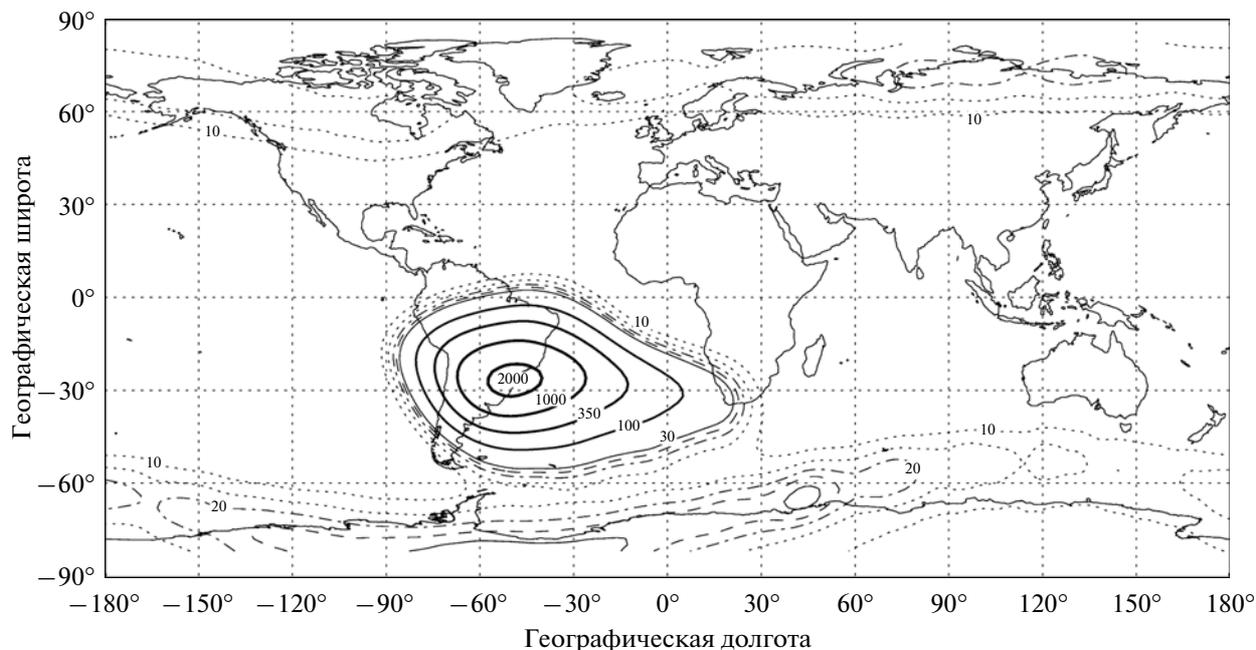
\*Активная площадь детектора для регистрации частиц ограничена внутренним коллиматором. Для регистрации рентгеновского излучения активная площадь имеет другую величину из-за наличия внешнего коллиматора (Gburek и др., 2011b).

ответствие записей определенным сортам и энергетическим диапазонам заряженных частиц неизвестно ввиду отсутствия предполетных градуировочных измерений с заряженными частицами и гамма-квантами с энергиями выше энергий рентгеновского диапазона.

