

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА БОРТУ ОБСЕРВАТОРИИ «КОРОНАС-Ф»
В РАМКАХ РОССИЙСКО-БОЛГАРСКОГО ПРОЕКТА «ИСТОЧНИКИ
СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ
ИЛИ КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ?»**

Андрей Богомолов, Ирина Мягкова

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского
государственного университета имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Россия
e-mail: aabboogg@sinp.msu.ru*

Ключевые слова: Солнечные вспышки, жесткое рентгеновское излучение, гамма-излучение, космические эксперименты

На сегодняшний день нет однозначного ответа на очень важный вопрос: происходит ли ускорение заряженных частиц, наблюдаемых во время солнечных протонных событий (СПС), во время вспышек на Солнце или же на ударных волнах, порождаемых корональными выбросами массы (КВМ), или оба эти механизма вносят свой вклад в разной степени. В рамках российско-болгарского проекта «Источники солнечных космических лучей: солнечные вспышки или выбросы корональной массы?» предлагается рассмотреть этот вопрос с использованием статистического анализа наблюдательных данных о СПС и связанных с ними явлениях и сделать вывод о численном соотношении вклада вспышек и КВМ в продолжительность и геоэффективность СПС. В качестве экспериментальных данных о жестком рентгеновском и гамма-излучении солнечных вспышек можно использовать информацию с космической обсерватории «КОРОНАС-Ф», функционировавшей на околоземной орбите с 2001 по 2005 годы. Сцинтилляционными спектрометрами СОНГ (гамма-излучение в диапазоне энергий 0.03-200 МэВ) и СПР-Н (жесткое рентгеновское излучение в диапазоне энергий 15-100 кэВ), установленными на борту «КОРОНАС-Ф», было зарегистрировано более ста вспышек. Анализ вспышек, наиболее интересных с точки зрения проекта, в том числе событий августа 2002 г., октября-ноября 2003 г. и января 2005 г., представлен в данной работе.

**RESULTS OF HARD X-RAY AND GAMMA-RAY OBSERVATIONS ONBOARD
CORONAS-F IN THE FRAMES OF RUSSIAN-BULGARIAN PROJECT
“THE ORIGIN OF SOLAR ENERGETIC PARTICLES: SOLAR FLARES
VS. CORONAL MASS EJECTIONS”**

Andrey Bogomolov, Irina Myagkova

*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University (SINP MSU), Russia
e-mail: aabboogg@sinp.msu.ru*

Keywords: Solar flares, Hard X-rays, Gamma-rays, Space experiments

To the present time, there is no single answer to a very important question: does the acceleration of charged particles observed during the events of solar energetic particles (SEP), occur during solar flares or shock waves generated by coronal mass ejections (CME), or both mechanism contribute to the acceleration in different degrees. In the frames of Russian-Bulgarian project “The origin of solar energetic particles: solar flares vs. coronal mass ejections” it is proposed to consider this problem using statistical analysis of observational data on SEP events and related phenomena and to draw a conclusion about the numerical ratio of the contribution of flares and CMEs to the duration and geoeffectiveness of SEP events. As an experimental data on the hard X-ray and gamma radiation of solar flares, information from the CORONAS-F space observatory operating in the near-Earth orbit from 2001 to 2005 can be used. The scintillation spectrometers SONG (gamma radiation in the energy range 0.03-200 MeV) and SPR-N (hard X-ray radiation in the energy range 15-100 keV) installed onboard the

CORONAS-F, detected more than a hundred solar flares. The analysis of the flares, the most interesting for the project, including the events of August 2002, October-November 2003 and January 2005, is presented in this paper.

Введение

В периоды времени, близкие к максимумам солнечной активности основными факторами космической погоды становятся солнечные вспышки, корональные выбросы массы (КВМ) и солнечные протонные события (СПС). Российско-болгарский проект «Источники солнечных космических лучей: солнечные вспышки или выбросы корональной массы?» ставит своей целью получить ответ на давний вопрос о взаимосвязи этих факторов.

