

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Ядерная физика,
лазеры и медицина

Научная сессия Общего собрания Отделения физических наук
Российской академии наук, 14 декабря 2009 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201006g.0647

14 декабря 2009 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Общего собрания Отделения физических наук РАН.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Котов Ю.Д.** (Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт" (МИФИ), Институт астрофизики, Москва). *Высокоэнергичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на российских спутниках КОРОНАС.*

2. **Пахлов П.Н.** (Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, Москва). *Экзотический чармоний.*

3. **Щербаков И.А.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Лазерные и плазменные технологии в медицине.*

4. **Балакин В.Е.** (Физико-технический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Протвино, Московская обл.). *Новое поколение оборудования и технологий для лучевой терапии онкологических заболеваний протонным пучком.*

5. **Кравчук Л.В.** (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *Развитие ядерно-физической медицины в Институте ядерных исследований РАН.*

Статьи, написанные на основе докладов 1, 3 и 5, публикуются ниже. Расширенное содержание доклада Пахлова представлено в виде обзора в *УФН* **180** 225 (2010).

PACS numbers: **07.87.+v**, 95.55.Ev, **96.60.-j**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201006h.0647

Высокоэнергичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на российских спутниках КОРОНАС

Ю.Д. Котов

1. Введение

Солнечные миссии Skylab (1973 г.), SMM (Solar Maximum Mission) (1980 г.), Yohkoh (1991 г.), SOHO (Solar Heliospheric Observatory) (1995 г.) осуществили инструментальную революцию, открыв эру наблюдений солнечных явлений в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах с угловым разрешением в несколько угловых секунд. Наблюдения, выполненные ими, а также последующими спутниками TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) (1998 г.), КОРОНАС-Ф (2001 г.) и RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (2002 г.) подняли на новый уровень понимание плазменных процессов в солнечной короне [1], тепловых и нетепловых процессов при зарождении и развитии вспышечных структур [2, 3], динамики трёхмерного развития процессов в гелиосфере и т.д. [4]. Впечатляющий прогресс в цифровой рентгеновской оптике и спектрометрии, обеспечивающих огромный наблюдательный материал, дающий не только новые сведения профессиональным исследователям, но и новые впечатления широким кругам общественности, а также возросшие благодаря этому возможности наблюдений на ранней стадии корональных выбросов солнечной плазмы в межпланетное пространство привели к тому, что центр тяжести солнечных спутниковых исследований в последние годы сместился в область получения оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских изображений, таких как были получены на недавно запущенных миссиях (Hinode (Япония), STEREO (Solar TERrestrial RELations Observa-

Ю.Д. Котов. Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт", Институт астрофизики, Москва, РФ
E-mail: YDKotov@mephi.ru

tory) (NASA), SDO (Solar Dynamic Observatory) (NASA)) и которые планируется получать на подготавливаемых к запуску (Picard (ESA), Aditya-1 (Индия)) и обсуждаемых в качестве перспективных проектов Solar-C (Япония), Solar Probe (NASA), Solar Orbiter (ESA), "Интергелиозонд" (Россия).

Однако ввиду того что спектр излучений, генерируемых на Солнце в различных электромагнитных и ядерных процессах, охватывает 14 порядков величины, от длинноволнового радиоизлучения до высокоэнергичного гамма-излучения, для получения адекватного набора сведений об энергетических характеристиках и динамике протекающих там процессов необходимо проведение комплексных наблюдений, в том числе с орбитальных аппаратов, как минимум, в диапазоне электромагнитных излучений от жёсткого ультрафиолетового (УФ) до высокоэнергичного гамма-излучения, а также определение элементного, изотопного состава заряженных частиц, выбрасываемых в солнечных активных процессах в межпланетное пространство.

Начиная с 1990-х годов Российская академия наук (Совет РАН по космосу) и Российское космическое агентство осуществляют программу КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активности Солнца) путём создания комплекса научной аппаратуры и проведения наблюдений со специально разрабатываемых околосолнечных космических аппаратов.

Первым из этой программы был спутник КОРОНАС-И, находившийся на околосолнечной орбите с марта 1994 г. по декабрь 2000 г. Вторым стал спутник КОРОНАС-Ф, работавший на орбите с июля 2001 г. по декабрь 2005 г. Головной научной организацией по этим двум спутникам, созданным в конструкторском бюро (КБ) "Южное" (г. Днепропетровск, Украина), являлся Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН). В первом из спутников после непродолжительной работы на орбите по техническим причинам была нарушена работа системы ориентации на Солнце научных приборов и солнечных панелей, что не позволило выполнить на нём все запланированные исследования. На втором спутнике как штатные системы аппарата, так и научные приборы работали всё время его существования на орбите. Высота орбиты составляла около 550 км, наклонение равнялось $82,5^\circ$.

Состав научной аппаратуры спутника КОРОНАС-Ф позволял получить монохроматические изображения с высоким угловым разрешением, измерять потоки и энергетические спектры электромагнитного излучения от ультрафиолетовой области до области гамма-излучения, регистрировать солнечные космические лучи. Основные характеристики научных приборов спутника КОРОНАС-Ф представлены в статье научного руководителя указанного проекта В.Д. Кузнецова в книге [5]. Ряду ведущих специалистов, создававших научную аппаратуру этого проекта, была присуждена Премия правительства Российской Федерации 2008 года в области науки и техники "За создание комплекса научной аппаратуры с новыми информационными каналами регистрации корпускулярного и электромагнитного излучений Солнца, а также за приоритетные результаты наблюдений солнечной активности и её воздействия на Землю со спутника КОРОНАС-Ф".

В книге [5] также представлены статьи, в которых изложены результаты экспериментов, выполненных на указанном спутнике. Наибольшие наблюдательные и информационные ресурсы были предоставлены созданному в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) комплексу СПИРИТ, состоявшему из солнечных рентгеновских телескопов СРТ-К и рентгеновских спектрометров РЕС-К. В приборе РЕС-К впервые был реализован метод многоканальной монохроматической изображающей спектроскопии всего Солнца в рентгеновской и крайней вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области длин волн. Полученная этим комплексом совокупность данных впервые позволяет проследить структуру и динамику плазмы верхней атмосферы Солнца в широком диапазоне параметров: по высоте — от хромосферы до пяти радиусов Солнца, по температуре — от 10 тыс. до 30 млн градусов, по длительности наблюдений явлений — от нескольких секунд до времени нескольких солнечных оборотов, по угловому разрешению — 3–5 угловых секунд. На основании полученных данных были предложены модифицированные модели энерговыделения во вспышках, эффективно работающие в условиях низкой корональной плотности плазмы и находящиеся в хорошем согласии с результатами эксперимента [6].

Важным достоинством приборного состава спутников программы КОРОНАС является комплексность исследований электромагнитных и корпускулярных излучений активных солнечных процессов в энергетическом диапазоне от ВУФ-излучения до гамма-излучения высокой энергии. В проекте КОРОНАС-Ф максимальная зарегистрированная энергия вспышечных гамма-квантов достигала 300 МэВ [7, 8]. Сопоставление времён регистрации гамма-квантов, возникших от распада $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, и энергичных солнечных нейтронов, рождённых ускоренными протонами (ядрами) в атмосфере Солнца, с характерными временами мягкого и линейчатого гамма-излучения позволило сделать вывод о том, что ускорение протонов до энергий ~ 1 ГэВ произошло в области вспышки, а сравнение со временем прихода высокоэнергичных протонов к Земле в этих вспышках позволило заключить, что по крайней мере в трёх мощных вспышках классов X17,2; X28,0 и X7,0 протоны покинули атмосферу Солнца сразу после их ускорения. На основе анализа совокупности данных авторы [8] пришли к выводу о том, что модели ускорения частиц, достаточно хорошо согласующиеся с экспериментальными данными в области менее энергичных излучений, оказались неадекватными для объяснения экспериментальных фактов в области самой высокоэнергичной части спектра нейтрального излучения вспышек.

2. Спутник КОРОНАС-ФОТОН

Третий спутник солнечной программы — спутник КОРОНАС-ФОТОН. Головной научной организацией по нему является Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт" (МИФИ), спутник создан в Научно-исследовательском институте электромеханики (НИИЭМ) (г. Истра, Московская обл.). Спутник весом 1860 кг, включая 600 кг научной аппаратуры, 30 января 2009 г. был выведен на орбиту высотой около 565 км и наклонением $82,5^\circ$. Суточный объём передаваемой на землю научной информации не менее 1 Гб.

Таблица 1. Данные трёх вспышек [22]

Характеристика	3 июня 1982 г.	24 мая 1990 г.	4 июня 1991 г.
Константа ослабления γ -линии 2,2 МэВ, с	160 ± 30	47 ± 04 190 ± 30	420 ± 50 1600 ± 400
Константа ослабления γ -линий 4–7 МэВ, с	70 ± 5	28 ± 04 230 ± 30	300 ± 100
Константа ослабления γ -квантов от π^0 -распада τ_1 (быстрый компонент), с	68 ± 8	30 ± 5	720 ± 360
Константа ослабления γ -квантов от π^0 -распада τ_2 (медленный компонент), с	700 ± 180	> 1000	3000 ± 200
Длительность генерации нейтронов с энергией более 100 МэВ, с	> 300	1130	~ 4000
Нейтронная светимость $T > 100$ МэВ, cp^{-1}	8×10^{28}	$(3,8 \pm 0,3) \times 10^{30}$	$\sim 1 \times 10^{29}$

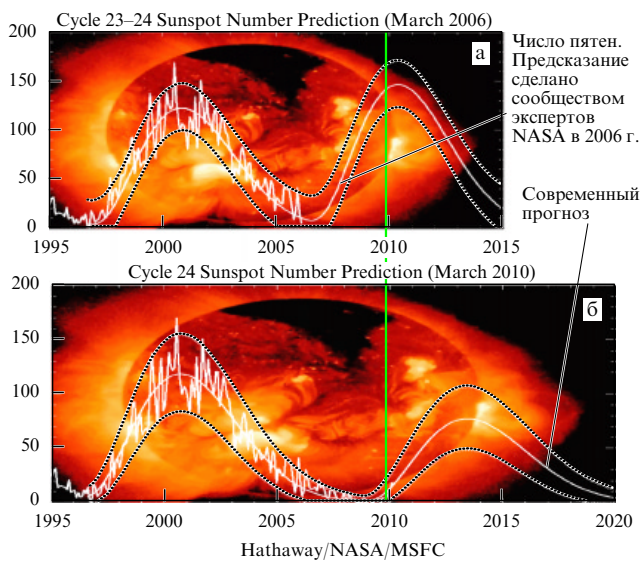


Рис. 1. Поведение солнечной активности в 23-м и 24-м циклах. (а) Прогноз, сделанный в 2006 г., и (б) современный (скорректированный) прогноз. Вертикальная прямая указывает текущую дату. Ломаная линия — измеренное среднеемесячное число пятен. Сплошная линия — прогноз поведения активности, пунктирная — оценка точности прогноза.