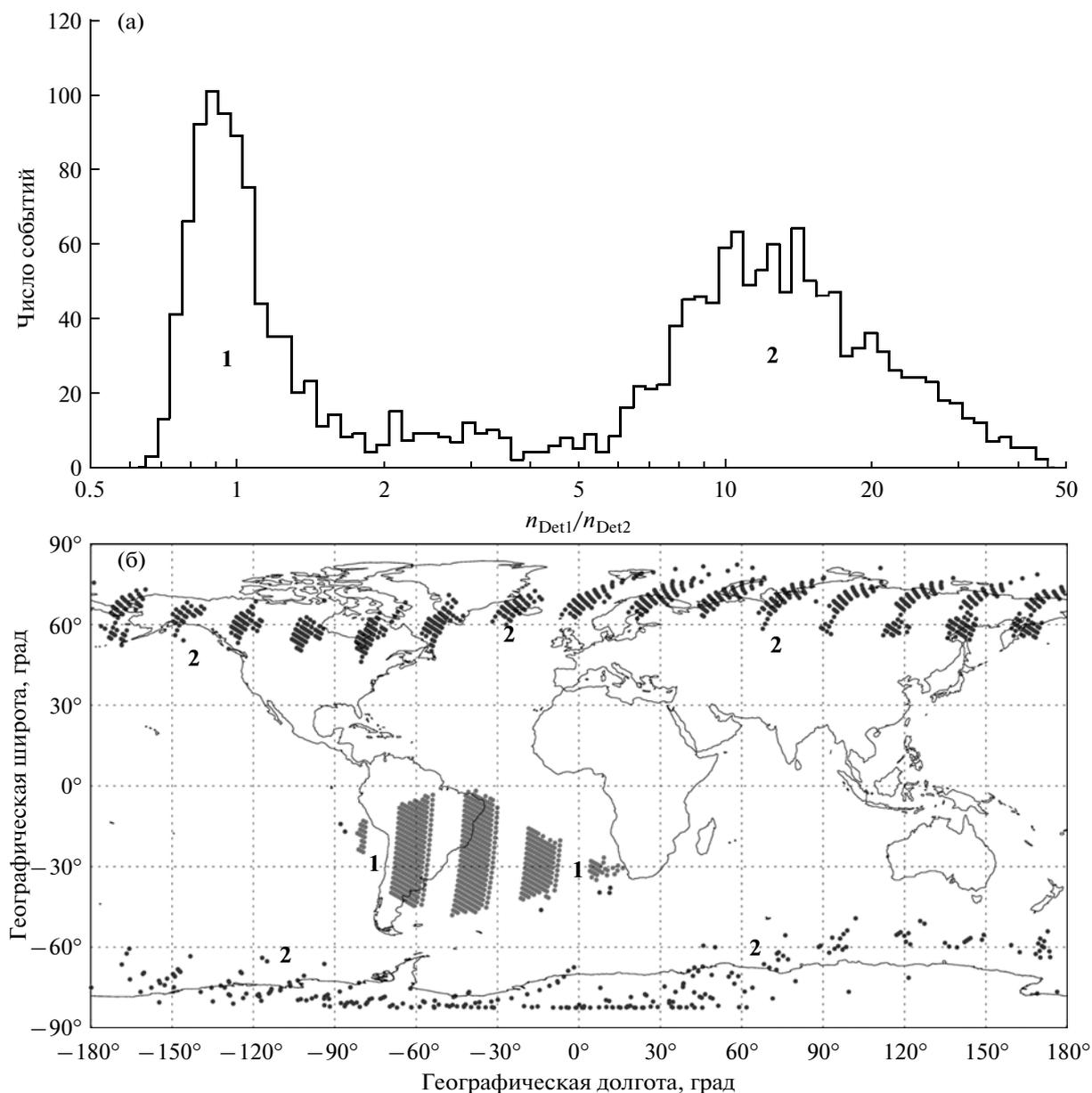
В верхней части рис. 2 показано распределение количеств отношений чисел импульсов  $n_{Det1}$ , зарегистрированных с помощью детектора Det1, к числам импульсов  $n_{Det2}$ , зарегистрированных с помощью детектора Det2 за каждые 30 с на протя-

жении рассматриваемого периода с 1 по 15 мая. Учитывая, что детекторы Det1 и Det2 имеют разные активные площади, числа импульсов  $n_{Det1}$  и  $n_{Det2}$  нормированы на единицу площади.

Отчетливо видны 2 максимума, обозначенные зонами 1 и 2: в зоне 1 отношение  $n_{Det1}/n_{Det2}$  варьирует в пределах от 0.7 до 1.5, во время, как в зоне 2 это отношение колеблется от 7 до 30 с широким максимумом в окрестности 10–18. Распределение числа событий, соответствующих этим двум зонам, по географическим координатам на восходя-



**Рис. 1.** Распределение скоростей счета по географическим координатам, полученное с помощью рентгеновского датчика с активной площадью 0.111 см<sup>2</sup> прибора SphinX на восходящих узлах орбиты КА за весь период наблюдения с 20 февраля по 29 ноября 2009 г.

