

УДК 523.4-854; 52-72; 52-732; 520-662

**А. В. Дудник¹, П. Подгурский², Я. Сильвестер², С. Гбурек²,
М. Ковалиньский², М. Сялковский², С. Плоценьяк², Я. Бонкала²**

¹Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

²Центр космічних досліджень Польської академії наук, Відділення фізики Сонця, Вроцлав, Польща

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЯСОВ В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА SPHINX И СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕСКОПА ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ СТЭП-Ф: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Частинки високих енергій в земній магнітосфері роблять свій внесок у сигнали, що вимірюються приладами на борту супутника КОРОНАС-ФОТОН, розташованого на низькополярній орбіті. Серед приладів корисного наукового навантаження був сонячний фотометр SphinX для рентгенівського діапазону. Сигнал від частинки виникає завдяки проникненню високоенергійних електронів і вторинних гамма-квантів у матеріали детекторів. Ці сигнали від частинок потребують детального калібрування в абсолютних одиницях. З цією метою були використані вимірювання спеціально розробленого спектрометра частинок СТЭП-Ф. Прилад СТЭП-Ф розташовано у безпосередній близькості до SphinX з полем зору, направленим перпендикулярно до поля зору приладу SphinX. Показано, що детектори приладів СТЭП-Ф і SphinX відтворюють майже ідентичні профілі сигналів під час перетинання супутником областей Бразильської магнітної аномалії і дуже близькі — під час перетину радіаційних поясів Землі. Докладне розуміння цієї відповідності між обома приладами необхідне з огляду на емісію вторинних гамма-квантів, що генеруються від конструкційних матеріалів детекторної головки, обсерваторії ТЕСІС і самого космічного апарата. Динаміка сигналів, породжених високо енергійними електронами і зареєстрованими за допомогою приладу SphinX під час слабкої геомагнітної бурі, відображає процеси радіальної і тітч-кутової дифузії електронів.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость непрерывного изучения вариаций частиц в радиационных поясах Земли и под ними связана не только с воздействием ионизирующего излучения на электронное и иное оборудование космических аппаратов, жизнедеятельность астронавтов на космических станциях. За последние годы накоплено большое количество информации об обусловленности динамики электронов в магнитосфере взаимодействием волн разного типа с частицами высоких энергий. Появились указания на то, что нестационарные потоки частиц высоких энергий под радиационными поясами могут предше-

вать или сопутствовать сейсмической активности Земли [10, 13], что требует более пристального внимания к такому объекту, как магнитосферные частицы высоких энергий. Помимо этого, научные приборы на космических аппаратах, предназначенные подчас для изучения совершенно 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, не ожидаемые 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 [9], накопила большое количес-

© А. В. ДУДНИК, П. ПОДГУРСКИЙ, Я. СИЛЬВЕСТЕР,
С. ГБУРЕК, М. КОВАЛИНСКИЙ, М. СЯКОВСКИЙ,
С. ПЛОЦЕНЬЯК, Я. БОНКАЛА, 2011

тво информации об изменяющихся скоростях счета в низкоэнергетическом и высокоэнергетическом γ -диапазонах. Распределение темпов счета по географическим координатам отчетливо показало области полярных шапок, радиационных поясов (РП), Бразильской магнитной аномалии (БМА), всплесковых событий и квазистационарных экваториальных высыпаний разных типов [4].

Рентгеновский спектрофотометр SphinX разработки и изготовлений Отделения физики Солнца Центра космических исследований Польской академии наук как составная часть комплекса научной аппаратуры «Фотон» космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН [11] предназначен для изучения энергетических спектров рентгеновского излучения Солнца в диапазоне энергий 1–15 кэВ. Уже 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 заряженных частиц высокой энергии, был расположен в непосредственной близости от прибора SphinX. Таким образом, появилась возможность проведения совместного анализа данных канала регистрации частиц прибора SphinX и каналов регистрации электронов и протонов промежуточных энергий прибора СТЭП-Ф.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Амплитуды сигналов с датчиков спектрофотометра SphinX распределены в 256-канальные энергетические спектры, последние каналы которых идентифицированы как каналы записи сигналов от прохождений через материалы детекторов частиц высокой энергии. Накопленные за весь период наблюдения в 2009 г. данные о скоростях счетов с двух датчиков были спроецированы на географическую карту поверхности Земли. В качестве примера на рис. 1 показано распределение скоростей счета, записанное с помощью PIN-фотодиода с активной площадью 0.111 см² на восходящих узлах орбиты спутника. Отчетливо вид-