Ранее спутник предполагалось запустить в начале 24-го цикла солнечной активности, при этом использовалось предсказание хода солнечной активности, сделанное экспертами NASA (National Aeronautics and Space Administration) (США) в 2006 г. На рисунке 1 представлен прогноз солнечной активности в 24-м цикле, сделанный экспертами NASA в 2006 г. (рис. 1а) и в 2009 г. (рис. 1б) [9, 10]. Ломаной линией показан ход среднеемесячной активности. Однако вплоть до конца 2009 г. солнечная активность оставалась крайне низкой, так что экспертам пришлось корректировать своё предсказание хода активности со сдвигом времени достижения максимума с середины 2010 г. на середину 2013 г., т.е. на три года! Такой временной сдвиг и одновременное уменьшение предсказанной степени активности в максимуме почти в два (!) раза показывает, насколько не точны существующие методики долговременного предсказания солнечной активности.

Проявившаяся аномально длительная фаза спада 23-го цикла породила предположения о грядущем минимуме Маундера. По крайней мере, спад 23-го цикла

вплоть до конца 2009 г. похож на спад 4-го цикла. Последовавший после длительного спада 5-й цикл оказался имеющим очень небольшую активность в максимуме, что из-за небольшого уменьшения полной солнечной радиации, по-видимому, привело к похолоданию климата в 1800-е годы. Вместе с тем, на спаде 23-го цикла активности произошло неожиданно большое число крупных событий. Многочисленные наблюдательные данные по экстремально мощным солнечным событиям, произошедшим в октябре–ноябре 2003 г., систематизированы и изложены, в частности, в публикациях [11, 12].

Таким образом, учитывая вышесказанное, есть все основания ожидать, что 24-й цикл будет заметно отличаться от многих предыдущих, и поэтому детальное изучение характера солнечных излучений в начавшемся цикле может дать возможность лучше понять роль солнечно-земных связей в намечающейся тенденции потепления климата.

Плодотворность использования наблюдательных данных по гамма-излучению с энергией от нескольких единиц МэВ и вплоть до 300 МэВ, наблюдаемому в экстремальной вспышке 29 января 2005 г., продемонстрирована в работе [13]. Сопоставление временного хода гамма-излучения с энергиями до 2,2 МэВ показало, что как протоны с энергией вплоть до 10 МэВ, так и электроны были ускорены в главной фазе вспышки в магнитном поле активной области. Между тем, поведение гамма-излучения с $E > 60$ МэВ показывает, что большая часть излучения по временному ходу близка к меньшим энергиям, хотя некоторая часть излучения может создаваться долгоживущей компонентой высокоэнергичных фотонов. Экспериментальные данные из-за фоновых и статистических ограничений не позволяют количественно определить длительность запаздывающего излучения и его интенсивность.

Характеристики высокоэнергичного излучения, полученные в [13] для экстремальной вспышки, не вполне согласуются с более ранними наблюдениями вспышек 1991 г. с высокоэнергичным излучением спутниками SMM [14, 15], CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) [16], "Гамма-1" [17–19], Granat [20, 21]. В качестве примера в табл. 1, взятой из работы [22], приведены данные по трём вспышкам, для которых обобщены кривые блеска в ядерных гамма-линиях, в высокоэнергичном излучении и в нейтронах высокой энергии, дошедших от Солнца до Земли без распада.

Оказалось, что высокоэнергичное излучение содержит два временных компонента, длительность одного из которых составляет несколько часов. Исходя из вида спектра, можно заключить, что высокоэнергичное излучение произошло от распада π^0 -мезонов. Поскольку менее энергичные каналы не обнаруживают такой длительности, необходимо предполагать либо долгое удержание только высокоэнергичных протонов (ядер) в каких-то магнитных ловушках с достаточно большой для генерации мезонов плотностью, либо существование специфического механизма ускорения именно высокоэнергичных протонов без видимого проявления процессов инжекции и начального ускорения. Приведённые наблюдательные данные позволили прийти к следующему заключению:

- солнечные нейтроны с энергией $E > 200$ МэВ образуются в течение продолжительного времени, более 10–60 мин;
- длительность образования высокоэнергичных нейтронов сравнима со временем образования γ -квантов от пионов;
- временное поведение линии 2,2 МэВ не отражает длительности генерации высокоэнергичных солнечных нейтронов, хотя, вероятно, согласуется с рождением солнечных нейтронов с энергиями 1–100 МэВ;
- события 4 и 6 июня были зарегистрированы в Японии нейтронным монитором (64 м²), нейтронным и мюонным телескопами.

На основе наблюдений высокоэнергичного излучения спутником "Гамма-1" в работе [23] сделаны выводы:

- на активной стадии имеются короткие всплески длительностью менее 0,2 с;
- электроны и ионы ускоряются одновременно, соотношение между их потоками — 100–1000;
- электроны изотропно распределены по углу, а протоны коллимированы.

Отметим также проблему "электронно-доминированных" вспышек, в которых отношение потоков в ядерных линиях к тормозному излучению электронов в 10 раз меньше, чем в "стандартных" вспышках. Требуется экспериментально подтвердить и объяснить следующие особенности таких вспышек:

- пологий спектр (показатель $\delta \sim 2$) при энергиях около 1 МэВ;
- малый вклад ядерных линий;
- высокая степень "импульсности", схожая с космическими гамма-всплесками;
- независимость показателя спектра от гелиоцентрического угла, свидетельствующая о малой степени анизотропии излучающих частиц.

Таким образом, до сих пор из-за крайне скудного наблюдательного материала по высокоэнергичному излучению в солнечных вспышках проблема длительного ускорения/удержания высокоэнергичных протонов (возможно, и электронов) остаётся одной из загадок физики солнечных вспышек.

Следует отметить, что с начала 1990-х годов высокоэнергичное гамма-излучение не было зарегистрировано, прежде всего, из-за отсутствия на запущенных в последние полтора десятилетия солнечных миссиях, за исключением спутников КОРОНАС, соответствующей аппаратуры. Ядерное излучение с энергией до 10 МэВ с высоким энергетическим разрешением в линиях мог регистрировать спутник RHESSI, однако эффективность его герма-

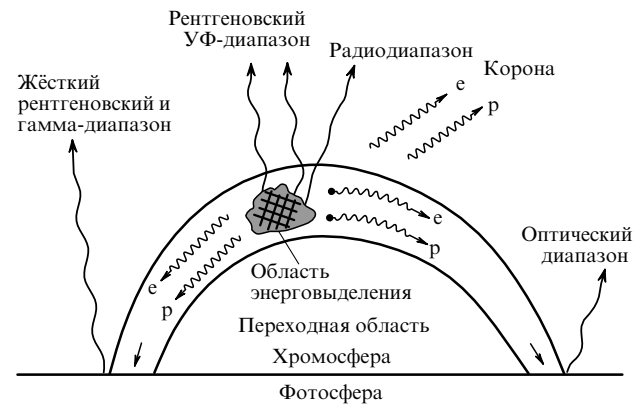


Рис. 2. Структура магнитной арки.

нивого детектора существенно снижается при энергиях гамма-квантов, превышающих 1 МэВ.

Параметры приборов определяются видом спектра излучения, который формируется во вспышке в результате тепловых и нетепловых процессов в арке, упрощённый схематический вид которой представлен на рис. 2 [24]. Первоначальное энерговыделение в результате изменения конфигурации магнитного поля (пересоединение магнитных силовых линий) приводит к нагреву корональной плазмы и одновременному или последовательному ускорению электронов, протонов и ядер. В вершине арки, где плотность невелика и температура достигает 15–20 млн градусов, возникает тепловое жёсткое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение, а ток заряженных частиц создаёт радиоизлучение с различной частотой.

Плотность вершины арки обычно недостаточно велика для эффективного возникновения тормозного излучения электронов и ядерного излучения, обусловленного взаимодействием ускоренных протонов и ядер, поэтому излучение от этих частиц наблюдается после достижения ими хромосферы. В модели простейшей арки протоны (ядра) и электроны движутся по квазиспиральным траекториям к основанию арки. При дипольной структуре магнитного поля могут возникнуть колебательные движения частиц вдоль арки между её основаниями, что приведёт к квазипериодическим пульсациям/вариациям (КПП) радиоизлучения и жёсткого электромагнитного излучения. Период таких колебаний определяется размером арки, параметрами магнитного поля в ней и энергетическим спектром захваченных аркой частиц. Реальная картина процесса может определяться также переменностью самой инжекции в арку и возбуждением волновых процессов в ней. КПП неоднократно наблюдались во вспышечных излучениях во всех наблюдательных диапазонах — от радиоизлучения до гамма-излучения [25–27]. Наблюдаемые периоды лежат в пределах от нескольких миллисекунд (достоверно наблюдается в радиодиапазоне) и до нескольких сотен секунд (по наблюдениям в жёстком электромагнитном излучении).