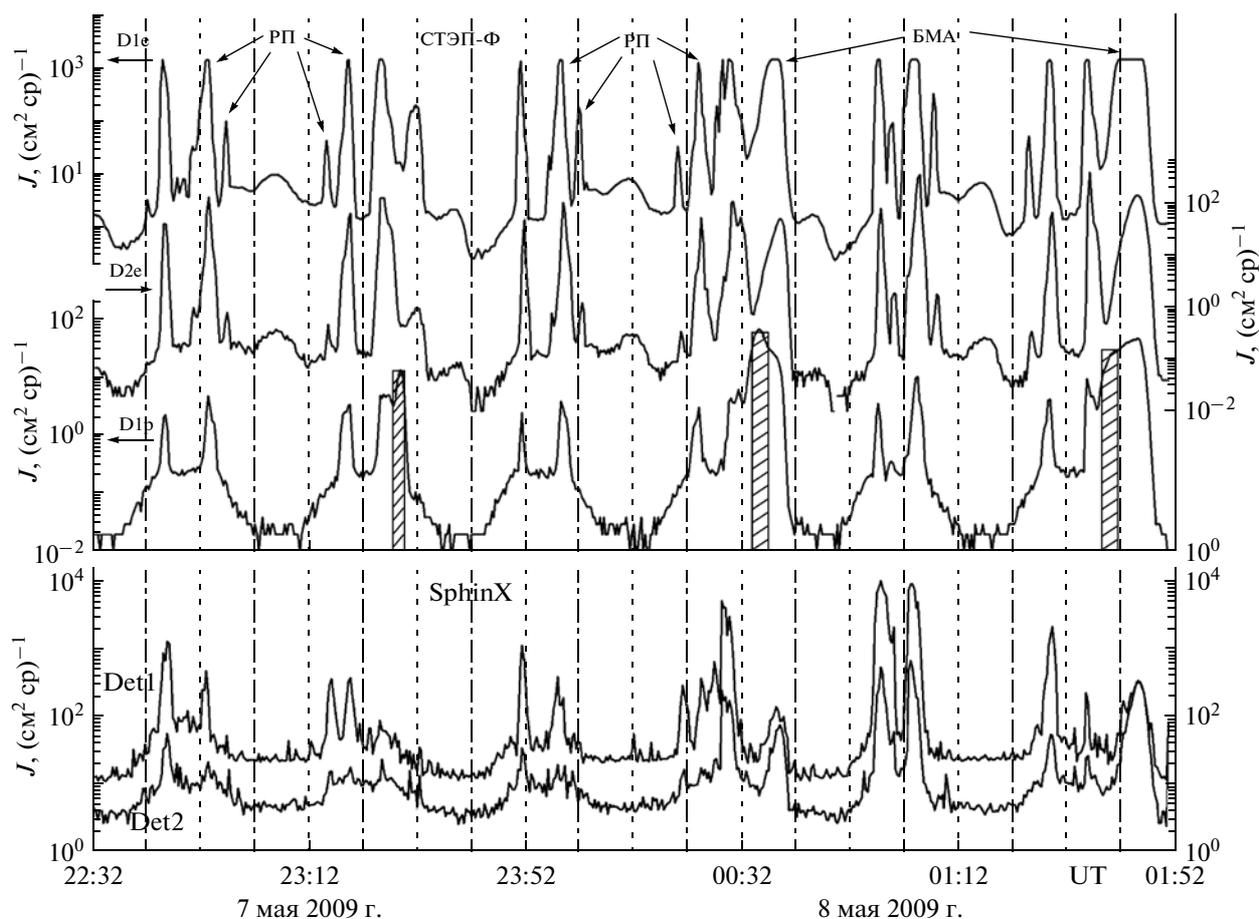


**Рис. 2.** (а) — распределение количеств отношений чисел импульсов  $n_{\text{Det1}}$ , зарегистрированных с помощью детектора Det1, к числам импульсов  $n_{\text{Det2}}$ , зарегистрированных с помощью детектора Det2 в период с 1 по 14 мая; (б) — географическое местоположение зон **1** (серые точки — область БМА) и **2** (черные точки — области РП).

щих узлах орбиты спутника (нижняя часть рис. 2) совпадает с контурами БМА (зона **1**) и внешнего РП (зона **2**). Наличие разрывов в точках покрытия географических зон объясняется непрохождением орбиты КА участков долгот в рассматриваемый 14-дневный период. Различные соотношения  $n_{\text{Det1}}/n_{\text{Det2}}$  в разных географических зонах указывает на изменение регистрируемой энергии (или диапазона энергий) одним и тем же детектором при переходе от зоны БМА к внешнему РП. В одной и той же зоне детекторы Det1 и Det2 регистрируют разные диапазоны энергий с учетом наличия над

детектором Det2 дополнительной защитной пластины из тантала толщиной 400 мкм. Таким образом, в каждый момент времени и, соответственно, в каждой точке пространства соотношение  $n_{\text{Det1}}/n_{\text{Det2}}$  характеризует наклон энергетического спектра частиц одного сорта. Изменение величины  $n_{\text{Det1}}/n_{\text{Det2}}$  от  $\sim 1$  (зона **1**) до  $\sim 15$  (зона **2**) указывает на значительную разницу в энергетических спектрах частиц в области БМА и внешнего РП.

Еще одной особенностью распределения соотношений  $n_{\text{Det1}}/n_{\text{Det2}}$  по географическим координа-



**Рис. 3.** Временной ход спектральной плотности потоков частиц высоких энергий, зарегистрированный приборами СТЭП-Ф и SphinX в период максимума слабой магнитной бури 7–8 мая 2009 г. Время – мировое, горизонтальные стрелки указывают отношение графиков к левой или правой оси  $OY$ . Заштрихованные области указывают на периоды регистрации протонов низких энергий в канале D1p.

там (рис. 26) является северо-южная асимметрия расположения точек зоны 2. В южном полушарии эти точки практически отсутствуют, что говорит о преимущественной регистрации детекторами прибора SphinX фоновых темпов счета на высоких отрицательных широтах, в то время, как в северном полушарии величины  $n_{Det1}$  и  $n_{Det2}$  значительно превышают фоновые показания в последних каналах спектрометров.

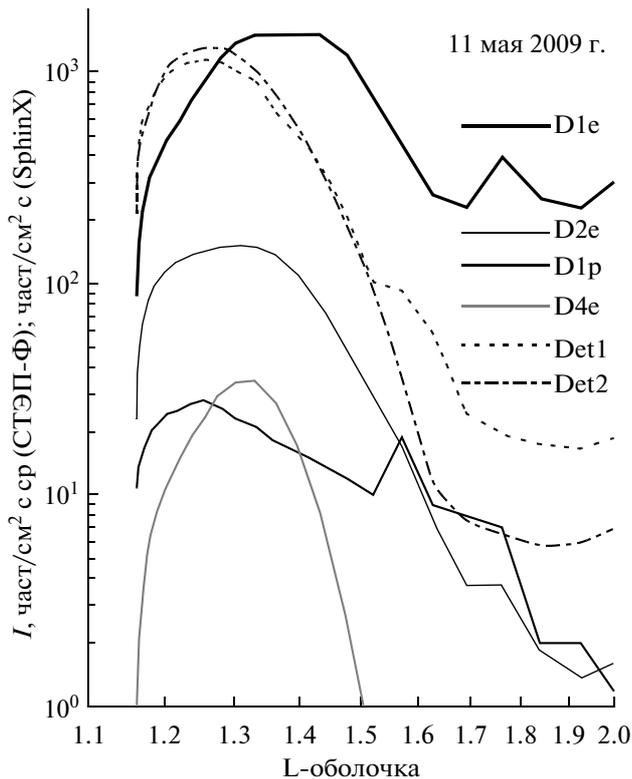
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ полученных данных проводился путем сравнения временных рядов потоков частиц в геомагнитно спокойное время и в окрестности слабой магнитной бури с максимумом развития 8 мая 2009 г. Кроме того, был проведен анализ динамики изменений максимальных значений потоков внутри БМА и в РП в первой половине мая 2009 г.