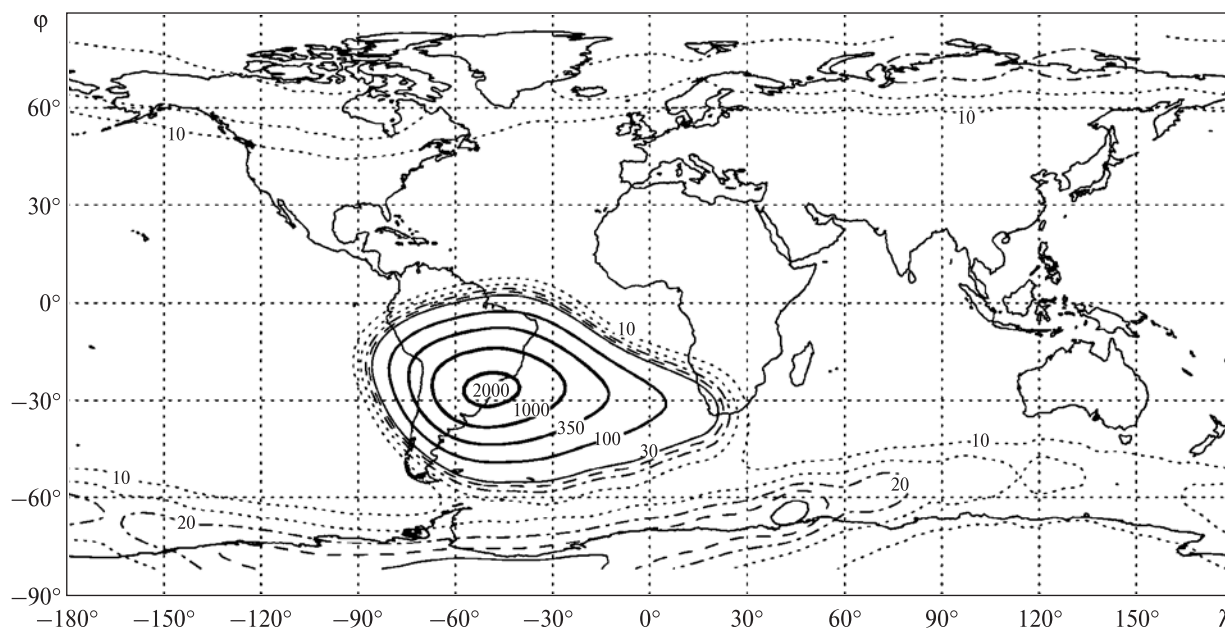


Рис. 1. Распределение скоростей счета по географическим координатам, полученное с помощью рентгеновского датчика с активной площадью 0.111 см² прибора SphinX на восходящих узлах орбиты КА за весь период наблюдения с 20 февраля по 29 ноября 2009 г.

ны области РП в северном и южном полушариях и БМА, характерные для распределения частиц высоких энергий. Однако соответствие записей определенным сортам и энергетическим диапазонам заряженных частиц неизвестно ввиду отсутствия предполетных градуировочных измерений с элементарными частицами.

Подобные распределения были получены с помощью спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф на начальной стадии летных испытаний комплекса научной аппаратуры «Фотон» [3]. Очень близкий характер обоих распределений и наличие наземных калибровочных измерений откликов детекторов прибора СТЭП-Ф с помощью ускорителей заряженных частиц и лабораторных источников ионизирующего излучения [6] инициировали проведение совместного анализа временных рядов интенсивностей загрузок в каналах регистрации частиц прибора SphinX, потоков электронов в трех энергетических диапазонах и вторичного γ -излучения в каналах регистрации прибора СТЭП-Ф. Особенностью эксперимента с прибором СТЭП-Ф было непрерывное изменение угла между осью обзора прибора, направленной вдоль оси $-X$ спутника, и линией, соединяющей спутник с поверхностью Земли по наименьшему расстоянию. В итоге прибор попеременно фиксировал потоки частиц, направленные то к поверхности планеты, то от нее, то дважды за виток — вдоль поверхности Земли.

В качестве периода для совместного анализа данных был выбран период первой половины мая 2009 г., в течение которой произошла слабая геомагнитная буря с заметными изменениями потоков электронов как на геостационарной орбите, так и в электронных поясах на высоте полета ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН [1]. Совместный анализ проведен для периода с 1 по 14 мая 2009 г. с одинаковым для обоих приборов 30-с временным разрешением данных.

РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР SPHINX И СПУТНИКОВЫЙ ТЕЛЕСКОП ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ СТЭП-Ф

Датчиками солнечного рентгеновского спектрофотометра SphinX [7, 8, 14] служили четыре не-

зависимых друг от друга в процессе обработки информации круглых кремниевых PIN-фотодиода, каждый толщиной 500 мкм, но разной активной площадью регистрации. Фотодиоды были интегрированы в детекторы 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 3.2 мкм от прямого ультрафиолетового излучения Солнца. Детектор с активной площадью 0.111 см², обозначенный далее *Det2*, дополнительно закрыт двойной пластиной из тантала общей толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью 4.9×10^{-3} см² для регистрации рентгеновских всплесков от мощных солнечных вспышек. Энергетическое разрешение аппаратуры составляло около 0.4 кэВ во всем диапазоне регистрации $\Delta E = 0-15$ кэВ, распределенном по 256 каналам спектрометрического АЦП. При этом энергетический порог регистрации сигналов, поступающих от детектора с активной площадью 0.215 см², обозначенного далее *Det1*, был выставлен на уровне 1.1 кэВ. Такая же характеристика для детектора *Det2* составила 0.85 кэВ. Выбранное рабочее напряжения обратного смещения для детекторов *Det1* и *Det2* равнялись 130 В и 100 В соответственно. Поле зрения прибора направлено вдоль оси *OZ* космического аппарата, стабилизированной во время проведения эксперимента по направлению на Солнце. Угол зрения детекторов *Det1* и *Det2* составил $1.94 \times 1.94^\circ$ и $1.72 \times 1.72^\circ$ соответственно. Временное разрешение записи информации в режиме Basic, используемое 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, находившийся вместе с другими блоками электроники внутри герметического отсека, заполненного ар-

гонно-воздушной смесью под давлением 1 атм [5]. Детекторная головка блока детекторов СТЭП-ФД, построенная по принципу телескопической системы, содержала два идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора D1 и D2 и два 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 (760 мкм), а также конструкционных материалов из алюминия, регистрировал вторичные γ -кванты низких и промежуточных энергий от взаимодействия первичных электронов с тремя слоями детекторов и их держателями. Общий угол зрения телескопа – $108 \times 108^\circ$ 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. Информационные кадры, передаваемые с прибора в бортовую систему сбора и регистрации научной информации через каждые 30 с, содержали усредненные полуминутные и 2-с данные о сортах, потоках и угловых распре-

делениях частиц. В ходе наземных градуировочных измерений, а также в процессе анализа научных данных во время летных испытаний определены диапазоны регистрируемых энергий и типы заряженных частиц.