В частности, в работе [28] приведены данные наблюдения обсерваторией "Гранат" во вспышке 10 июня 1990 г. Длительность вспышки в анализированном рентгеновском диапазоне 8–20 кэВ 2 ч, период пульсаций рентгеновского излучения $143,2 \pm 0,8$ с. Максимальная амплитуда пульсаций составляла 5% от полной интен-

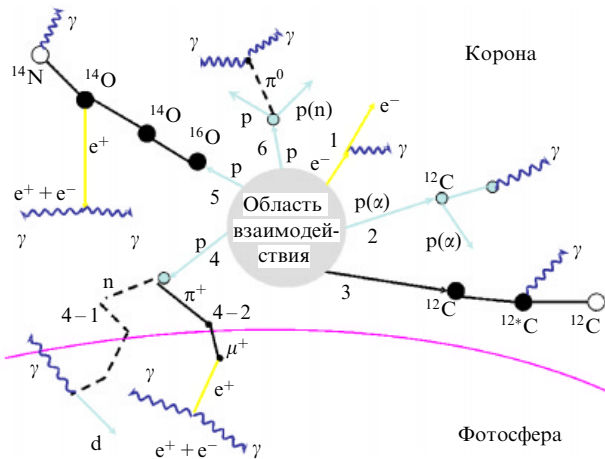


Рис. 3. Высокоэнергичные процессы взаимодействия ускоренных частиц с атмосферой Солнца, приводящие к образованию гамма-излучения и нейтронов, наблюдаемых у Земли.

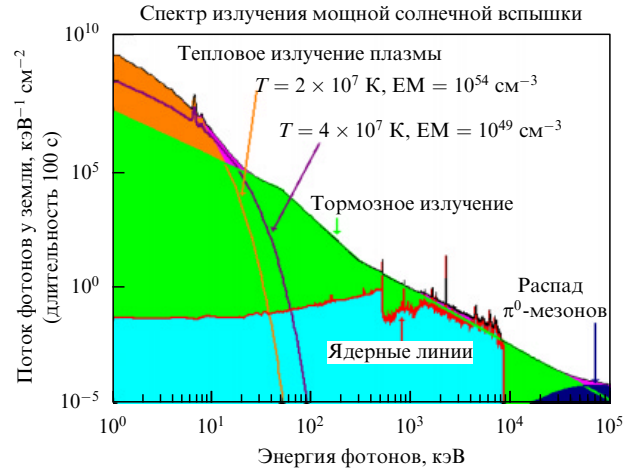


Рис. 4. Композитный спектр излучения типичной крупной вспышки, регистрируемой у Земли за 100 с. EM (emission measure) — мера эмиссии.

сивности. Отсюда, в частности, следует размер магнитной арки — $(1-3) \times 10^{10}$ см.

Модель возникновения квазипериодических пульсаций обсуждалась в работах [2, 29]. Измеренные параметры альвеновских осцилляций позволяют оценить температуру и плотность испаряющейся из основания арки плазмы и величину магнитного поля в арке [30].

В гамма-диапазоне 2–6 МэВ квазипериодические пульсации с периодом 40 с обнаружены во вспышке 1 января 2005 г. по данным прибора СОНГ (Солнечные Нейтроны и Гамма-кванты) на спутнике КОРОНАС-Ф [31]. Их существование в этой вспышке подтверждается данными радиогелиографа Nobeyama и данными спутника HESSI в диапазоне энергий 80–225 кэВ.

Очевидно, что для получения статистически достоверных данных о периодах длительностью вплоть до нескольких миллисекунд в жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах требуются приборы с большой эффективной площадью, высоким отношением сигнал/шум и высокой информативностью каналов передачи данных на Землю.

При попадании ускоренных (нетепловых) электронов и ядер в плотные слои хромосферы происходят разнообразные взаимодействия, схематически представленные на рис. 3. В результате различных электромагнитных и ядерных взаимодействий возникает излучение, суммарный спектр которого показан на рис. 4 [32]. Интенсивность и энергетический спектр отдельных компонентов излучения содержат информацию о составе и энергиях ускоренных частиц, темпе их ускорения, составе среды, ионы которой вовлекаются в ускорение, и о других характеристиках ускорительного процесса [33–37]. Подавляющая часть теряемой в атмосфере энергии ускоренных электронов и протонов с энергией до нескольких десятков МэВ идёт на кулоновские потери, приводящие к нагреву вещества и его испарению вдоль магнитных силовых линий.

Ускоренные электроны (линия 1 на рис. 3) испытывают тормозное излучение, формирующее непрерывный энергетический спектр с максимальными энергиями порядка начальной кинетической энергии электронов. Спектр не имеет спектральных особенностей. При субрелятивистских и релятивистских энергиях фотоны ис-

пускаются преимущественно вперёд с характерным углом отклонения $\theta \sim 1/\gamma$, где γ — лоренц-фактор частицы. Для мононаправленного пучка электронов, имеющих различные энергии, наблюдаемый спектр фотонов будет зависеть от угла направления движения пучка по отношению к наблюдателю. Этот факт может быть использован для статистического анализа совокупности вспышек с целью оценки углового распределения излучающих электронов. Зависимость спектральных характеристик рентгеновского излучения солнечных вспышек от угловой анизотропии ускоренных частиц исследовалась в работе [37] для рентгеновского излучения в диапазоне 10–600 кэВ для разных угловых распределений ускоренных электронов. Из сопоставления данных прибора СНЕГ-2МЗ, работавшего на борту космических аппаратов (КА) "Венера-13, -14", с результатами расчёта [37] следует [38], что обнаруженное смягчение спектров к центру диска Солнца, вероятнее всего, обусловлено угловой анизотропией ускоренных электронов. Получены указания на то, что угловое распределение электронов меняется от вспышки к вспышке.

При наличии угловой анизотропии взаимодействующих электронов возможно появление линейной поляризации у наблюдаемых рентгеновского и гамма-излучений. На возможность получения информации об угловом распределении ускоренных частиц впервые было указано в работе Корчака [39]. Первые спутниковые поляризационные измерения рентгеновского вспышечного излучения были проведены сотрудниками ФИАН на спутниках серии "Интеркосмос" [40]. Измеренные для нескольких вспышек величины поляризации лежат в области значений, допускаемых моделями, рассмотренными в [41, 42], и, несмотря на большие погрешности измерений, вероятно, свидетельствуют о сильной анизотропии быстрых электронов. Следует отметить, что первоначально опубликованная величина средней поляризации для трёх слабых вспышек в октябре–ноябре 1970 г. составила $40 \pm 20\%$ [43]. Затем она была скорректирована до 20%. В эксперименте на "Интеркосмос-11" измеренная величина для двух вспышек составила несколько процентов при энергии около 15 кэВ [44].

В 1990-х годах поляризационные спутниковые эксперименты не проводились. Они возобновились с начала

2000-х годов на спутниках КОРОНАС-Ф (поляриметр СПР-Н) [45] и RHESSI [46]. Хотя первоначально аппаратура спутника RHESSI не предназначалась для поляризационных измерений, оказалось, что такие измерения можно выполнить путём соответствующего отбора событий в двухсекционных детекторах. В двух вспышках для диапазона энергий 0,2–1 МэВ получены следующие значения величины поляризации: $0,21 \pm 0,09$ (23.07.2002 г.) и $-0,11 \pm 0,05$ (28.10.2003 г.) [47].

За четырёхлетний период эксперимента прибором СПР-Н зарегистрировано 128 солнечных вспышек, причём для 25 вспышек отсчётов было достаточно для поиска азимутальной асимметрии рассеяния, вызванной линейной поляризацией. Для события 29 октября 2003 г. были получены следующие значения поляризации в зависимости от энергии фотонов: более 70 % в каналах 40–60 кэВ и 60–100 кэВ, около 50 % в канале 20–40 кэВ [45]. Вследствие близости вспышки к центру диска Солнца (S15W02), указанные величины не могут быть согласованы с теоретическими оценками, сделанными в предположении, что арка не имеет аномально большого наклона к поверхности Солнца. Для остальных вспышек установлены лишь верхние пределы доли поляризованного излучения, на уровне от 8 % до 40 %.

Из результатов проведённых поляризационных измерений видна недостаточно высокая чувствительность использованных приборов и значительный вклад фоновых эффектов, поскольку при использовании методики комптоновского рассеяния степень азимутальной асимметрии составляет 10–20 %.

Ускоренные протоны, α -частицы и ядра ${}^3\text{He}$ (линия 2 на рис. 3) при ядерном взаимодействии могут возбуждать ядра среды, которые затем переходят в основное состояние с испусканием линейчатого гамма-излучения. Вследствие сравнительно небольшого кулоновского отталкивания пороговая энергия для возбуждения протонами близка к энергии гамма-квантов. Сечение процессов возбуждения максимально при энергиях в несколько десятков МэВ, поэтому для средних и тяжёлых ядер среды эффекты уширения линии, связанные с отдачей ядра, невелики. Наиболее интенсивные линии лежат в диапазоне энергий от 0,847 МэВ для ${}^{56}\text{Fe}$ до 6,13 МэВ для ${}^{16}\text{O}$. По соотношению интенсивностей линий можно определить соотношение концентраций элементов в солнечной атмосфере в области торможения ускоренных протонов и α -частиц. По соотношению линий с различающимся порогом их возбуждения может быть оценён характер энергетического спектра взаимодействующих протонов. Эта оценка будет относиться к диапазону от нескольких единиц до нескольких десятков МэВ.

Важное астрофизическое значение имеет определение по интенсивности линий 0,429 МэВ и 0,478 МэВ образования редких ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$ в α - α -взаимодействиях, происходящих во время вспышки. Ввиду равных масс сталкивающихся в этой реакции ядер уширение указанных линий вследствие эффекта Доплера будет значительным (см. подробное описание возможностей ядерной спектроскопии солнечных вспышек в [48, 49]).

При возбуждении ускоренных ядер (линия 3 на рис. 3) испускаемое излучение подвержено трансформации, обусловленной движением ускоренных ядер (сдвиг, уширение линии). При выделении этих линий из континуума можно определить степень обогащения уско-

ренных ядер в зависимости от потенциала ионизации атома.

Высокоэнергичные протоны ($T > 300$ МэВ) могут вызывать образование нейтральных (линия 6) или заряженных (линия 4) пионов с последующим их распадом (см. рис. 3). Возникающие позитроны после замедления, время которого определяется плотностью среды, будут аннигилировать с электронами с образованием гамма-квантов с энергией 0,5 МэВ. Возникающие гамма-кванты от распада $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ образуют энергетический спектр с широким максимумом в области энергии 70 МэВ в случае изотропного распределения ускоренных протонов. При рождении π^0 пучком частиц максимум излучения будет изменяться в зависимости от угла наблюдения относительно направления движения пучка. В принципе, при достаточной статистике высокоэнергичных фотонов, возможно различать случаи генерации пионов пучком и изотропным угловым распределением частиц.