### *Общий вид вариаций потоков частиц по данным двух приборов*

С целью поиска наилучшего соответствия одного из энергетических каналов регистрации электронов и протонов прибором СТЭП-Ф ходу интенсивности числа частиц по показаниям Det1 и Det2 прибора SphinX был проанализирован период максимума слабой геомагнитной бури ( $D_{st} = -30$  нТ) 8 мая. На рис. 3 представлен временной ход спектральной плотности потока электронов и протонов в 3-х энергетических каналах на протяжении нескольких витков орбиты КА в период 7–8 мая в сравнении с ходом интенсивности частиц по данным прибора SphinX.

Заметно наличие откликов датчиков Det1 и Det2 на прохождение космического аппарата (КА) через РП и БМА, в целом совпадающее с возрастаниями потоков электронов в каналах прибора СТЭП-Ф. Загрузки датчика Det1 практически всегда выше загрузок датчика Det2 в ~5–



**Рис. 4.** Распределения интенсивностей частиц по L-оболочкам внутри БМА на пятом с начала суток витке восходящего узла орбиты КА 11 мая 2009 г. Потoki частиц для прибора SphinX не нормированы на телесный угол.

10 раз. Исключением является область БМА, где темп счета обоих датчиков практически одинаков, а вблизи центра БМА интенсивность счета в канале Det2 становится даже больше, чем интенсивность в канале Det1. Последнее обстоятельство указывает на чувствительность показаний датчиков к изменению спектра первичных частиц в различных областях внутренней магнитосферы. Достаточно высокие темпы счета обоих детекторов в очень узких полях зрения  $1.94^\circ \times 1.94^\circ$  и  $1.72^\circ \times 1.72^\circ$ , несоответствие их отношения разнице в активных площадях указывают на вклад дополнительной компоненты в загрузки каналов, приходящей из более широкого телесного угла. Такой компонентой может быть тормозное излучение первичных электронов от конструкционных материалов детекторной головки, прибора ТЕСИС и самого КА, эффективно регистрируемое активными слоями PIN фотодиода толщиной 500 мкм, работающего при высоких напряжениях обратного смещения 130 и 100 В.

Заштрихованным областям в верхней части рис. 3, означающим наличие отклика канала D1p прибора СТЭП-Ф на появление протонов низких

энергий, не обнаружено соответствие в каналах прибора SphinX, что является дополнительным аргументом в пользу регистрации датчиками Det1 и Det2 смешанной компоненты из электронов низких энергий и вторичного  $\gamma$ -излучения от электронов более высоких энергий. Последнее обстоятельство позволяет 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. Предварительный анализ сравнения временных рядов указывает на то, что величины  $E_{thr1}$  и  $E_{thr2}$  составляют несколько сот кэВ, но не более 0.5 МэВ. Более точные значения могут быть получены при отдельном сопоставлении профилей распределений потоков по L-оболочкам (L-параметр Мак-Илвайна) внутри БМА и в областях пересечений РП.

Особенностью отклика прибора SphinX на пересечение РП является большая разница в темпах счета при пересечении РП в одном и том же полушарии, в то время как временной интервал между этими пересечениями составляет не более 15 мин.

#### *Распределение максимумов интенсивностей частиц по L-оболочкам внутри БМА*

Известно, что значения L-оболочек, при которых интенсивности захваченных в радиационных поясах Земли электронов принимают максимальные значения, различны для разных энергий частиц. На высоте полета КА КОРОНАС-ФОТОН захваченные электроны регистрировались внутри области БМА. Для анализа распределений потоков частиц по L-оболочкам были выбраны пятые с начала суток витки восходящих узлов орбиты КА. На рис. 4 в качестве примера показаны распределения плотностей потоков частиц для четырех каналов прибора СТЭП-Ф и обоих каналов прибора SphinX 11 мая.

Видно хорошее совпадение профилей интенсивностей частиц, отображенных в каналах D2e, Det1 и Det2. Отчетливо заметно изменение соотношений в нагрузках этих каналов при переходе от значений  $L \sim 1.25$  до  $L \sim 1.85$ . Очевидно, датчик Det2 является более чувствительным к увеличению потоков электронов с высокими энергиями внутри БМА. Значительное уменьшение темпов счета в этом канале на больших L-оболочках указывает на 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 гамма-излучения, подтверждает изменение формы энергетического спектра первичных электронов.