В табл. 1 представлены некоторые характеристики детекторов и энергетических диапазонов приборов СТЭП-Ф и SphinX, используемые в ходе дальнейшего анализа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ полученных записей 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. Период до начала геомагнитной бури с максимумом $D_{st} = -30$ нТл 8 мая был проанализирован 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. На

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

Наименование детектора/канала	E_e, E_p	Тип детектора	Толщина детектора, мкм	Активная площадь, см ²
SphinX				
<i>Det1</i>	—	Si PIN	500	0.215*
<i>Det2</i>	—	Si PIN	500	0.111*
СТЭП-Ф				
D1e	Электроны 0.18–0.51 МэВ + + протоны 3.5–3.7 МэВ	Si PIN	380	17
D1p	Протоны 3.7–7.4 МэВ + + электроны 0.55–0.95 МэВ	Si PIN	380	17
D2e	Электроны 0.35–0.95 МэВ	Si PIN	380	17
D4e	Вторичное γ -излучение от электронов ($E_e \geq 0.6$ –0.8 МэВ)	CsI(Tl) + вакуумный ФЭУ	5000	49

* Активная площадь детектора для регистрации частиц ограничена внутренним коллиматором. Для регистрации рентгеновского излучения активная площадь имеет другую величину из-за наличия внешнего коллиматора [8].

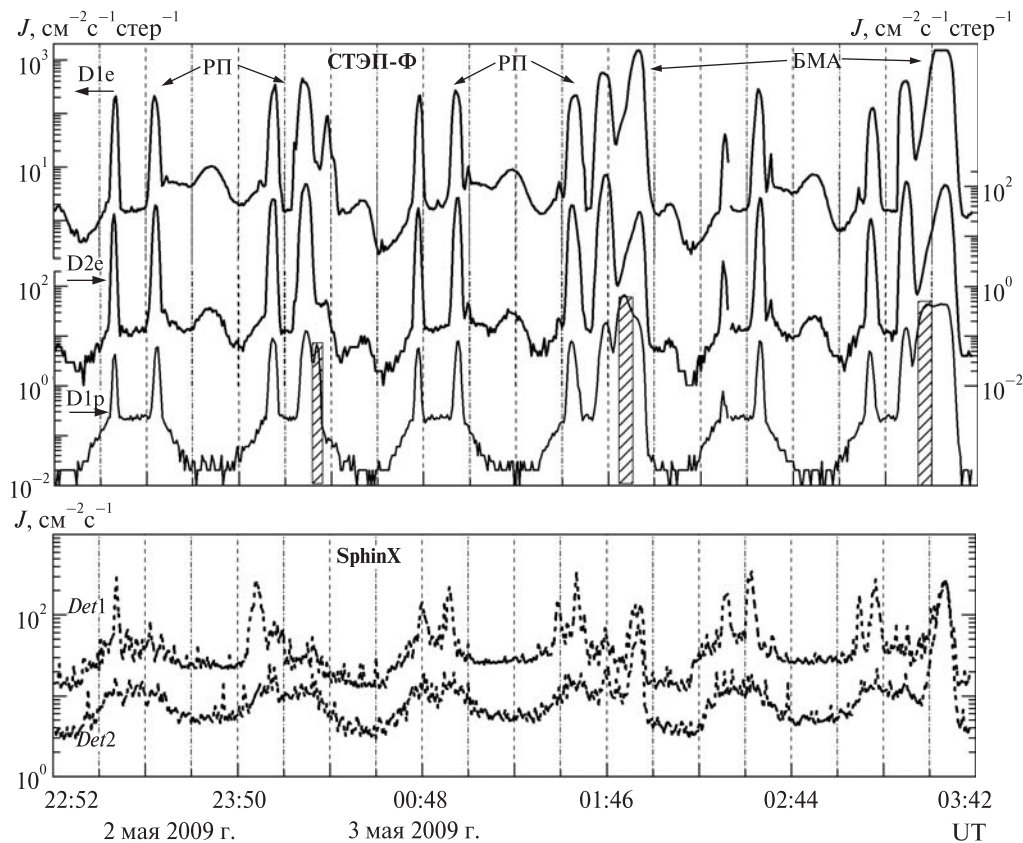


Рис. 2. Временной ход спектральной плотности J потоков частиц высоких энергий, зарегистрированный приборами СТЭП-Ф (D1e, D1p — шкалы слева, D2e — шкала справа) и SphinX в геомагнитно-спокойный период 2–3 мая 2009 г. Заштрихованные области указывают на периоды регистрации протонов низких энергий в канале D1p

рис. 2 представлен временной ход спектральной плотности потока электронов и протонов в трех энергетических каналах на протяжении нескольких витков орбиты КА в период 2–3 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 5–10 раз за счет его меньшей активной площади. Исключением является область БМА, где темп счета обоих датчиков практически одинаков, а вблизи центра БМА интенсивность счета в канале *Det2* становится даже больше интенсивности, чем 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 $1.94 \times 1.94^\circ$ и $1.72 \times 1.72^\circ$, несоответствие их отношения разнице в активных площадях указывают на вклад дополнительного компонента в загрузки каналов, приходящего из более широкого телесного угла. Таким компонентом 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.