Наконец, при взаимодействии энергичных протонов и ядер со средой могут образовываться нейтроны с энергиями от нескольких единиц до нескольких сотен МэВ и более, в зависимости от энергии взаимодействующих частиц. Низкоэнергичные нейтроны после замедления в фотосфере могут быть захвачены протонами в реакции $n + p \rightarrow d + \gamma$ ($E_\gamma = 2,2$ МэВ). Значительная доля высокоэнергичных нейтронов может улететь в межпланетное пространство, и часть из них сможет достичь Земли. Высокоэнергичные нейтроны с энергиями более 200 МэВ и гамма-кванты от распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ создаются одной и той же популяцией взаимодействующих адронов со сходными сечениями (ядерными), поэтому временные профили их интенсивностей должны быть подобны. В частности, при степенном энергетическом спектре $dN(T)/dT \sim T^{-3}$ максимальная эффективность рождения этих частиц приходится на энергию взаимодействующих протонов около 700 МэВ.

Таким образом, задачей аппаратуры проекта КОРОНАС-ФОТОН является получение наблюдательных данных, позволяющих, в частности, прояснить указанные проблемы зарождения и развития высокоэнергичных процессов на Солнце. Принципиальным преимуществом исследований на спутниках КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-ФОТОН, по сравнению с упоминавшимися спутниковыми экспериментами 1990-х годов, является возможность наблюдения, помимо гамма-излучения, на том же спутнике или на других находящихся на орбите солнечных аппаратах, вспышечного процесса в жёстком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах с высоким угловым разрешением, вплоть до нескольких секунд.

3. Цели проекта КОРОНАС-ФОТОН

В проекте КОРОНАС-ФОТОН были определены следующие цели.

- Проведение наблюдательных исследований деталей процессов, вызывающих возникновение солнечных вспышек, определяющих их периодичность и интенсивность, и совершенствование на этой основе моделей краткосрочного и долгосрочного прогноза солнечной активности.

- Получение наблюдательных данных по типу, энергиям и временному поведению излучений, генерируемых во вспышках, и совершенствование на этой основе моделей ускорения частиц (электронов, протонов и ионов) с энергиями вплоть до ультрарелятивистских,

распространения ускоренных частиц в атмосфере Солнца и выхода (выброса) плазмы и энергичных частиц в межпланетное пространство.

- Наблюдение выбросов корональной массы и эруптивных протуберанцев, а также определение физического состояния плазмы в этих процессах: её температуры, электронной и ионной плотности, а также дифференциальной меры эмиссии. Измерения физического состояния плазмы необходимы для расчёта энергобаланса активных корональных процессов.

- Получение усреднённых по времени систематических данных с высокой абсолютной точностью об излучении Солнца в различных диапазонах длин волн, от ультрафиолетового диапазона до диапазона высокоэнергичного гамма-излучения.

- Определение на основе данных по высокоэнергичному излучению вспышек характеристик ускорительного механизма.

- Определение количества ускоренных ядер и электронов и их энергетического спектра, в том числе наибольших энергий ускоренных частиц.

- Определение темпа ускорения, динамики ускорения и распространения (временные измерения, пульсации).

- Исследование динамики распространения в солнечной атмосфере, утечки в околосолнечное пространство (тонкая или толстая мишень взаимодействия, угловое распределение).

- Получение данных о составе среды, в которой происходят взаимодействия.

- Определение состава ускоренных частиц, отличающегося от состава среды из-за избирательных эффектов механизмов ускорения.

- Установление сходства (или различия) между ускорением протонов (ядер) и ускорением электронов;

- Определение соотношения механизмов ускорения и нагрева.

- Исследование природы электронно-доминированных вспышек.

- Получение данных о рождении во вспышках редких элементов при взаимодействии протонов и лёгких ядер.

Прибор ТЕСИС (Телескоп Солнечный/Изображающий Спектрометр), обладающий уникальным набором изображающих каналов, кроме задачи получения коррелированных с другими приборами спутника КОРОНАС-ФОТОН данных, имеет автономную программу исследования динамики долгоживущих плазменных структур в солнечной короне, например активных областей и корональных дыр.

Дополнительные научные задачи проекта КОРОНАС-ФОТОН.

- Астрофизика:

- исследование рентгеновского и гамма-излучения космических гамма-всплесков.

- Физика космических лучей:

- измерение характеристик иpitch-углового распределения космических лучей (электронов, протонов и альфа-частиц) на орбите спутника.

- Физика атмосферы Земли:

- мониторинг верхних слоёв атмосферы Земли по поглощению жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца;

- исследование характеристик ультракоротких гамма-вспышек, образующихся в верхней атмосфере Земли.

Участниками проекта, создавшими научную аппаратуру и обеспечивающими проведение космического эксперимента, являются в основном российские специалисты, работающие в различных научных и научно-производственных организациях:

Ю.Д. Котов, В.Н. Юров, А.И. Архангельский, М.В. Бессонов, А.С. Буслон, К.Ф. Власик, А.С. Гляненко, В.В. Кадилин, П.А. Калмыков, А.В. Кочемасов, Е.Э. Лупарь, И.В. Рубцов, Ю.А. Трофимов, В.Г. Тышкевич (МИФИ — головная научная организация по проекту КОРОНАС-ФОТОН); Р.С. Салихов, Ю.И. Аликин, М.П. Гассиева (НИИЭМ); С.И. Болдырев, В.Д. Кузнецов, Н.И. Лебедев (ИЗМИРАН); С.А. Богачев, Ю.С. Иванов, А.П. Игнатъев, С.В. Кузин, А.А. Перцов (ФИАН); Р.Л. Аптекарь, С.В. Голенецкий, В.А. Дергачев, В.Н. Ильинский, Е.М. Круглов, В.П. Лазутков, Г.А. Матвеев, Е.П. Мазец, М.И. Савченко, Д.В. Скородумов, А.В. Уланов, М.В. Уланов, Д.Д. Фредерикс, Ю.А. Чичикалюк (Физико-технический институт (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе РАН); К.В. Ануфрейчик, М.В. Бунтов, И.В. Козлов, А.В. Никифоров, А.Д. Рябова, И.В. Чулков (Институт космических исследований (ИКИ) РАН); Ю.И. Денисов, В.В. Калегаяев, М.И. Панасюк (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), а также специалисты из Украины — А.В. Дудник, И.И. Залюбовский, В.К. Персиков (Харьковский национальный университет (ХНУ) им. В.Н. Каразина); Индии — А. Нанди (Indian Centre for Space Physics, Kolkata, India), С. Срикумар, С.К. Чакарбартти (Indian Centre for Space Physics, Kolkata), А.Р. Пао (Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), Mumbai), С. Санкаратил (Vikram Sarabhai Space Centre, Thiruvananthapuram) и Польши — Я. Сильвестр (Центр космических исследований Польской академии наук (ЦКИ ПАН), Вроцлав).

Комплекс научной аппаратуры спутника КОРОНАС-ФОТОН включает в себя:

- восемь приборов для регистрации электромагнитного излучения диска Солнца (от ближнего инфракрасного до гамма-излучения) и солнечных нейтронов: Н-2М, "Конус", "Пингвин", БРМ (Быстрый Рентгеновский Монитор), РТ-2, SphinX, ФОКА, СОКОЛ (СОлнечные КОЛебания);

- телескоп ТЕСИС, имеющий несколько отдельных каналов;

- два прибора для регистрации заряженных частиц (протонов, электронов, ядер): СТЭП-Ф и "Электрон-М-Песка";

- магнитометр для измерения магнитного поля Земли на орбите спутника (СМ-8М);

- два служебных прибора (блок управления аппаратурой БУС-ФМ и система сбора и регистрации научной информации (ССРНИ)).

Регистрируемые соответствующими приборами виды излучений и организации-разработчики аппаратуры приведены в табл. 2. Размещение приборов на спутнике показано на рис. 5. Продольная ось спутника на дневной части орбиты ориентирована на центр диска Солнца с точностью ± 2 угловые минуты, скорость дестабилизации направления продольной оси не более $7,2'' \text{ c}^{-1}$, время восстановления ориентации на Солнце после выхода из тени — около 80 с, точность временной привязки данных по отношению к мировому времени не хуже 1 мс.

Таблица 2

Прибор	Основные характеристики. Диапазоны регистрации	Организация-разработчик
Спектрометр высокоэнергичных излучений "Наталья-2М"	Гамма-излучение (0,3 – 2000 МэВ), амплитудные и временные спектры Нейтроны (20 – 300 МэВ)	МИФИ, Москва
Телескоп-спектрометр низкоэнергичного гамма-излучения РТТ-2	Рентгеновское излучение (10 – 150 кэВ) в фосвич-моде Гамма-излучение (0,10 – 2 МэВ) в спектрометрической моде	TIFR, Мумбаи, Индия
Поляриметр-спектрометр жёсткого рентгеновского излучения "Пингвин-М"	Рентгеновское излучение (20 – 150 кэВ), измерение линейной поляризации Рентгеновское/гамма-излучение (0,015 – 5 МэВ) Рентгеновское излучение (2 – 10 кэВ)	ФТИ РАН, Санкт-Петербург
Солнечный телескоп-спектрометр ТЕСИС	Телескоп в линии MgXII (8,42 Å) Спектрогелиометр (280 – 330 Å) Телескопы (130 – 136 Å и 290 – 320 Å) Коронаграф (29 – 32 нм), изображение короны до четырёх радиусов Солнца Спектр в мягком рентгеновском излучении (0,5 – 15 кэВ)	ФИАН, Москва ЦКИ ПАН, Вроцлав, Польша
БРМ (Быстрый рентгеновский монитор)	Рентгеновское излучение (20 – 600 кэВ), шесть каналов	МИФИ, Москва
Монитор солнечного жёсткого УФ-излучения ФОКА	Мягкое рентгеновское излучение (1 – 11 нм) Жёсткое УФ-излучение (27 – 37 нм) Жёсткое УФ-излучение в линии водорода 121,6 нм	МИФИ, Москва
Рентгеновский и гамма-спектрометр "Конус-РФ"	Спектры в рентгеновском и гамма-диапазонах (10 кэВ – 12 МэВ)	ФТИ РАН, Санкт-Петербург
Многоканальный фотометр СОКОЛ	Измерения малых периодических колебаний солнечного излучения в окнах с длинами волн около 280, 350, 500, 650, 850, 1100, 1500 нм	ИЗМИРАН, Троицк, Московская обл.
Анализатор заряженных частиц "Электрон-М"	Протоны (1 – 20 МэВ) Электроны (0,2 – 2 МэВ) Ядра ($Z < 26$), 2 – 50 МэВ на нуклон	НИИЯФ МГУ, Москва
Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф	Протоны (9,8 – 61,0 МэВ) Электроны (0,4 – 14,3 МэВ) Альфа-частицы (37 – 246 МэВ)	ХНУ, Харьков, Украина
Магнитометр СМ-8М	Измерение трёх компонент магнитного поля Земли (–55 – +55 мкТл)	НПП "Геологоразведка", Санкт-Петербург
Система сбора и регистрации научной информации (ССРНИ)	Сбор научной информации, выдача цифровых команд для научной аппаратуры. Объём запоминающего устройства 1 Гбайт	ИКИ РАН, Москва
Блок управления и соединений БУС-ФМ	Выдача питания и команд для научной аппаратуры	ИКИ РАН, Москва