В настоящее время рассматриваются два основных механизма, способных ускорять частицы в космической плазме. Одним из них является процесс магнитного пересоединения во время солнечных вспышек (ускорение с помощью электрических полей). В качестве другого рассматриваются ударные волны (один или несколько ударных фронтов, взаимодействие волна-частица), связанные с корональным выбросом массы (КВМ). Вопрос о том, каков относительный вклад солнечных вспышек и КВМ в ускорение потоков заряженных частиц и какие условия оказывают значительное влияние на данный процесс, до сих пор не решен. Для ответа на него в рамках проекта планируется провести как всестороннее статистическое исследование СПС и связанных с ними явлений, так и детальное изучение отдельных событий, наблюдавшихся в различных экспериментах, регистрирующих рентгеновское и гамма-излучение, радиоизлучение, микроволновое излучение, потоки заряженных частиц, а также анализ топологии магнитного поля с использованием 3D методов экстраполяции.

В качестве данных о жестком рентгеновском и гамма-излучении солнечных вспышек и о потоках заряженных частиц в околоземном космическом пространстве возможно использовать результаты экспериментов на российской орбитальной обсерватории КОРОНАС-Ф, работавшей в 2001-2005 г., т.е. во время максимума 23-го цикла солнечной активности.

Эксперимент

Искусственный спутник Земли (ИСЗ) «КОРОНАС-Ф» был запущен 31 июля 2001 г. на квазикруговую орбиту с наклоном 82.5° , периодом обращения 94.5 мин. и высотой 507 ± 21 км (к концу полета его орбита снизилась до ~ 300 км). Космический аппарат прекратил существование 6 декабря 2005 г. Основные задачи миссии «КОРОНАС-Ф» - исследование нестационарных процессов на Солнце и их воздействия на межпланетную среду и магнитосферу Земли.

Для изучения нейтрального излучения солнечных вспышек на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» в НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН и ИЭФ САН были разработаны и установлены приборы СПР-Н для регистрации рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне 15-100 кэВ и измерения его линейной поляризации [1,6,8] и СОНГ для регистрации жесткого рентгеновского излучения, гамма-излучения в линиях и континууме, а также потоков нейтронов и релятивистских электронов [9,10].

Прибор СОНГ (Солнечные Нейтроны, Гамма-кванты) предназначен для регистрации потоков и спектров гамма-квантов с энергиями 0.03-200 МэВ, потоков и спектров энерговыделений нейтронов с энергиями > 20 МэВ, потоков и спектров электронов с энергиями 11-108 МэВ, потоков протонов с энергиями 200-300 МэВ и суммарных потоков электронов с энергиями >55 МэВ и протонов с энергиями >70 МэВ. Для записи показаний прибора используется 14 цифровых телеметрических каналов с частотой опроса 1 раз в 4 или в 1 с.

Прибор СОНГ состоит из одного блока, внутри которого установлены детекторы излучений, схемы отбора и анализа событий, устройства формирования импульсов, преобразователи напряжения для питания детекторов и электроники. Схема детектора прибора представлена на Рис. 1 (правая панель).