Откликом канала D1p прибора СТЭП-Ф на появление протонов низких энергий (заштрихованные области в верхней части рис. 2), не обнаружено соответствие в каналах прибора SphinX, что является дополнительным аргументом в пользу регистрации датчиками *Def1* и *Def2* смешанного компонента из электронов низких энергий и вторичного γ -излучения от электронов более высоких энергий. Последнее обстоятельство позволяет ввести понятие эффективной пороговой энергии регистрации электронов E_{thr1} и E_{thr2} детекторами *Def1* и *Def2* 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 сотен 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 темпов счета при пересечении РП в одном и том же полушарии, в то время как временной интервал между этими пересечениями составляет не более 15 мин. Поскольку за такое время в геомагнитно спокойный период потоки в РП не могли существенно измениться, то разница, вероятнее всего, обусловлена узкой направленностью частиц в РП на высоте 550 км и гораздо более узким полем зрения датчиков прибора SphinX по сравнению с полем зрения прибора СТЭП-Ф, составляющим примерно $100 \times 100^\circ$. Учитывая, что оси направленности обоих приборов взаимно перпендикулярны друг к другу, несовпадение во времени появлений максимумов загрузок в каналах обоих приборов только подтверждает данный вывод.

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 за-

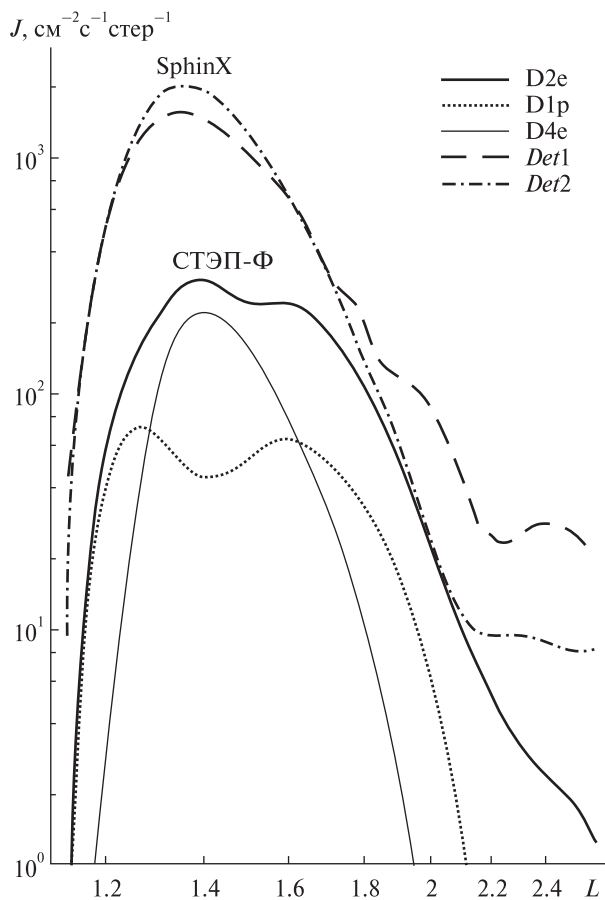


Рис. 3. Распределения интенсивностей частиц по L -оболочкам внутри БМА на четвертом с начала суток витке восходящего узла орбиты КА 11 мая 2009 г. Потоки частиц для прибора SphinX не нормированы на телесный угол

хваченные электроны могли быть зарегистрированы только внутри области БМА. Для анализа распределений потоков частиц по L -оболочкам были выбраны четвертые с начала суток витки восходящих узлов орбиты КА.

На рис. 3 в качестве примера показаны распределения для трех каналов прибора СТЭП-Ф и обоих каналов прибора SphinX 11 мая 2009 г. Видно наличие двух максимумов в распределении интенсивностей электронов по L -оболочкам внутреннего пояса, отображенных в каналах D2e и D1p, что может указывать на возможное «расщепление» внутреннего пояса на два и более пояса даже в геомагнитно спокойных условиях,

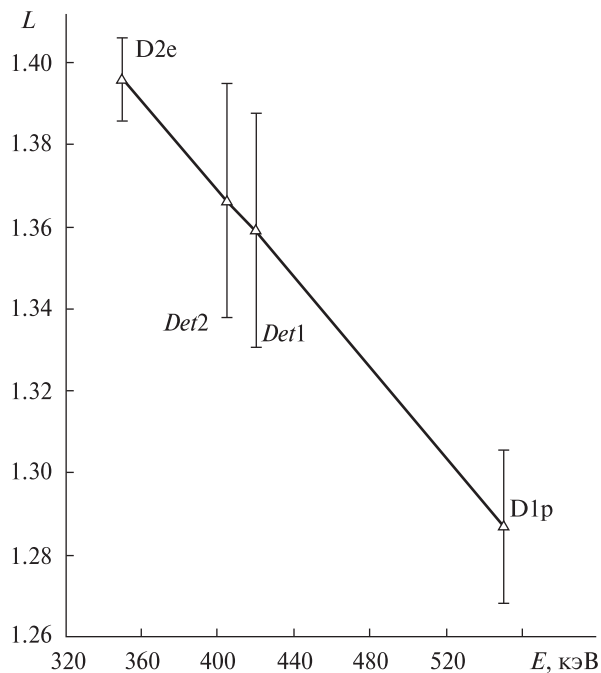


Рис. 4. Зависимость значений L -оболочек с максимальными значениями потоков частиц в БМА от их энергии E для восходящих узлов четвертых витков орбиты КА с 1 по 14 мая 2009 г.