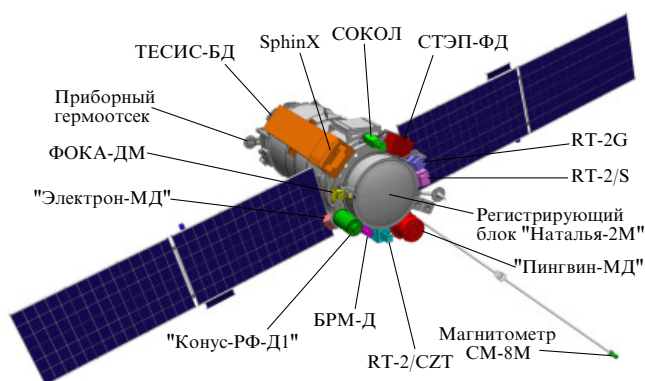


Рис. 5. Размещение на спутнике КОРОНАС-ФОТОН научных приборов, ориентированных в направлении на центр диска Солнца.

Организация приёма научной телеметрической информации, её хранения и передачи показана на схеме, приведённой на рис. 6. Как видно из схемы, всё взаимо-

действие по получению и распространению информации осуществлялось через МИФИ. Там же осуществлялась подготовка командных заданий для передачи их на борт спутника с целью управления работой приборов. Информационные ресурсы позволяли обеспечивать непрерывную работу всех приборов одновременно. Подробное описание аппаратуры, организации её отработки на различных этапах подготовки и проведения эксперимента, а также построение и функционирования Центра экспресс-обработки, накопления и хранения данных (ЦЭОНХД) дано в сборниках [50 – 53].

4. Предварительные данные, полученные в период с февраля по ноябрь 2009 г.

Как указывалось в разделе 2, наступление нового активного солнечного цикла сдвинулось почти на три года, в результате чего в указанный период Солнце находилось в экстремально спокойной фазе с почти полным отсутствием вспышек. За период полёта прибором "Пингвин-М", имеющим детектор мягкого рентгеновского излучения с нижним энергетическим порогом 2 кэВ,

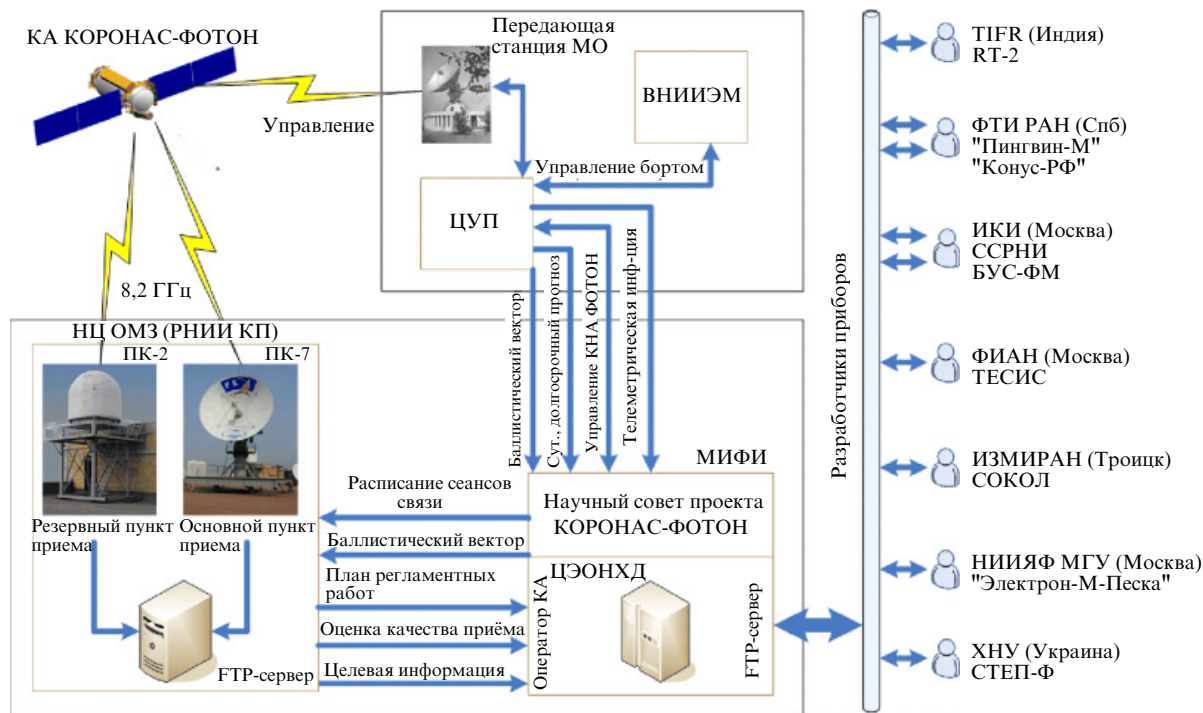


Рис. 6. Структура наземного комплекса по приёму, накоплению, экспресс-обработке, распространению телеметрических научных данных и организации управления работой научной аппаратуры. ВНИИЭМ — Научно-производственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А.Г. Иосифьяна" (Москва), ЦУП — Центр управления полётами, КНА — комплекс научной аппаратуры, МО — Министерство обороны, НЦ ОМЗ — Научный центр оперативного мониторинга Земли, РНИИ КП — Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, ПК-2 и ПК-7 — приёмные комплексы, FTP — File Transfer Protocol (протокол передачи файлов), ЦЭОНХД — Центр экспресс-обработки, накопления и хранения данных Института астрофизики МИФИ.

было зарегистрировано 172 солнечных вспышки, в том числе 101 вспышка класса В и 13 вспышек класса С. Вспышки класса А и более слабые в большом количестве были зарегистрированы прибором SphinX, чувствительным в интервале энергий 1,5–15 кэВ.

Расхождение с данными GOES связано с наличием у спутника КОРОНАС-ФОТОН витков, когда КА заходит в тень, и отсутствием по техническим причинам данных со спутника в некоторые, сравнительно короткие, промежутки времени, а также с переменным фоном, обусловленным заряженными частицами внутреннего и внешнего радиационных поясов Земли. В различных детекторах, в зависимости от их толщины, размера и иных характеристик, фон играет существенно различную роль. В частности, из-за малых размера и толщины детекторов его роль мала в приборах для регистрации излучений от оптического диапазона до мягкого рентгеновского диапазона. С другой стороны, в приборах для регистрации жёсткого рентгеновского излучения, и особенно для регистрации гамма-излучения, его влияние велико. Для примера на рис. 7 показана величина фона в детекторах прибора "Наталья-2М" в зависимости от положения спутника на орбите.

В течение обсуждаемого уникального спокойного периода солнечной активности было возможно исследовать простейшие, "элементарные" динамические процессы в короне Солнца в простейших конфигурациях магнитных структур.

За указанный период авторы эксперимента ТЕСИС на борту КОРОНАС-ФОТОН получили следующие результаты:

- сделаны первые в мире изображения промежуточной (на расстояниях от 0,5 до 1,5 солнечных радиусов) короны Солнца в коротковолновом диапазоне;
- совместно с обсерваторией Hinode (Япония) обнаружен новый тип "горячих" корональных выбросов массы с температурой плазмы порядка 1×10^6 К;
- впервые в мире детально зафиксирован процесс "отделения" выброса корональной массы от магнитного поля Солнца;
- впервые в мире измерена динамика горячих корональных рентгеновских точек и хромосферных спикул с временным разрешением порядка 1 с. Лучшие предыдущие измерения, полученные спутником SOHO (Европа), имели точность около 60 с;
- впервые зарегистрирован новый тип событий — всплески солнечного излучения в ярких корональных точках и активных областях продолжительностью менее 1 мин. Ранее такая быстрая активность Солнца была неизвестна из-за отсутствия возможности получения изображения Солнца с разрешением лучше, чем $1'$;
- впервые спектроскопическими методами (по ширине спектральных линий излучения) измерены точные температуры горячих ($T > 5 \times 10^6$ К) микроструктур солнечной короны. Найдены характерные значения распределения мгновенных и средних температур по ансамблю структур.

Полученные прибором ТЕСИС изображения широко представлены в электронных средствах, в том числе на сайте www.thesis.lebedev.ru лаборатории рентгеновской астрономии Солнца ФИАН [54].