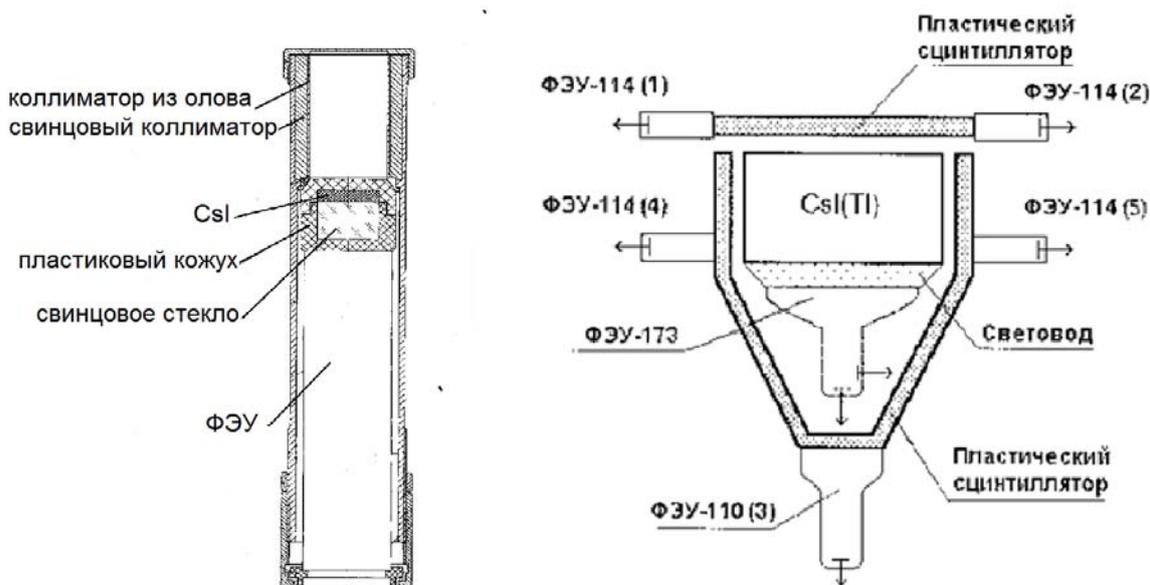


Рис. 1. Схема детекторов приборов СПР-Н (слева) и СОНГ (справа)

Регистрация частиц осуществляется сцинтилляционным счетчиком, состоящим из кристалла CsI(Tl) диаметром 200 мм и высотой 100 мм, просматриваемым ФЭУ-173. Для защиты от заряженных частиц этот сцинтилляционный счетчик со всех сторон окружен активной антисовпадательной защитой, которая состоит из двух частей. Нижняя – усеченный конус и цилиндр, которые находятся в оптическом контакте; эта часть выполнена из пластикового сцинтиллятора с толщиной стенок 20 мм и защищает основной счетчик снизу и сбоку. Усеченный конус просматривается снизу ФЭУ-110; цилиндр просматривается сбоку с двух диаметрально противоположных сторон двумя ФЭУ-114. Верхняя часть – диск также из пластикового сцинтиллятора толщиной 10 мм, который просматривается двумя ФЭУ-114 с двух диаметрально противоположных сторон. Этот сцинтиллятор защищает основной детектор сверху и, кроме того, вместе с ним образует телескоп для регистрации электронов. Суммарная экранировка основного счетчика – не менее 1.3 г см^{-2} , верхнего антисовпадательного диска – 0.05 г см^{-2} [9,10].

Прибор СПР-Н был разработан прежде всего для измерения поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек с целью изучения механизма первичного выделения энергии во вспышке - в первую очередь для оценки относительной роли при этом нетепловых и тепловых процессов. С основными результатами измерения поляризации можно ознакомиться, например, в [8]. Помимо узла детекторов поляризации в состав прибора СПР-Н входил патрульный детектор, позволявший детально измерять временной профиль интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне энергий 15-100 кэВ, определять величину потока и давать оценку жесткости спектра в указанном диапазоне энергий. Именно показания патрульного детектора СПР-Н предполагается использовать в работах по проекту, упомянутому выше, поэтому на его устройстве остановимся подробнее.

Схема патрульного детектора прибора СПР-Н изображена на левой панели рис. 1. Рентгеновское излучение регистрируется кристаллом CsI(Na) диаметром 1.5 см и толщиной 0.3 см, над которым расположен цилиндрический коллиматор, обеспечивающий достаточно узкое поле зрения детектора – в пределах $5^\circ \times 5^\circ$. Для защиты от рентгеновского излучения, идущего от космического аппарата, под кристаллом CsI(Na) расположено свинцовое стекло толщиной 0.5 см. Для исключения регистрации заряженных частиц кристалл CsI(Na) вместе со свинцовым стеклом помещен в экран антисовпадений из пластмассового сцинтиллятора, при этом оба сцинтиллятора просматриваются одним фотоумножителем (ФЭУ-54, диаметр фотокатода 2 см).