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	Det1	Det2
1	1.41	1.32	1.41	1.41
2	1.4	1.31	—	—
3	1.41	1.3	1.38	1.38
4	1.4	1.31	1.37	1.37
5	1.39	1.3	1.39	1.39
6	1.4	1.29	1.37	1.4
7	1.39	1.28	1.385	1.36
8	1.4	1.29	1.34	1.4
9	1.39	1.28	1.36	1.36
10	1.38	1.27	1.35	1.35
11	1.39	1.27	1.34	1.34
12	1.41	1.27	1.32	1.35
13	1.39	1.26	1.33	1.33
14	1.38	1.27	1.32	1.32
Среднее значение	1.396 ±0.01	1.287 ±0.018	1.359 ±0.028	1.366 ±0.028

каковым был день 11 мая. Ранее [2] указывалось на наличие дополнительного внутреннего пояса электронов, наблюдавшегося в энергетическом диапазоне $\Delta E = 0.18-0.51$ МэВ в северном полушарии на 8–12-м витках восходящих узлов орбиты КА во время максимума слабой магнитной бури 8 мая 2009 г. вне области БМА. Распределение внутри БМА (рис. 3) подтверждает наличие дополнительного внутреннего пояса.

Рис. 3 также демонстрирует хорошее совпадение профилей интенсивностей частиц, отображенных в канале D4e и отвечающем за регистрацию вторичного γ -излучения, и в каналах Det1 и Det2, что является еще одним аргументом в пользу регистрации последними двумя датчиками дополнительного компонента в виде вторичного γ -излучения низких энергий. Отчетливо заметно изменение соотношений в загрузках этих каналов при переходе от значений $L \sim 1.5$ до $L \sim 2.5$. 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. Изменение соотношений плотностей потоков электронов в каналах D2e и D1p на $L = 2-2.5$ подтверждает этот вывод.

В табл. 2 приведены значения L -оболочек, на которых были зарегистрированы максимумы интенсивностей частиц в период с 1 по 14 мая 2009 г. для четырех каналов обоих приборов. При этом для каналов D2e и D1p в анализ принимались пики интенсивности частиц при меньших значениях L -оболочек, так как для таких оболочек относительные значения магнитного поля Земли $B/B_0 < 2$. Для таких малых значений B/B_0 потоки частиц более изотропны, чем для значений $B/B_0 > 2$ ($L > 1.6$), и 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.

На рис. 4 представлен график зависимости L -оболочек, на которых наблюдались максимумы потоков частиц, от энергии электронов с при-

вязкой 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 420 кэВ для *Det1* и 405 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 ко дню. Соответственно изменяются и значения E_{thr1} и E_{thr2} . Так, если для 1 мая $E_{thr1} = E_{thr2} \approx 350$ кэВ, то для 12 мая $E_{thr1} = 425$ кэВ, $E_{thr2} \approx 465$ кэВ.

Ввиду долгой прецессии орбиты КА интенсивности счета в каждом канале изменяются ото дня ко дню. Относительный временной ход потоков в разных энергетических окнах может показать изменение спектральных составляющих по мере изменения относительной величины магнитного поля B/B_0 . В качестве реперного канала был выбран канал D2e прибора СТЭП-Ф, наиболее близкий по пороговой энергии для датчиков *Det1* и *Det2* прибора SphinX в случае рассмотрения процессов внутри БМА. Кривая D4e/D2e временного хода отношений максимальных значений потоков частиц внутри БМА к максимальным значениям потоков в канале D2e (рис. 5) показывает увеличение вклада высокоэнергетической части спектра электронов в период с 1 по 14 мая. Такое же увеличение наблюдается и на кривой *Det2/D2e*, что подтверждает, с одной стороны, вывод о вкладе в регистрацию потоков детекторами *Det1* и *Det2* дополнительного компонента в виде вторичных γ -квантов от первичных электронов средних и высоких энергий, а с другой — также указывает на изменение формы спектра первичных электронов в сторону его более жесткого характера. Соответственно вклад вторичных γ -квантов в число счетов каждого из детекторов прибора SphinX возрастает с уменьшением величины B/B_0 , т. е. с приближением к центру магнитной аномалии.