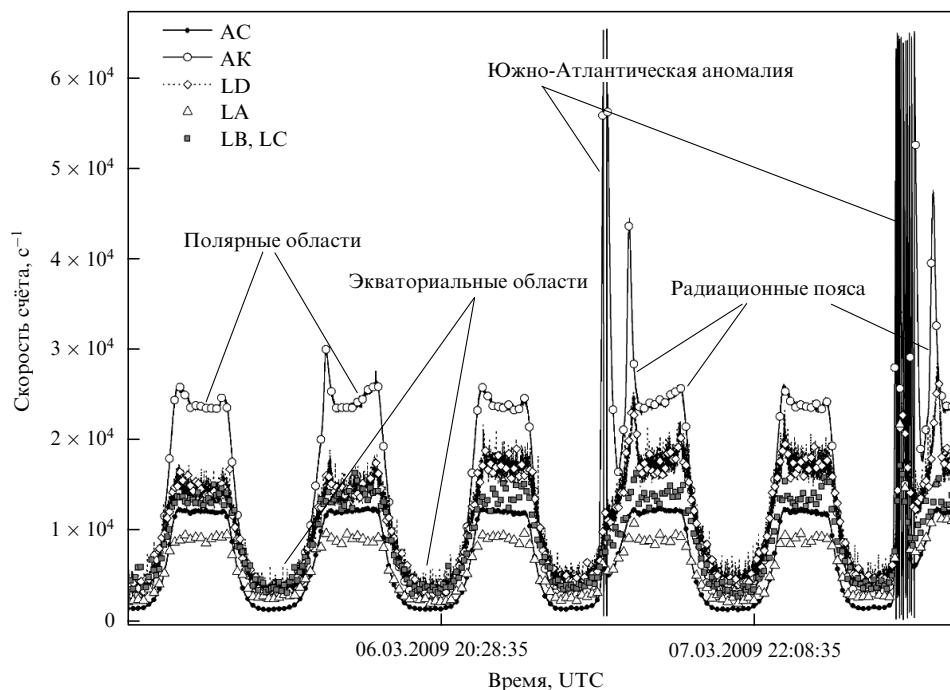


Рис. 7. Временной ход фоновой загрузки детекторов AC, AK, LD, LA, LB и LC прибора "Наталья-2М", связанный с широтной зависимостью потоков протонов и электронов во внутреннем и внешнем радиационных поясах Земли.

Таблица 3. Параметры измерительных каналов

Канал	Фильтр (номинальная толщина, нм)	Подавление фона видимого света (вклад остаточного фона в сигнал)	Диапазон, нм	Примечание
Основные каналы				
№ 1 (Видимый свет)	Стекло КС-4В	—	155–1100	Технологический оптический канал
№ 3 (Ly- α)	Интерференционные фильтры	3×10^8 (21 %)	116–125	Канал для измерения лайман-альфа-излучения
№ 6 (Cr/Al)	Cr/Al (100/200)	10^8 (35 %)	(0,5–7) и (27–37)	Фильтр, напылённый на фотодиод
№ 7 (Ti/Pd)	Ti/Pd (200/100)	5×10^7 (52 %)	0,5–11	Фильтр, напылённый на фотодиод
Калибровочные каналы				
№ 2 (Ly- α -калибровка)	Интерференционные фильтры	3×10^8 (25 %)	116–125	Канал для измерения лайман-альфа-излучения
№ 5 (Cr/Al-калибровка)	Cr/Al (100/200)	3×10^7 (65 %)	(0,5–0,7) и (27–37)	Фильтр, напылённый на фотодиод
№ 4 (Ti/Pd-калибровка)	Ti/Pd (200/100)	10^7 (86 %)	0,5–11	Фильтр, напылённый на фотодиод

Непрерывный мониторинг потока вакуумного ультрафиолетового излучения на борту КОРОНАС-ФОТОН осуществлялся радиометром ФОКА в диапазонах 0,5–11 нм, 27–37 нм и 116–125 нм каждые 0,4 с. Измеряющими элементами являются фотодиоды новой конструкции AXUV-50 (AXUV — аббревиатура от англ. absolute extreme ultraviolet). Выделение измеряемого диапазона излучения из общего солнечного светового потока осуществляется фильтрами. Параметры измерительных каналов даны в табл. 3. Калибровочные фильтры открываются только в моменты калибровок. Результаты оккультационных (затменных для спутника) измерений,

показанные на рис. 8 для случая выхода из тени Земли, позволяют оценить вклад видимого света в измеряемые потоки, а также осуществлять измерения поглощающей способности верхней атмосферы Земли при каждом заходе спутника в тень и при выходе из неё.

Пересчитанное ослабление потока в зависимости от высоты оккультации (минимальной высоты просвечиваемой области атмосферы) представлено на рис. 9.

Измеренный 28.02.2009 г. радиометром ФОКА поток в диапазоне 0,5–7 нм составляет $6,0 \times 10^{-5}$ Вт м⁻².

При вычислении абсолютных величин потока из наблюдательных данных необходимо знать детальную

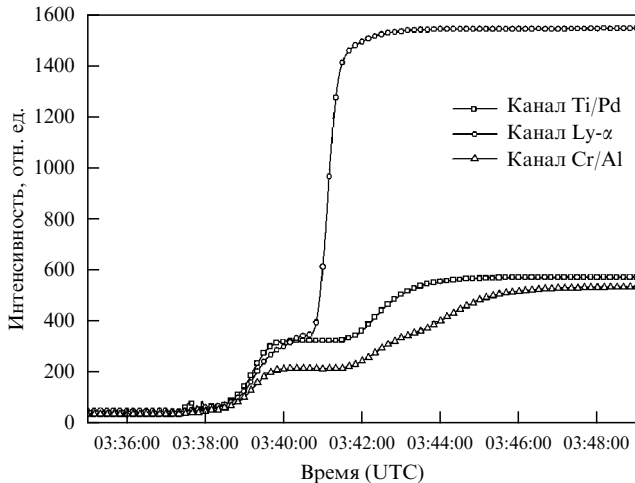


Рис. 8. Временное поведение интенсивности ВУФ-излучения, регистрируемой прибором ФОКА при выходе спутника из тени Земли в период спокойного Солнца.

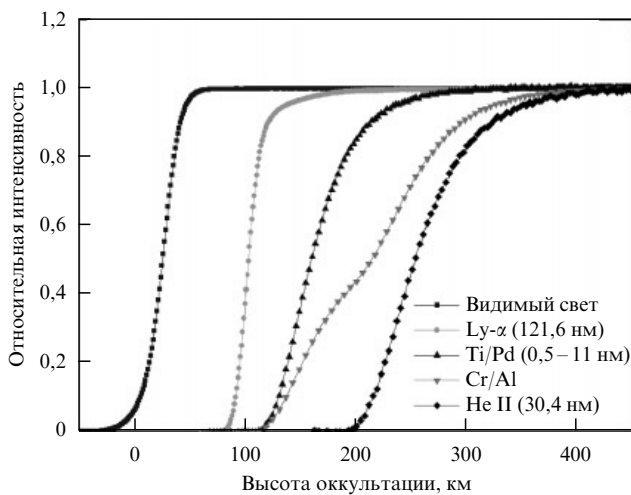


Рис. 9. Зависимость относительной интенсивности потоков ВУФ от высоты оккультации (минимальной высоты над Землей луча зрения от прибора к центру диска Солнца).

форму спектра. Указанный поток получен при использовании в качестве базового (reference) спектра, рекомендованного лабораторией LASP (Laboratory for Atmospheric and Space Physics, USA) для периода минимума солнечной активности в отсутствие вспышек. Для этой же даты прибор XPS (X-ray Photoelectron Spectrometer) той же лаборатории, установленный на американском спутнике SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment), для того же диапазона даёт $7,1 \times 10^{-5}$ Вт м⁻² (с оценённой методической погрешностью экспериментов 12–30%) [55].

Поток солнечного излучения в линии лайман-альфа, измеренный 28.02.2009 г. радиометром ФОКА, составил $5,7 \times 10^{-3}$ Вт м⁻² с точностью не хуже 15% [55]. Данное значение хорошо согласуется с величиной $5,77 \times 10^{-3}$ Вт м⁻², измеренной прибором SOLSTICE (SOLar STellar Irradiance Comparison Experiment) спутника SORCE в тот же день.

Во время вспышек класса В и выше вклад вспышечного ВУФ-излучения составляет не менее 10% от светимости всего диска Солнца в этих же диапазонах.

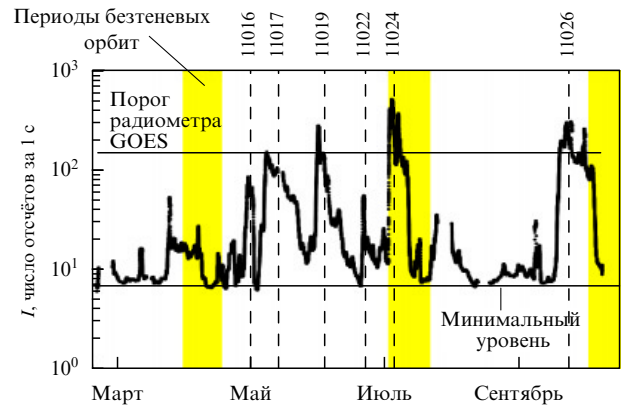


Рис. 10. Пример поведения кэВ-ного излучения в период спокойного Солнца по данным детектора SphinX. I — интенсивность потока рентгеновского излучения.

Детектор SphinX (Solar photometer in X-rays), работающий совместно с прибором ТЕСИС, является высокочувствительным и быстрым спектрофотометром для регистрации солнечного мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 0,85–15,00 кэВ. Энергетическое разрешение 0,1 кэВ, временное разрешение до 1 с. SphinX способен выявлять вариацию мягкого рентгеновского излучения, в 100 раз меньшую, чем радиометры спутников GOES. В качестве примера возможностей детектора на рис. 10 приведена усреднённая по пятиминутным интервалам переменность потока мягкого рентгеновского излучения за четыре месяца наблюдения. Минимальные регистрируемые значения потока, которые в 20 раз меньше порога радиометра GOES, соответствуют, по-видимому, излучению полностью спокойной солнечной короны. Величина потока и его переменность увеличиваются во время существования активных областей на диске Солнца, номера которых указаны на рис. 10. Регистрируемое повышение в 10 и более раз соответствует минимальному уровню активности короны Солнца в отсутствие вспышек в общепринятом их понимании.

Наибольший наблюдательный материал по мягкому и жёсткому излучению получен несколькими приборами миссии для двух вспышек: 5 июля 2009 г. (класс C2.7) и 26 октября 2009 г. (класс C1.3).