В ходе всего эксперимента с прибором СПР-Н, начавшегося 15 августа 2001 г. в ~13 ч 30 мин UT, прибор работал в мониторинговом режиме непрерывных измерений. Выходными параметрами патрульного детектора прибора СПР-Н являются скорости счета в каналах 15-40 и 40-100 кэВ, а также скорость счета антисовпадательного колпака из пластикового сцинтиллятора. Временное разрешение для патрульного детектора прибора определялось временем экспозиции, которое, как правило, было равно 4 секунды. Также была предусмотрена

передача специальных «патрульных» массивов, содержащих только данные патрульного детектора с временным разрешением, в 8 раз меньшим, чем время экспозиции.

Наряду с детекторами жесткого рентгеновского и гамма-излучения в состав научной аппаратуры, установленной на обсерватории «КОРОНАС-Ф» входил прибор МКЛ [9,11], предназначенный для регистрации заряженных частиц:

- спектров и потоков протонов в энергетическом диапазоне 1-90 МэВ;
- спектров и потоков электронов в энергетическом диапазоне 0,5-12 МэВ;
- потоков альфа-частиц с энергиями 100-140 МэВ;
- потоков электронов с энергией >1 МэВ;
- потоков протонов с энергией >10 МэВ;
- суммарных потоков электронов с энергией >1,6 МэВ и протонов с энергией >23 МэВ.
- суммарных потоков электронов с энергией >1,6 МэВ и протонов с энергией >90 МэВ.

Прибор был рассчитан на регистрацию потоков до $2 \times 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Детекторная часть прибора состоит из двух телескопических систем. Функциональная схема прибора приведена на рис. 2. Измерения потоков протонов с энергиями 23-90 МэВ, альфа-частиц с энергиями 100-140 МэВ, а также потоков электронов с $E_e > 1,6 \text{ МэВ}$ и протонов с $E_p > 90 \text{ МэВ}$ производятся при помощи телескопической системы, схема которой приведена в верхней левой части рис.2. Сцинтилляционный детектор Дт.1 - часть сферического слоя из пластического сцинтиллятора на основе полистирола, ограниченная конусом с вершиной в центре сферы и углом раствора 140° . Толщина слоя $\sim 4,0 \text{ мм}$, его радиус 40 мм . В центре сферы расположен полупроводниковый детектор Дт.2, диаметр которого 12 мм и толщина 2 мм . Для идентификации частиц и определения их энергии используется их удельная ионизация при движении в рассматриваемой системе.

Для измерений потоков электронов с $E_e = 0,5 - 1,0 \text{ МэВ}$, протонов с $E_p = 14-26 \text{ МэВ}$ и протонов с $E_p > 10 \text{ МэВ}$ используется полусферический слой сцинтиллятора Дт.1 как одиночный детектор. Геометрический фактор детектора $\sim 30 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$. Порог дискриминации протонов с $E_p = 14-26 \text{ МэВ}$ выбран равным $\sim 10 \text{ МэВ}$.