Особенности распределений частиц в РП. В радиационных поясах Земли потоки частиц на высоте полета КА КОРОНАС-ФОТОН значительно меньше, чем в БМА, поэтому появилась возможность привлечь к анализу канал D1e, который

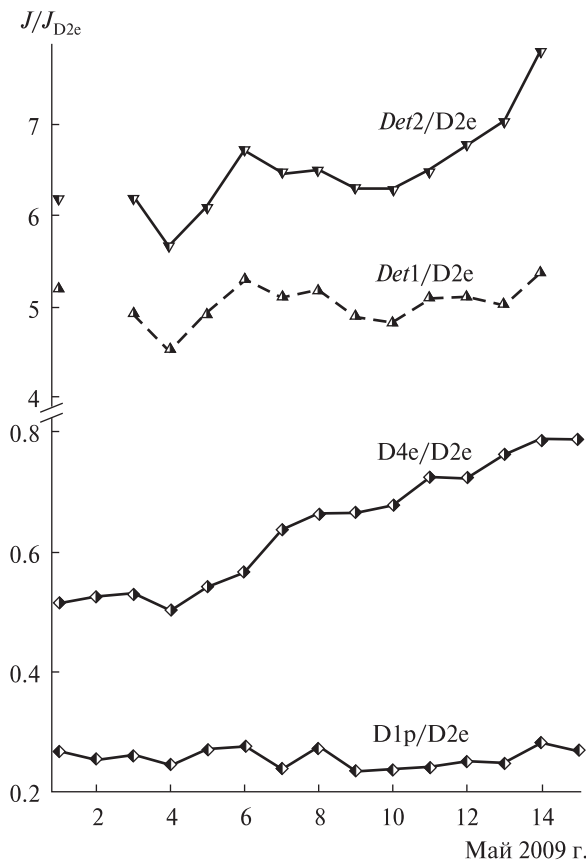


Рис. 5. Вариации отношений максимальных значений J потоков частиц в БМА в четырех энергетических каналах обоих приборов к максимальным значениям потоков J_{D2e} в канале D2e

имел ограничения по темпу счета при больших темпах счета. Сравнение распределений интенсивностей в каналах регистрации обоих приборов вне области 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 похожими.

На рис. 6 показаны распределения интенсивностей частиц в каналах регистрации обоих приборов в северном полушарии 8 мая (рис. 6, а) и изменений этих распределений в каналах *Det1* и *Det2* прибора SphinX в южном полушарии 3 и 9 мая (рис. 6, б).

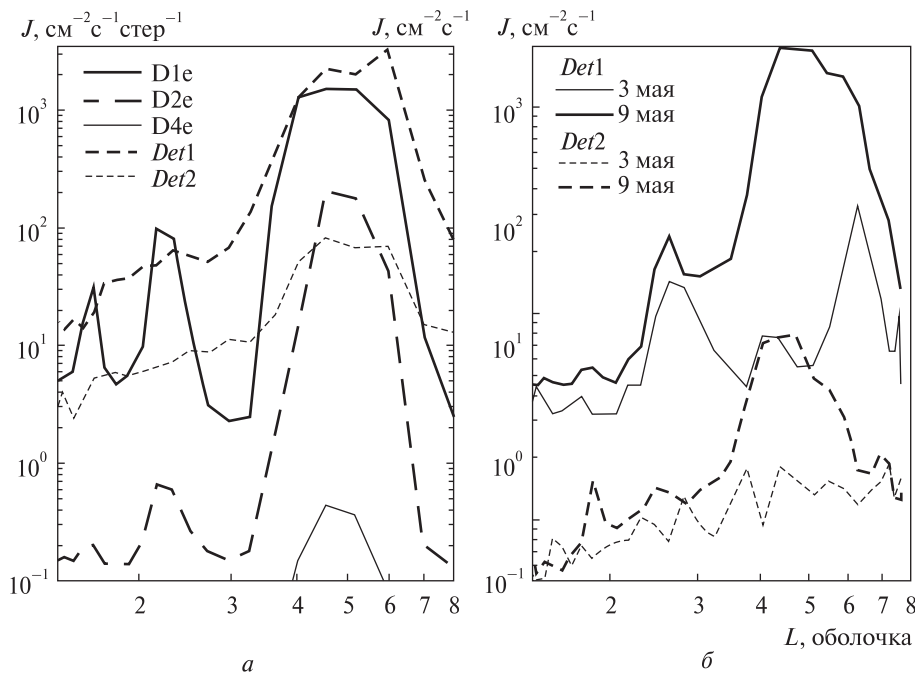


Рис. 6. а — распределение по L -оболочкам потоков частиц в РП в северном полушарии на девятом с начала суток восходящем узле орбиты КА в пяти каналах регистрации обоих приборов 8 мая; б — распределение по L -оболочкам потоков частиц в РП в южном полушарии на первом нисходящем узле орбиты КА 3 и 9 мая в каналах $Def1$ и $Def2$

Из рис. 6, а видно, что прибор СТЭП-Ф регистрирует три электронных пояса в двух энергетических каналах, причем электроны третьего дополнительного пояса [2] 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 $Def1$, однако чувствительности прибора недостаточно для надежной регистрации РП. Второй причиной, по которой не видно в явном виде внутренние РП в обоих каналах, может быть различие углов обзора двух приборов, вследствие чего узконаправленные потоки электронов попадают в углы обзора в разные временные промежутки. 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. 6, б показывает, что прибор регистрирует внутренний РП датчиком $Def1$ как в магнитоспокойный период, так в на-

чальной фазе восстановления магнитной бури. Видно также, что темпы счета в канале $Def2$ и чувствительность к изменениям потоков значительно ниже, чем в канале $Def1$, что еще раз подтверждает вывод о регистрации этим каналом более высокоэнергетического компонента в спектре электронов. Таким образом, прибор Sphinx, имея более узкий угол зрения по сравнению с прибором СТЭП-Ф, надежно регистрирует узконаправленные потоки электронов как внешнего, так и внутреннего РП, отслеживая динамику потоков как по интенсивности, так по радиальным относительно поверхности Земли распределениям.