Вспышка 5 июля 2009 г. начала развиваться, согласно данным GOES, в 07:07:00 UTC (Coordinated Universal Time) в области диска с координатами S26W01. В этот момент солнечное излучение попадало на приборы после прохождения верхних слоёв атмосферы на минимальной высоте (высоте оккультации) 170 км. Изменение высоты оккультации со временем показано на рис. 11. Поэтому поток ВУФ-излучения достигает спутника с ослаблением, что иллюстрируется уменьшением сигнала от фотометра ФОКА (рис. 11г). В 07:10:00 UTC, по данным каналов измерения мягкого рентгеновского излучения, начала быстро увеличиваться светимость вспышки в каналах с энергиями от нескольких кэВ до 10 кэВ (рис. 12). Свечение в этих каналах достигло максимальной величины через пять минут (температура 1,27 кэВ, мера эмиссии $2,4 \times 10^{48}$ см⁻³). Затем произошло остывание с характерным временем спада на порядок за 10 мин, и далее охлаждение продолжалось в течение почти двух часов. Поведение более

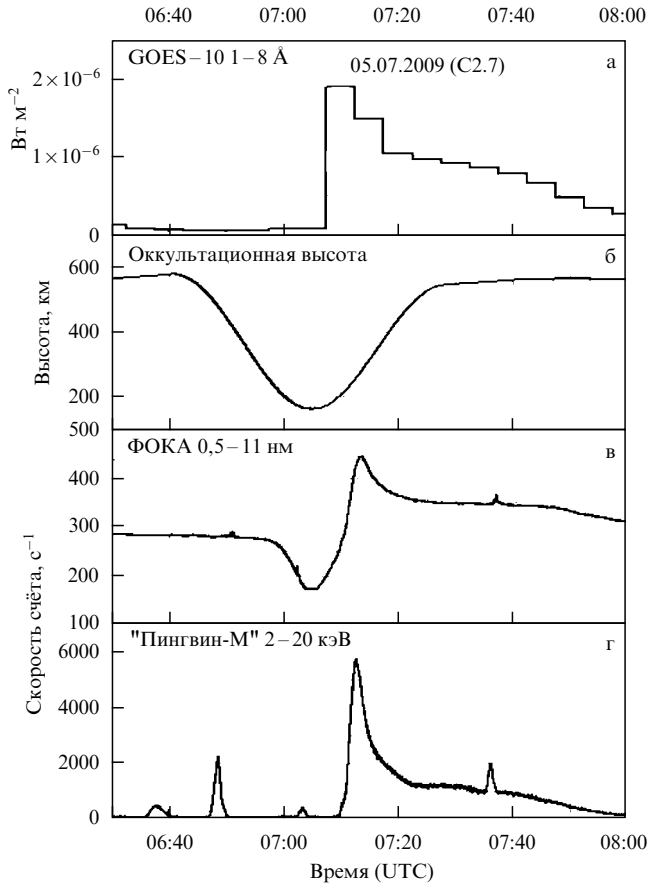


Рис. 11. Временное поведение в солнечной вспышке 5 июля 2009 г. (класс C2.7) мягкого рентгеновского излучения, зарегистрированного спутником GOES и приборами ФОКА и "Пингвин-М" спутника КОРОНАС-ФОТОН. Из оккультационной зависимости (рис. б) следует, что вспышка началась в момент частичного затенения спутника остаточной атмосферой Земли.

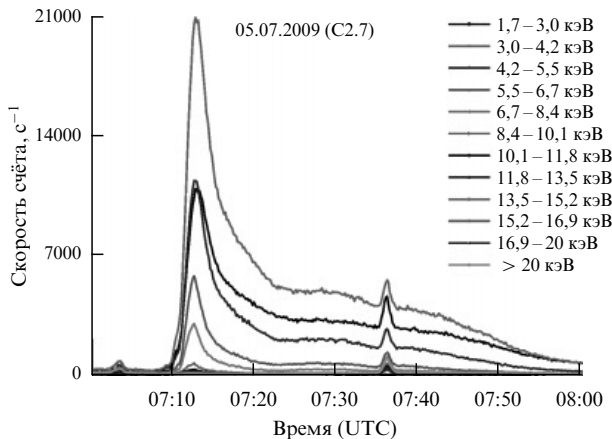


Рис. 12. Временные профили интенсивности мягкого рентгеновского излучения в солнечной вспышке 5 июля 2009 г. (класс C2.7), позволяющие определять динамику температуры и меру эмиссии излучающей области (данные прибора "Пингвин-М").

жесткого излучения по данным приборов "Конус-РФ" и RT-2 представлено на рис. 13. Ускорение быстрых электронов началось одновременно с тепловой фазой и продолжалось (с примерно равными временами подъёма и спада) около трёх минут. Максимальная энергия

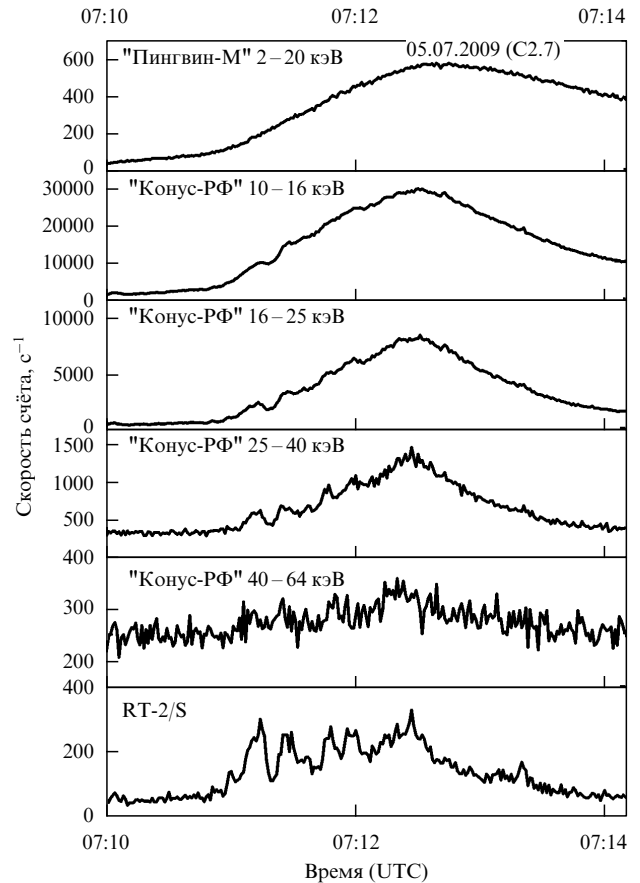


Рис. 13. Временное поведение в солнечной вспышке 5 июля 2009 г. мягкого рентгеновского излучения, зарегистрированного в жестких рентгеновских диапазонах приборами "Конус-РФ" и RT-2/S.

излучения, зарегистрированного прибором "Конус-РФ", достигает по крайней мере 60 кэВ.

Хорошо видно, что с возрастанием энергии излучения проявляется временная структура, наиболее значимо представленная в данных прибора RT-2, который имеет меньший вклад фона в жестком рентгеновском диапазоне благодаря использованию фосвич-детектора (phoswich detector) и пассивного коллиматора. В результате проведенного анализа подтверждено существование КПП с периодами 12 и 16 с [56]. Поскольку одновременно с этим событием наблюдался довольно медленно распространяющийся корональный выброс, возможно, что процесс постепенного формирования плазмоида в области пересоединения может объяснить осцилляции с наблюдаемыми временами.

Вспышка 26 октября 2009 г. начала развиваться, согласно данным GOES, в 22:38 UT в области диска с координатами N19W35. Развитие этой вспышки в ВУФ-диапазоне (каналы прибора ФОКА и мягкие рентгеновские каналы прибора "Пингвин-М") представлено на рис. 14. Хорошо видно, что временное поведение как мягкого, так и жесткого излучения в этой вспышке принципиально отличается от такового в предыдущем случае. В первой части данной вспышки имеется лишь мягкое тепловое рентгеновское излучение со слабо переменной интенсивностью. Характерное время вариации (остывания и нагрева) около 2 мин. В 22 ч 49 мин началась вторая фаза с возрастанием в наибольшей степени жесткого рентгеновского излучения с наблюдае-

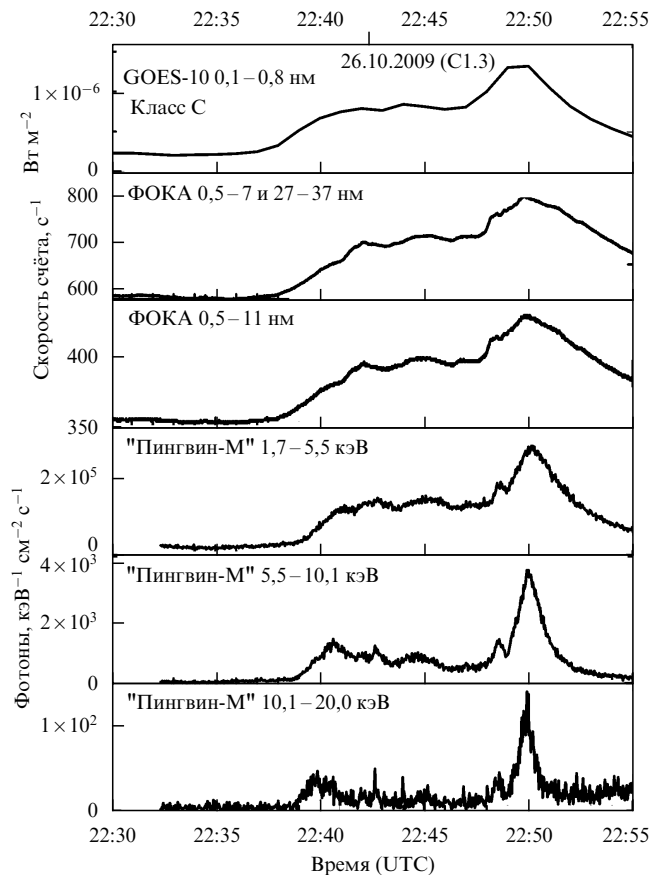


Рис. 14. Временное поведение в солнечной вспышке 26 октября 2009 г. (класс C1.3) мягкого рентгеновского излучения, зарегистрированно-го спутником GOES и приборами ФОКА и "Пингвин-М" спутника КОРОНАС-ФОТОН.