Для измерения спектров потоков электронов с $E_e = 0,5-12 \text{ МэВ}$ и потоков протонов с $E_p = 1-5 \text{ МэВ}$ используется телескопическая система, состоящая из трех счетчиков (правая часть рис. 3). Дт.3 - тонкий проходной n-p-детектор диаметром $\sim 10 \text{ мм}$ и толщиной 50 мкм ; Дт.4 - толстый проходной n-p-детектор диаметром 12 мм и толщиной 2000 мкм , Дт.5 - составной сцинтилляционный детектор типа фосвич. Он состоит из кристалла CsJ диаметром и высотой 10 мм . Для защиты от проникающих сбоку и снизу частиц он окружен слоем из пластического сцинтиллятора толщиной 10 мм . Оба сцинтиллятора просматриваются одним ФЭУ-84. Разделение событий (световых вспышек при прохождении заряженных частиц), происходящих в кристалле и пластическом сцинтилляторе, производится по различию во временах высвечивания электронной схемой разделения. События в пластическом сцинтилляторе запрещают дальнейшую обработку сигнала. Для защиты от света над телескопом помещена алюминиевая фольга толщиной 10 мкм . Входная апертура телескопа ограничена коллиматором из алюминия, угол раствора которого $\sim 60^\circ$. Геометрический фактор системы $\sim 0,5 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$.

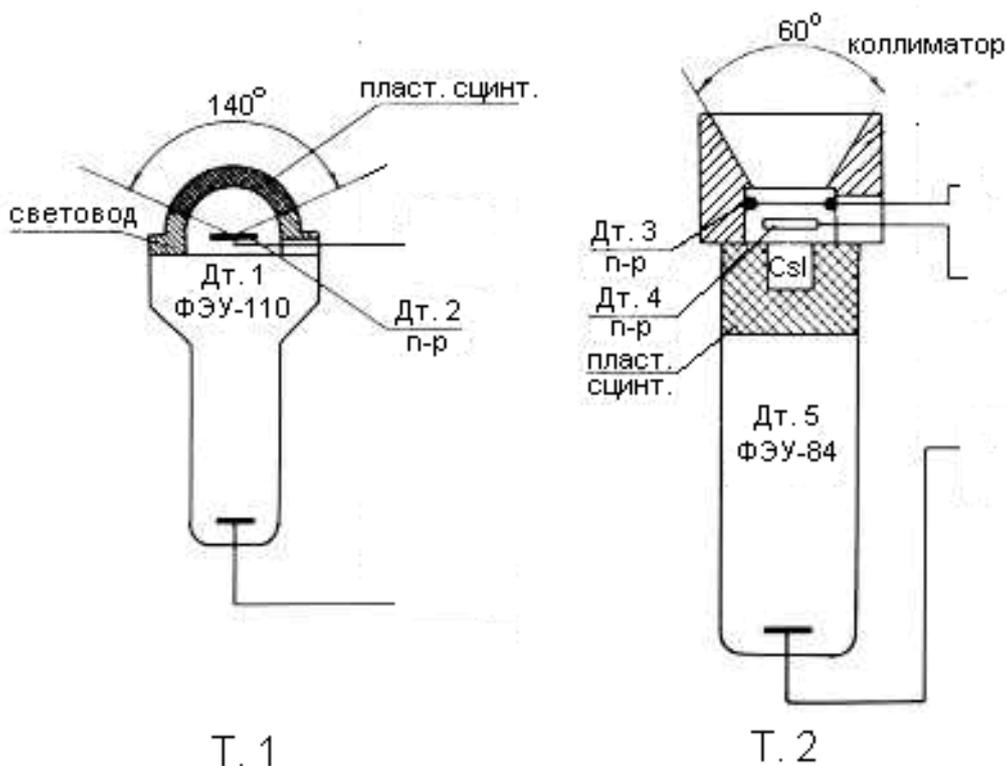


Рис. 2. Схема детектора прибора МКЛ

Результаты

За время полёта прибором СОНГ было зарегистрировано 105 вспышек с гамма-излучением более 50 кэВ. Среди них 38 вспышек с гамма-излучением более 500 кэВ. В 4-х событиях наблюдалось гамма-излучение с энергией более 100 МэВ. Каталог событий, детектированных в жестком рентгеновском излучении прибором СПР-Н, составляет 158 вспышек, многие из которых довольно слабые и не были видны прибором СОНГ. Наиболее мощные из наблюдавшихся событий – вспышки 25.08.2001г., 28.10.2003г., 29.10.2003г., 04.11.2003г. и 20.01.2005г. В трех из этих вспышек (25 августа, 28 октября и 4 ноября) был зарегистрирован значимый поток нейтронов [4].