В табл. 2 приведены значения L-оболочек, на которых были зарегистрированы максимумы интенсивностей частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г. для 5 каналов обоих приборов. Для малых значений  $V/B_0$  в области БМА потоки частиц близки к изотропным, тогда эти потоки детектируются обоими приборами, несмотря на их разные поля зрения.

Усредненные за 14 дней величины L-оболочек позволяют определить значения  $E_{thr1}$  и  $E_{thr2}$  для датчиков Det1 и Det2, 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. 5 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 ото дня к дню. Соответственно, изменяются и значения  $E_{thr1}$  и  $E_{thr2}$ . Так, если для 1 мая  $E_{thr1} = E_{thr2} \approx 460$  кэВ, то уже для 12 мая  $E_{thr1} = E_{thr2} \approx 550$  кэВ. Из этого же графика можно определить величину  $E_{D4e}$ , которая оказалась равной  $E_{D4e} \approx 335$  кэВ. Однако значение  $E_{D4e}$  также испытывает изменения ото дня к дню и варьирует от 230 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  $E_{thr1}$  и  $E_{thr2}$  прибора SphinX обусловлены высокой эффективностью регистрации сцинтилляционным детектором, его большой активной площадью и очень низкими шумами фотоэлектронного умножителя.

#### Особенности распределений частиц в РП

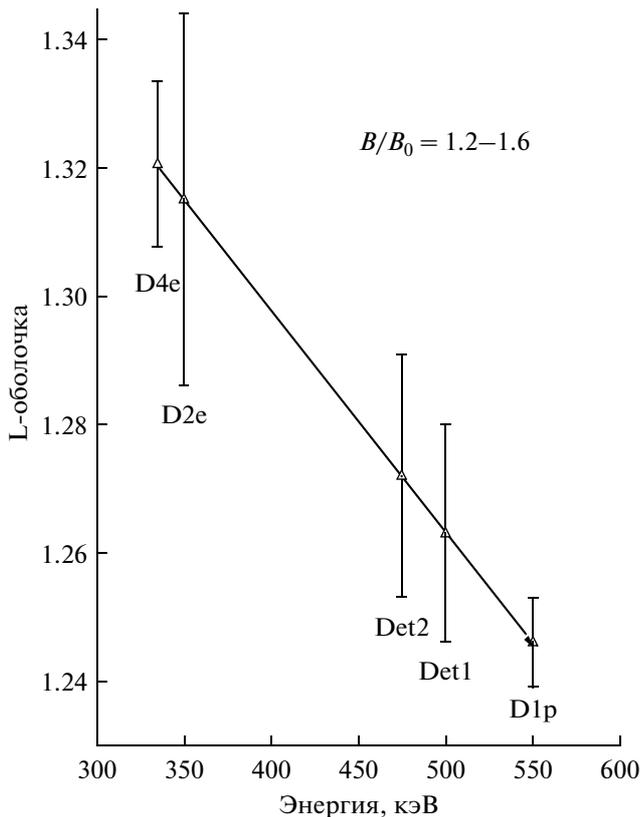
В радиационных поясах Земли потоки частиц на высоте полета КА КОРОНАС-ФОТОН значительно меньше, чем в БМА, поэтому появилась

**Таблица 2.** Величины L-оболочек, на которых наблюдались максимальные значения потоков частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г.

День	СТЭП-Ф			SphinX	
	D2e	D1p	D4e	Det1	Det2
1	1.35	1.253	1.322	1.296	1.296
2	1.337	1.244	1.337	—	—
3	1.353	1.254	1.324	1.275	1.275
4	1.343	1.247	1.343	1.267	1.29
5	1.333	1.241	1.333	1.282	1.282
6	1.318	1.249	1.318	1.269	1.292
7	1.337	1.242	1.309	1.262	1.284
8	1.3	1.255	1.328	1.276	1.276
9	1.319	1.248	1.319	1.25	1.269
10	1.31	1.242	1.31	1.262	1.262
11	1.302	1.255	1.33	1.255	1.277
12	1.29	1.245	1.316	1.245	1.245
13	1.257	1.237	1.305	1.237	1.257
14	1.27	1.229	1.294	1.248	1.229
Среднее значение	<b>1.315 ± 0.029</b>	<b>1.246 ± 0.007</b>	<b>1.3206 ± 0.013</b>	<b>1.263 ± 0.017</b>	<b>1.272 ± 0.019</b>

возможность привлечь к анализу канал D1e прибора СТЭП-Ф, который имел ограничения по записи при больших темпах счета. Сравнение распределений интенсивностей в каналах регистрации обоих приборов вне области БМА показало несоответствие 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. 6 показаны распределения интенсивностей частиц в каналах регистрации обоих приборов в северном полушарии 8 мая (рис. 6а) и изменений этих распределений в каналах Det1 и Det2 прибора SphinX в южном полушарии 3 и 9 мая (рис. 6б).