Радиальная диффузия электронов промежуточных энергий во внешнем РП. Энергетический спектр электронов в РП значительно мягче спектра в БМА. В этом случае значения E_{thr1} и E_{thr2} для внешнего РП должны быть иными в сравнении с такими же значениями для БМА. С целью определения E_{thr1} и E_{thr2} 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 *Def1* и *Def2* прибора SphinX, 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} и E_{thr2} .

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 радиальной диффузии электронов на скачках магнитного поля Земли во время максимума развития и начальной фазы восстановления бури. Многочисленные спутниковые эксперименты показывают, что величина смещения ΔL обратно пропорциональна энергии первичных электронов [12]. Определив ΔL из данных *Def1* и *Def2*, и сопоставив с аналогичными результатами каналов регистрации прибора СТЭП-Ф, можно независимым методом оценить значения E_{thr1} и E_{thr2} .

На рис. 7 представлены совмещенные результаты анализа данных, полученных для девятых с начала суток восходящих узлов орбиты КА в северном полушарии. Значительный разброс значений L -оболочек (левая шкала оси OY рис. 7) 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 OY рис. 7) невозможно определить, поскольку в анализ привлечены данные только одной магнитной бури. Вследствие этого на графике имеются два отрицательных значения $(\Delta L)_4 = -0.15$ и $(\Delta L)_5 = -0.22$. Очевидно, применимыми к анализу являются величины ΔL , для которых верно $\Delta L \geq 0.25-0.3$. Величина $(\Delta L)_3 = 0.41$, полученная из анализа данных канала D1e, в таком случае является достоверной. Тогда наклон спада кривой зависимости ΔL от энергии электронов определяется в большей степени точками $(\Delta L)_1 = 0.95$ (*Def1*), $(\Delta L)_2 = 0.84$ (*Def2*) и

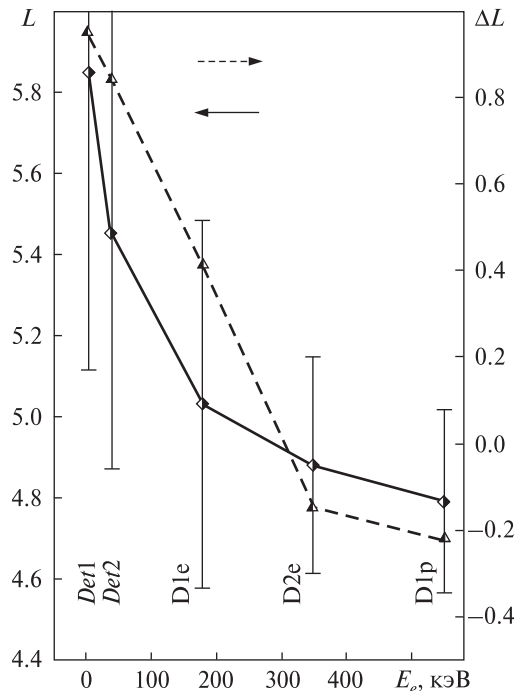


Рис. 7. Зависимость усредненных за период с 1 по 14 мая 2009 г. значений L -оболочек с максимальными потоками частиц во внешнем РП (левая шкала) от их энергии для восходящих узлов девятых с начала суток витков в северном полушарии (сплошная линия). Пунктирная линия (шкала справа) — зависимость от энергии электронов наибольших смещений максимальных потоков на величину ΔL 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

$(\Delta L)_3 = 0.41$ (D1e), чем точками $(\Delta L)_3 = 0.41$ (D1e) и $(\Delta L)_4 = -0.15$ (D2e), поскольку последняя точка не является достоверной и означает отсутствие радиальной диффузии электронов с энергией $E_e \geq 350$ кэВ для данной рассматриваемой слабой магнитной бури.

В итоге анализ обоих графиков на рис. 7 дает значения $E_{thr1} \approx 5$ кэВ и $E_{thr2} \approx 40$ кэВ. Как уже указывалось выше, детектор *Def2* дополнительно закрыт двойной пластиной из тантала общей толщиной 400 мкм с сохранением открытого входного окна площадью $4.9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. При такой толщине защитного слоя вещества с плотностью $\rho = 16.65 \text{ г/см}^3$ и зарядом $Z = 73$ до активного слоя детекторов должны доходить электроны с

энергиями $E_c \geq 1.2$ 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 примерно в десять раз меньше, чем для БМА, указывает на мягкий характер спектра в РП. Значение E_{thr2} также понижает часть потока электронов низкой энергии, входящая в открытое окно площадью $4.9 \cdot 10^{-3}$ см² и регистрируемая прямым способом активным слоем фотодиода. Вклад электронов прямой регистрации в общую загрузку детектора *Det1* значительно выше, однако наличие гамма-квантов очень низкой энергии нельзя исключать, исходя из значительных темпов счета при узком поле зрения. Таким образом, зная величины E_{thr1} и E_{thr2} , можно оценивать характер энергетического спектра первичных электронов в той или иной части магнитосферы Земли. В свою очередь, форма и наклон спектра может указывать на преимущественную регистрацию захваченных, квазизахваченных и 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 электронов низкой энергии и ультрарелятивистских электронов в области Бразильской магнитной аномалии и внешнего радиационного пояса в окрестности слабой геомагнитной бури. Старшие каналы энергетических спектрометров прибора SphinX содержат в себе информацию о потоках частиц низких и средних энергий. При этом в записях числа частиц с избранным временным разрешением есть вклад как прямой регистрации электронов активными слоями фотодиодов большой площади, так и регистрации вторичных гамма-квантов различных энергий, родившихся в конструкционных материалах прибора, обсерватории ТЕСИС и самого космического аппарата. Определены эффективные пороговые значения энергий регистрации электронов де-

текторами *Det1* и *Det2* прибора SphinX, которые составили $E_{thr1} \approx 420$ кэВ и $E_{thr2} \approx 405$ кэВ для области Бразильской магнитной аномалии, и $E_{thr1} \approx 5$ кэВ и $E_{thr2} \approx 40$ кэВ для внешнего радиационного пояса Земли.