Особого внимания заслуживает наблюдение жесткого рентгеновского и гамма-излучения во время серии вспышек, происходивших в одной и той же активной области (АО). За время работы обсерватории «КОРОНАС-Ф» таких серий было несколько. Прежде всего это экстремальные события конца октября – начала ноября 2003 г. [5]. Во вспышках 28.10.2003 г. 4.11.2003 г. имели место прямая регистрация солнечных нейтронов и гамма-излучения с энергией более сотни МэВ. Вместе с тем, в мощной вспышке 29.10.2003 г. был измерен существенно более мягкий спектр, хотя она фактически имела те же координаты на солнечном диске и произошла в той же области. Кроме того, измерения с помощью поляризационных детекторов СПР-Н дали указание на то, что излучение в этой вспышке было сильно поляризовано, в отличие от других вспышек из этой области, похожих по классу [6]. Установление причин такого различия важно для понимания процессов ускорения во вспышках.

Серии вспышек, из одной и той же АО, наблюдались также в августе 2002 г. и в январе 2005 г.. Вспышкам, произошедшим в АО 0069, посвящена работа [2], в которой исследовалась динамика задержек микроволнового излучения относительно жесткого рентгеновского излучения. Среди событий января 2005 года особо следует выделить вспышку 20.01.2005 г. – одну из пяти самых мощных, наблюдавшихся на спутнике «КОРОНАС-Ф». Для неё была проведена работа по разделению теплового и нетеплового компонентов спектра [3]. Было получено, что в этом событии 20.01.2005 г. суммарная кинетическая энергия электронов была близка к тепловой ($\sim 2 \cdot 10^{30}$ эрг) во время импульсной фазы вспышки и заметно меньше ее в начале события, следовательно, именно электроны, ускоренные в импульсной стадии вспышки, обеспечили основной нагрев плазмы.

Для исследований в рамках российско-болгарского проекта, посвященного взаимосвязи СПС с параметрами вспышек и СМЕ, необходим анализ событий, в которых наблюдалось как вспыхивающее нейтральное излучение, так и возрастания потоков протонов. Притом данные по вспышкам должны содержать не только жесткое гамма-излучение, но также радиоизлучение, микроволновое излучение, показания спутников серии GOES по мягкому гамма-излучению. В связи с этим были отобраны 6 вспышек, временные профили которых приведены на рис. 3.