Из рис. 6а видно, что прибор СТЭП-Ф регистрирует 3 электронных пояса в двух энергетических каналах, причем электроны третьего допол-



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

нительного пояса (Дудник, 2010) имеют мягкий энергетический спектр, поскольку их интенсивность при  $E \geq 0.55$  МэВ резко падает. Прибор SphinX, возможно, также регистрирует 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 недостаточно для регистрации РП. Второй причиной, по которой не видны в явном виде внутренние РП в обоих каналах, может быть разница в углах обзора двух приборов. Совпадение же распределений по L-оболочкам означает появление высыпающихся потоков с широким распределением по питч-углам.

Для проверки этой гипотезы было построено распределение интенсивностей по L-оболочкам в южном полушарии в двух каналах прибора SphinX для 3 и 9 мая. Рис. 6б показывает, что прибор регистрирует внутренний РП датчиком Det1 как в магнитоспокойный период, так в 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 вы-

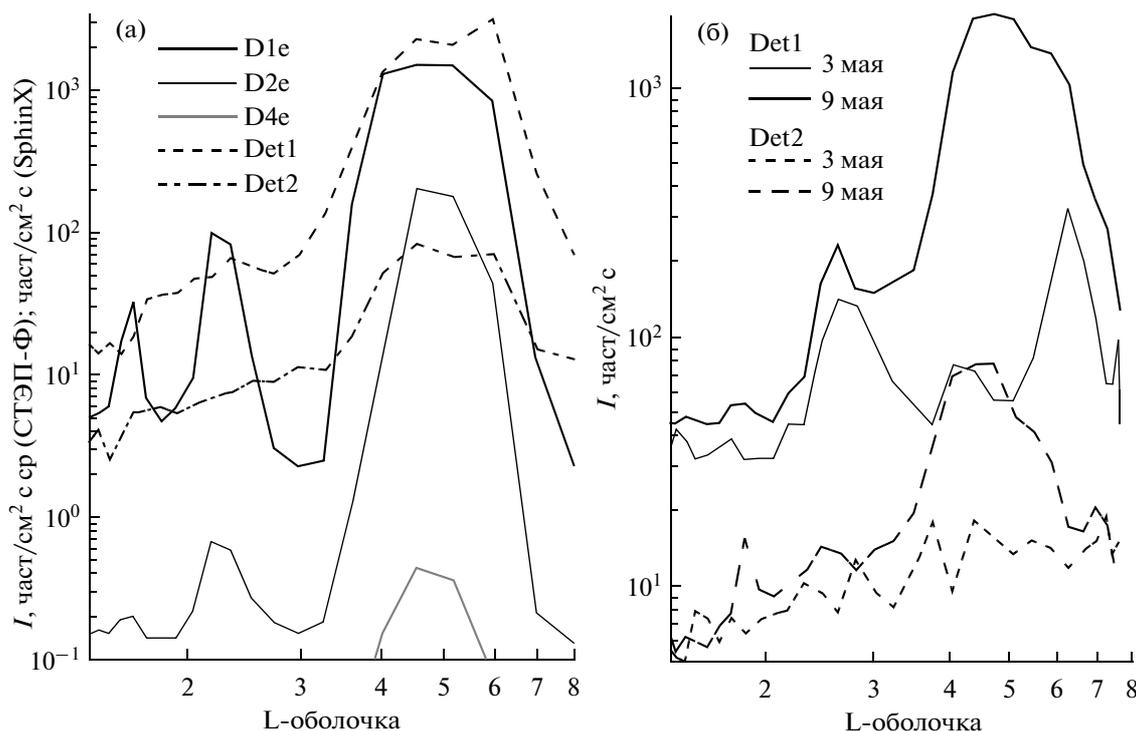
вод о регистрации этим каналом более высокоэнергетической компоненты в спектре электронов. Таким образом, прибор SphinX, имея более узкий угол зрения по сравнению с прибором СТЭП-Ф, регистрирует потоки электронов как внешнего, так и внутреннего РП, отслеживая динамику потоков как по интенсивности, так и по радиальным относительно поверхности Земли распределениям.

### РАДИАЛЬНАЯ ДИФFUЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ ВО ВНЕШНЕМ РП

Энергетический спектр электронов в РП значительно мягче спектра в БМА. В этом случае значения  $E_{thr1}$ ,  $E_{thr2}$  и  $E_{D4e}$  для внешнего РП должны быть иными в сравнении с такими же значениями для БМА. С целью определения эффективных энергий электронов применимы два 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 одного магнитного полюса к другому. Определив значения L-оболочек из данных детекторов Det1 и Det2 прибора SphinX, детектора D4 прибора СТЭП-Ф и используя известную зависимость L-оболочек с максимумами интенсивности частиц из данных каналов D1e, D2e и D1p прибора СТЭП-Ф, можно оценить значения  $E_{thr1}$ ,  $E_{thr2}$  и  $E_{D4e}$ .