Сравнительный анализ временного хода потоков частиц по данным каналов регистрации обоих приборов позволил обнаружить узконаправленные пучки электронов в радиационных поясах Земли, в то время как в области Бразильской аномалии есть электроны с разнымиpitch-углами, т. е. на высоте 550 км их распределение носит более изотропный характер. Экспериментальное определение смещений ΔL 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 предбуриевой период позволил определить зависимость величин ΔL 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, зная величины 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 красные спрайты, эльфы и голубые джеты, связь с грозовой активностью, уменьшив разрешающее время регистрации до минимально возможного.

Работа выполнена при поддержке Программы FP7/2007-2013 Еврокомиссии, Грант № 218816 (Проект SOTERIA, www.soteria.space.eu), а также Министерства Образования и Науки Республики Польша, Контракт № 203 381736.

1. Дудник А. В. Вариации потоков электронов в радиационных поясах Земли в мае 2009 года по наблюдениям с помощью прибора «СТЭП-Ф» // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. фіз. «Ядра, частинки, поля». — 2010. — Вип. 3/47 (№ 916). — С. 56—66.
2. Дудник А. В. Исследование радиационных поясов Земли в мае 2009 года на низкоорбитальном спутнике с помощью прибора СТЭП-Ф // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 5. — С. 12—28.
3. Дудник А. В., Персиков В. К., Боуер Д. и др. Экспериментальные возможности спектрометра-телескопа СТЭП-Ф и первые результаты радиационного картографирования // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН: Тр. раб. сов. — М., 2010. — С. 217—228.
4. Arkhangel'skaja I. V., Amandjolova D. B., Arkhangel'sky 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 // Solar System Res. — 2008. — 42, N 6. — P. 536—542.
5. 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 // Solar System Res. — 2011. — 45, N 3. — P. 212—220.
6. Dudnik O. V., Goka T., Matsumoto H., et al. Computer simulation and calibration of the charge particle spectrometer-telescope STEP-F // Adv. Space Res. — 2003. — 32, N 11. — P. 2367—2372.
7. Gburek S., Siarkowski M., Kepa A., et al. Soft X-ray variability over the present minimum of Solar activity as observed by SphinX // Solar System Res. — 2011. — 45, N 2. — P. 182—187.
8. Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M. et al. SphinX soft X-ray spectrophotometer: science objectives, design and performance // Solar System Res. — 2011. — 45, N 3. — P. 189—199.
9. 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. — 42, N 5. — P. 596—603.
10. Huang Jian-Beng, Liu Jing, Ou Yang Xin-Yan, Li Wen-Jing. Analysis to the energetic particles around the m8.8 Chili Earthquake // Seismol. and Geology. — 2010. — 32, N 3. — P. 417—424.
11. Kotov Yu. D. Scientific goals and observational capabilities of the CORONAS-PHOTON solar satellite project // Solar System Res. — 2011. — 45, N 2. — P. 93—96.
12. 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 // Solar System Res. — 2007. — 41, N 4. — P. 338—348.
13. Sgrigna V., Carota L., Conti L. et al. Correlations between Earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2005. — 67, N 15. — P. 1448—1462.
14. Sylwester J., Kuzin S., Kotov Yu. D., et al. A Fast Solar Photometer in X-rays // J. Astrophys. and Astron. — 2008. — 29, N 1-2. — P. 339—343.

Надійшла до редакції 24.05.11

O. V. Dudnik, P. Podgorski, J. Sylwester, S. Gburek, M. Kowalinski, M. Siarkowski, S. Plocieniak, J. Bakala

INVESTIGATION OF ELECTRON BELTS IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE WITH THE HELP OF X-RAY SPECTROPHOTOMETER SPHINX AND SATELLITE TELESCOPE OF ELECTRONS AND PROTONS STEP-F: PRELIMINARY RESULTS

High-energy particles abundant in the Earth's magnetosphere contribute to signals measured by instruments aboard the CORONAS-PHOTON satellite placed in low polar orbit. Among the instruments in the science payload was the Solar Photometer in X-rays (SphinX). Within this instrument, a particle signal originates due to penetration of high-energy electrons and secondary gamma quanta into the detectors. These particle signals need to be absolutely calibrated in detail to perform their analysis. For this, some measurements of the specially elaborated particle spectrometer STEP-F were used. The STEP-F instrument was located in close proximity to the SphinX instrument and its field of view was directed perpendicularly to the SphinX field of view. It is shown that the SphinX and STEP-F detectors provide nearly identical signal profiles during crossing the Brazilian Magnetic Anomaly and substantial correspondence when crossing the Earth's radiation belts. Extended understanding of the correspondence between SphinX and STEP-F are necessary taking into account the secondary gamma ray emission arising from the construction materials of the detector head, the TESIS Observatory and the spacecraft itself. The dynamics of signals caused by high-energy electrons measured by SphinX during a weak geomagnetic storm is found to reflect the processes of radial and pitch-angle diffusion of electrons.