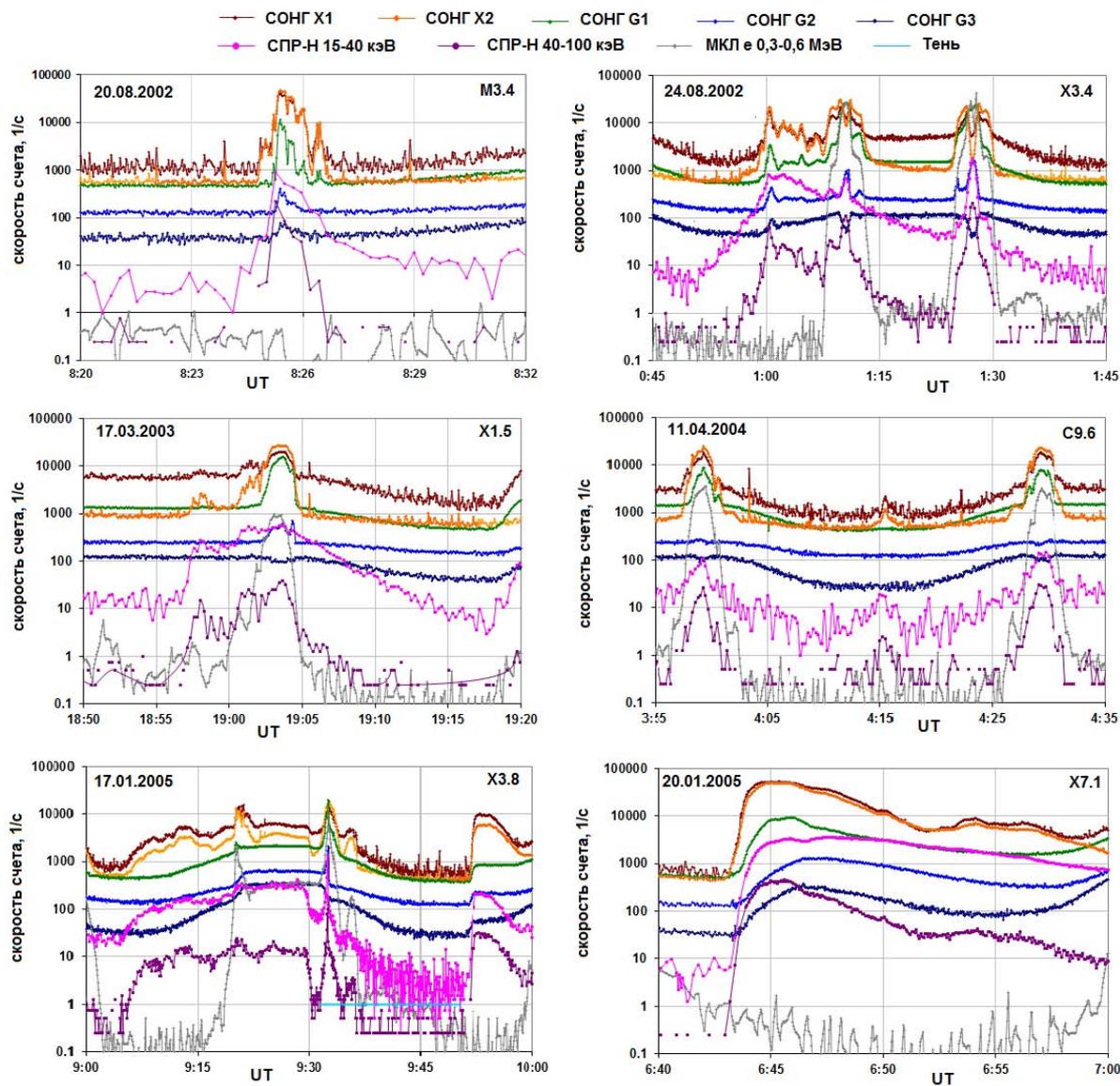


Рис. 4. Примеры наблюдения жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек приборами СОНГ и СПР-Н, установленными на борту обсерватории «КОРОНАС-Ф»

Энергетические каналы СОНГ X1, X2, G1, G2 и G3 в начале эксперимента имели значения: 0.03-0.06, 0.06-0.15, 0.15-0.5, 0.5-1.5 и 1.5-4 МэВ, соответственно. В течение полета значения порогов медленно увеличивались, к концу 2005 года отличие составило примерно полтора раза. Для понимания природы повышенных потоков гамма-излучения, измеренных на околоземной полярной орбите, очень важно проводить одновременные измерения электронов. На спутнике «КОРОНАС-Ф» для этого можно использовать данные прибора МКЛ. Серые кривые на рис.3 показывают области пересечения внешнего радиационного пояса Земли.

Среди показанных событий есть как мощные, так и сравнительно слабые. Например, вспышка 11 апреля 2004 г. имела класс всего C9.6. Тем не менее, от неё также наблюдалось СПС. А во вспышке 20.08.2002 г. класса M3.4 наблюдалось гамма-излучение с энергией более 5 МэВ. С другой стороны, прибором СОНГ было зарегистрировано гамма-излучение высоких энергий в ряде центральных и западных вспышек, не сопровождавшихся приходом протонов.