Второй подход заключается в определении зависимости смещений  $\Delta L$  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 радиальной диффузии электронов на скачках магнитного поля Земли во время максимума развития и начальной фазы восстановления бури. Многочисленные спутниковые эксперименты показывают, что величина смещения  $\Delta L$  обратно пропорциональна энергии первичных электронов (Kuznetsov и др., 2007). Определив  $\Delta L$  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. 7 представлены совмещенные результаты анализа данных, полученных для девятих с начала суток восходящих узлов орбиты КА в северном полушарии. Значительный разброс значений L-оболочек (левая шкала оси OY) обусловлен наличием в рассматриваемый период слабой магнитной



**Рис. 6.** (а) — распределение по L-оболочкам потоков частиц в РП в северном полушарии на девятом с начала суток восходящем узле орбиты КА в пяти каналах регистрации обоих приборов 8 мая; (б) — распределение по L-оболочкам потоков частиц в РП в южном полушарии на первом нисходящем узле орбиты КА в каналах Det1 и Det2 3 и 9 мая.

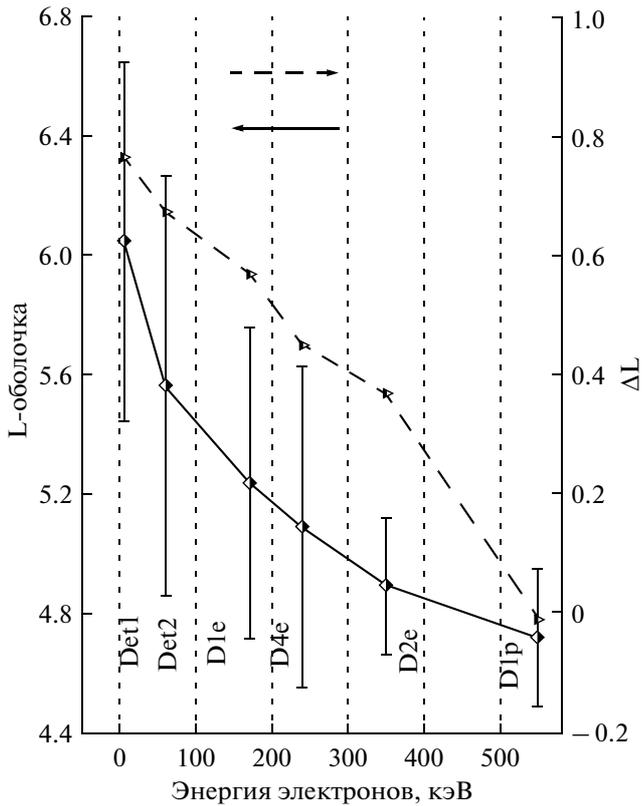
бури и как следствие — смещением  $\Delta L$  в область меньших значений  $L$  из-за радиальной диффузии электронов поперек силовых линий магнитного поля. Статистические ошибки величин  $\Delta L$  (правая шкала оси  $OY$ ) невозможно определить, поскольку в анализ привлечены данные только одной магнитной бури. Вследствие этого на графике имеется отрицательное значение  $(\Delta L)_6 = -0.01$ . Очевидно, применимыми к анализу являются величины  $\Delta L$ , для которых верно  $\Delta L \geq 0.03$ .

В итоге, анализ обоих графиков на рис. 7 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 общей толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью  $4.9 \times 10^{-3}$  см<sup>2</sup>. При такой толщине защитного слоя вещества с плотностью  $\rho = 16.65$  г/см<sup>3</sup> 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  $\sim 10$  раз меньше, чем для БМА, указывает на мягкий характер спектра в РП. Значение  $E_{thr2}$  понижает также часть потока

низкоэнергетических электронов, входящая в открытое окно площадью  $4.9 \times 10^{-3}$  см<sup>2</sup> и регистрируемая прямым способом активным слоем фото диода. Вклад электронов прямой регистрации в общую загрузку детектора Det1 значительно выше, однако наличие очень низкоэнергетических гамма-квантов нельзя исключить, исходя из значительных темпов счета при 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 идет лишь в том случае, когда полезные сигналы были одновременно во всех четырех слоях детекторов телескопической системы блока СТЭП-ФД. Это значит, что электроны, рождающие вторичные гамма-кванты в материале сцинтилляционного детектора D3 или конструкционных материалах детекторной головки, достигают как минимум второго слоя позиционно-чувствительных кремниевых матричных детекторов. В то же время, уменьшение значения  $E_{D4e}$  с  $\sim 335$  кэВ для БМА до  $\sim 240$  кэВ для РП также указывает на смягчение характера энергетического спектра в РП по сравнению с формой спектра в БМА.

Таким образом, зная величины  $E_{thr1}$ ,  $E_{thr2}$  и  $E_{D4e}$ , можно оценивать характер энергетического спектра первичных электронов в той или иной ча-



**Рис. 7.** Зависимость усредненных за период с 1 по 14 мая 2009 г. значений L-оболочек с максимальными потоками частиц во внешнем РП (левая шкала  $oy$ ) от их энергии для восходящих узлов девятого с начала суток витков в северном полушарии (сплошная линия). Пунктирной линией показана зависимость от энергии электронов наибольших смещений максимальных потоков на величину  $\Delta L$  (правая шкала оси  $oy$ ) 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.

сти магнитосферы Земли. В свою очередь, форма и наклон спектра могут указывать на преимущественную регистрацию захваченных, квазизахваченных или высыпающихся электронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ данных, полученных с помощью солнечного рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф, установленных на низкоорбитальном спутнике КОРОНАС-ФОТОН, показал динамику низкоэнергетических и ультрарелятивистских электронов в области Бразильской магнитной аномалии и внешнего радиационного пояса в окрестности слабой геомагнитной бури. Старшие каналы энергетических спектров

прибора SphinX содержат в себе информацию о потоках частиц низких и средних энергий. При этом в записях числа частиц с избранным для анализа временным разрешением присутствует вклад как прямой регистрации электронов активными слоями фотодиодов большой площади, так и регистрации вторичных гамма-квантов различных энергий, рожденных в конструкционных материалах прибора, обсерватории ТЕСИС и самого космического аппарата.

Определены эффективные пороговые значения энергий регистрации электронов детекторами Det1 и Det2 прибора SphinX и каналом D4e прибора СТЭП-Ф, которые составили  $E_{thr1} \approx 500$  кэВ,  $E_{thr2} \approx 475$  кэВ и  $E_{D4e} \approx 335$  кэВ в областях Бразильской магнитной аномалии с относительными значениями магнитного поля Земли  $B/B_0 \approx 1.2–1.6$ . Для внешнего радиационного пояса Земли эффективные значения регистрации электронов составили соответственно  $E_{thr1} \approx 5$  кэВ,  $E_{thr2} \approx 60$  кэВ и  $E_{D4e} \approx 240$  кэВ. Указанные значения не являются строго фиксированными и являются функциями пространственного положения датчиков в той или иной зоне заряженной радиации, в ее центре или на периферии, а также уровня возмущенности геомагнитного поля.

Экспериментальное определение смещений  $\Delta L$  величин L-оболочек во внешнем радиационном поясе, на которых наблюдались максимумы распределений потоков частиц в каналах записи обоих приборов в процессе радиальной диффузии электронов, относительно первоначального распределения в предбуревой период позволило определить зависимость величин  $\Delta L$  от энергии электронов. Таким образом, каналы регистрации прибора SphinX дополнили и расширили энергетический диапазон регистрации каналов прибора СТЭП-Ф в сторону меньших энергий вне области Бразильской магнитной аномалии.

Наконец, по значениям эффективных пороговых энергий регистрации обоими детекторами прибора SphinX можно оценивать характер энергетического спектра первичных электронов, а значит — указывать на преимущественную регистрацию захваченных или высыпающихся электронов в той или иной части магнитосферы Земли. Учитывая низкие значения эффективных пороговых энергий регистрации вне области аномалии, а также узкие поля зрения, с помощью прибора SphinX можно исследовать такие малоизвестные явления на средних и низких широтах, как связь с грозовой активностью, уменьшив разрешающее время регистрации до минимально возможного.

Авторы благодарны коллективу Института астрофизики Национального исследовательского

ядерного университета “Московский инженерно-физический институт” за систематическую помощь в обеспечении научными и служебными данными с прибора СТЭП-Ф и космического аппарата в целом.

Работа выполнена при поддержке Программы FP7/2007–2013 Еврокомиссии, Грант № 218816 (Проект SOTERIA, [www.soteria.space.eu](http://www.soteria.space.eu)), а также Министерства образования и науки Республики Польша, Контракт № 203381736.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дудник А.В.* Исследование радиационных поясов Земли в мае 2009 года на низкоорбитальном спутнике с помощью прибора СТЭП-Ф // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. № 5. С. 12–28.
- Arkhangelskaja I.V., Amandjolova D.B., Arkhangelsky A.I., Kotov Yu.D.* Features of quasi-stationary precipitations according to the data obtained with the AVS-F instrument onboard the CORONAS-F satellite // Sol. Syst. Res. 2008. V. 42. № 6. P. 536–542.
- Dudnik A.V., Persikov V.K., Zalyubovsky I.I., et al.* High sensitivity STEP-F spectrometer–telescope for high-energy particles of the CORONAS-PHOTON satellite experiment // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 3. P. 212–220.
- Gburek S., Siarkowski M., Kepa A., et al.* Soft X-ray variability over the present minimum of Solar activity as observed by SphinX // Sol. Syst. Res. 2011a. V. 45. № 2. P. 182–187.
- Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M., et al.* SphinX soft X-ray spectrophotometer: science objectives, design and performance // Sol. Syst. Res. 2011b. V. 45. № 3. P. 189–199.
- Glyanenko A.S., Kotov Yu.D., Pavlov A.V., et al.* The AVS-F experiment on recording rapidly changing fluxes of cosmic and gamma radiation prepared under the CORONAS-F project // Instruments and Experimental Techniques. 2009. V. 42. № 5. P. 596–603.
- Kotov Yu.D.* Scientific goals and observational capabilities of the CORONAS-PHOTON solar satellite project // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 2. P. 93–96.
- Kuznetsov S.N., Myagkova I.N., Yushkov B.Yu., et al.* Dynamics of the Earth radiation belts during strong magnetic storms based on CORONAS-F data // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 4. P. 338–348.
- Sylwester J., Kuzin S., Kotov Yu.D., et al.* A fast solar photometer in X-rays // J. Astrophys. and Astron. 2008. V. 29. № 1–2. P. 339–343.
- <http://www.amptek.com/xr100cr.html>