Всё это свидетельствует о неоднозначной связи между классом вспышки по мягкому рентгеновскому излучению и процессами, приводящими к ускорению протонов и к генерации вспышечного гамма-излучения. В статистических исследованиях связи различных факторов космической погоды имеет смысл использовать отдельно показатели мягкого (GOES) и жесткого рентгеновского и гамма-излучения. В качестве последнего можно предложить оценочные значения показателя гамма степенного спектра, которые могут быть получены по данным СОНГ, а также соотношения скоростей счета каналов. Также можно использовать коэффициенты, полученные отдельно для фаз роста и спада вспышечного излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-52-18050 Болг_а.

Литература:

1. Bogomolov, A. V., Denisov, Y. I., Kuznetsov, S. N., et al. Hard x-ray radiation from solar flares in the second half of 2001: Preliminary results of the SPR-N experiment onboard the CORONAS-F satellite. *Solar System Research* 37(2), 2003, pp.112–120. DOI: 10.1023/A:1023332408371
2. Bogomolov, A. V., Kashapova, L. K., Myagkova, I. N., and Tsap, Y. T. Dynamics of the hard x-ray, gamma-ray, and microwave emission of solar flares produced by the active region noaa 0069 in august 2002. *Astronomy Reports*, 58(3), 2014, pp.156–166. DOI: 10.1134/S1063772914030020
3. Kurt, V. G., Svertilov, S. I., Yushkov, B. Y., et al. Dynamics and energetics of the thermal and nonthermal components in the solar flare of january 20, 2005, based on data from hard electromagnetic radiation detectors onboard the coronas-f satellite. *Astronomy Letters*, 36(4), 2010. pp.280–291. DOI: 10.1134/S1063773710040067
4. Kuznetsov, S. N., Kurt, V. G., Myagkova, I. N., Yushkov, B. Y., and Kudela, K. Gamma-ray emission and neutrons from solar flares recorded by the song instrument in 2001-2004. *Solar System Research* 40 (2006), 104–110.
5. Veselovsky, I. S., Panasyuk, M. I., Avdyushin, S. I., et al. Solar and heliospheric phenomena in October - November 2003: Causes and effects. *Cosmic Research* 42(5), 2004, pp.438–488. DOI: 10.1023/B:COSM.0000046229.24716.02
6. Zhitnik, I. A., Logachev, Y. I., Bogomolov, A. V., et al. Polarization, temporal, and spectral parameters of solar flare hard x-rays as measured by the SPR-N instrument onboard the CORONAS-F satellite. *Solar System Research* 40(2) 2006, 93–103. DOI: 10.1134/S003809460602002X
7. Богомолов, А. В., Денисов, Ю. И., Логачев, Ю. И. и др. Временные, спектральные и поляризационные характеристики жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, наблюдавшихся в эксперименте СПР-Н на борту орбитальной обсерватории КОРОНАС-Ф. *Известия Российской академии наук. Серия физическая* 67(10), 2003, с.1422–1426.
8. Житник, И. А., Логачев, Ю. И., Богомолов, А. В. и др. Эксперимент с прибором СПР-Н на ИСЗ КОРОНАС-Ф: поляризационные, временные и спектральные характеристики жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. В кн. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*, М., Физматлит, 2009, pp. 128–150.
9. Кузнецов, С. Н., Богомолов, А. В., Галкин, В. И. и др. Комплекс приборов СКЛ. В кн.: *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*, под ред. В.Д.Кузнецова, 2009, М, Физматлит, с.295–307.
10. Кузнецов, С. Н., Курт, В. Г., Юшков, Б. Ю. и др. Ускорение протонов в солнечных вспышках: результаты анализа измерений гамма-излучения и нейтронов прибором СОНГ на ИСЗ КОРОНАС-Ф. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*, М., Физматлит, 2009, с. 308–331.
11. Кузнецов, С. Н., Мягкова, И. Н., Муравьева, Е. А. и др. Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли по данным прибора МКЛ. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*, М., Физматлит, 2009, с. 332–342.