мыми энергиями вплоть до значения около 200 кэВ. Данные по жёстким каналам для этой вспышки (согласно прибору "Конус-РФ") представлены на рис. 15 в сравнении с подобными данными для предыдущей вспышки. Из сравнения этих данных хорошо видно, что энергичное излучение присутствует лишь в более слабой по классу вспышке, в то время как интенсивность в кэВ-ных каналах и интенсивность излучения в максимуме во вспышке класса C2.7 на порядок выше.

Наличие жёсткого излучения во вспышке 26 октября 2009 г. позволило провести анализ с целью поиска по данным поляриметра прибора "Пингвин-М" анизотропии рассеяния, связанной с наличием линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения. С учётом поведения фона заряженных частиц, измеряемого на борту прибором "Электрон-М-Песка", для анализа был выбран интервал времени от 22:49:31 UTC до 22:50:17 UTC. Анализ, выполненный сотрудниками МИФИ, в том числе автором доклада, позволил предварительно заключить, что степень поляризации излучения в указанный период составляла $(24 \pm 5) \%$. Важность поляризационных измерений и имеющиеся немногочисленные результаты обсуждались выше, отметим лишь, что эффективная площадь прибора "Пингвин-М", усреднённая по спектру, составляет 5 см^2 (для сравнения, соответствующая величина у прибора СПР-Н, работавшего на борту КОРОНАС-Ф, $0,3 \text{ см}^2$ для энергии 20 кэВ и $1,5 \text{ см}^2$ для энергии 100 кэВ). Кроме того, в приборе "Пингвин-М" вместо традиционного пассив-

ного рассеивателя из бериллия использовалось четыре органических сцинтиллятора, сигналы от которых включались на совпадения с сигналами от детекторов рассеянного излучения (поглотителей), что резко снижает вклад фона. Характеристики всех детекторов были охвачены системой автоматической стабилизации и, кроме того, регулярно калибровались встроенным в прибор источником.

Укажем, наконец, на интересный результат, связанный с альбедо рентгеновского излучения от атмосферы Земли. На спутнике с целью увеличения рабочего времени для регистрации гамма-всплесков, имеющих изотропное распределение по небесной сфере, было установлено два детектора прибора "Конус-РФ" с углом зрения до 180° , ось одного из которых была направлена на Солнце, а другого, идентичного, имела антисолнечное направление. На рисунке 15 приведены показания обоих детекторов во время наблюдения двух указанных выше зарегистрированных вспышек. По-видимому, излучение, регистрируемое во время солнечной вспышки 26 октября 2009 г. антисолнечным детектором, представляет собой альбедо от атмосферы. Увеличение интенсивности альбедо с возрастанием энергии связано с соотношением сечений поглощения и рассеяния в атмосфере в зависимости от энергии фотонов. Из величины земного альбедо, вычисленной в работе [57] для космического рентгеновского излучения в диапазоне 1–1000 кэВ, в частности, следует, что максимум коэффициента отражения лежит в диапазоне 30–100 кэВ, что качественно согласуется с нашими наблюдениями.

Что касается отсутствия такого же эффекта при наблюдении вспышки 5 июля 2009 г., то это связано с ориентацией спутника относительно Земли в тот момент. Как отмечалось выше, эта вспышка совпала по времени с выходом спутника из области частичной оккультации, что, в свою очередь, означает, что спутник был расположен практически параллельно относительно поверхности атмосферы. Условия формирования альбедо и направленность антисолнечного детектора исключали попадание в него вспышечного излучения, отражённого от атмосферы Земли.

5. Заключение

Проведённые в период лётных испытаний спутника КОРОНАС-ФОТОН с февраля по ноябрь 2009 г. настроечные и градуировочные работы научных приборов, экспресс-анализ поступающих данных и их обработка, часть результатов которой представлена в докладе, подтвердили в целом нормальное функционирование всех научных приборов, установленных на борту спутника. Данные, полученные по нескольким произошедшим в тот период вспышкам, подтвердили плодотворность проведения комплексных исследований солнечной активности с борта одного спутника.

Разработка, создание, запуск и эксплуатация спутника КОРОНАС-ФОТОН осуществлялись в соответствии с Федеральной космической программой России.

Участники проекта КОРОНАС-ФОТОН благодарны многим специалистам из государственных и ведомственных организаций, научных и промышленных организаций России и Украины за выполненную работу на различных этапах, от разработки научной аппаратуры и систем спутника до запуска и обеспечения его работы в период до декабря 2009 г.

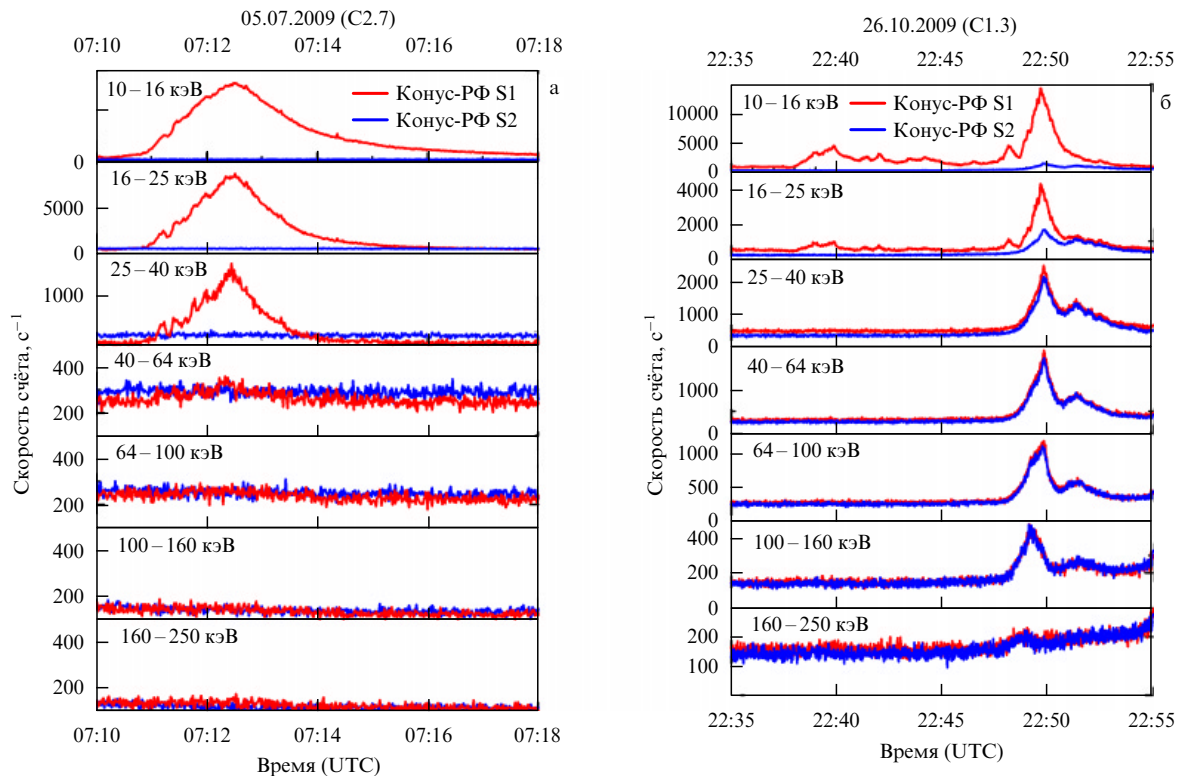


Рис. 15. Сопоставление временного поведения в двух солнечных вспышках — 5 июля 2009 г. (а) и 26 октября 2009 г. (б) — интенсивности излучения, зарегистрированного солнечным (S1) и антисолнечным (S2) детекторами прибора "Конус-РФ".

Список литературы

- Aschwanden M J *Physics of Solar Corona* (Berlin: Springer-Verlag, 2004)
- Зайцев В В, Степанов А В *УФН* **178** 1165 (2008) [Zaitsev V V, Stepanov A V *Phys. Usp.* **51** 1123 (2008)]
- Priest E, Forbes T *Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000) [Прист Э, Форбс Т *Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения* (Пер с англ. под ред. В Д Кузнецова, А Г Франк) (М.: Физматлит, 2005)]
- Aschwanden M J *Space Sci. Rev.* **101** 1 (2002)
- Кузнецов В Д, в сб. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 10
- Житник И А и др. *Астрон. вестн.* **39** 495 (2005) [Zhitnik I A et al. *Solar Syst. Res.* **39** 442 (2005)]
- Котов Ю Д, в сб. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 178
- Кузнецов С Н, в сб. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 178
- Dikpati M, de Toma G, Gilman P A *Geophys. Res. Lett.* **33** L05102 (2006)
- Solar Cycle Prediction, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>
- Веселовский И С и др. *Космич. исслед.* **42** 453 (2004) [Veselovskii I S et al. *Cosmic Res.* **42** 435 (2004)]
- Панасюк М И и др. *Космич. исслед.* **42** 509 (2004) [Panasyuk M I et al. *Cosmic Res.* **42** 489 (2004)]
- Grechnev V V et al. *Solar Phys.* **252** 149 (2008)
- Chupp E L et al. *Astrophys. J.* **263** L95 (1982)
- Forrest D J et al., in *Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray Conf., La Jolla, USA, 1985* Vol. 4, p. 3179
- Kanbach G et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **97** 349 (1993)
- Акимов В В и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 167 (1992) [Akimov V V et al. *Astron. Lett.* **18** 69 (1992)]
- Гальпер А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **63** 889 (1996) [Galper A M et al. *JETP Lett.* **63** 931 (1996)]
- Akimov V V et al. *Solar Phys.* **166** 107 (1996)
- Talon R et al. *Solar Phys.* **147** 137 (1993)
- Vilmer N et al. *Astron. Astrophys.* **412** 865 (2003)
- Debrunner H, Lockwood J A, Ryan J M, in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy, August 28–September 8, 1995* Vol. 4 (Eds N Iucci, E Lamanna) (Roma: Intern. Union of Pure and Appl. Phys., 1995) p. 167
- Djantemirov H M et al., in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy, August 28–September 8, 1995* Vol. 4 (Eds N Iucci, E Lamanna) (Roma: Intern. Union of Pure and Appl. Phys., 1995) p. 94
- Tsuneta S *Astrophys. J.* **483** 507 (1997)
- Aschwanden M J, in *Turbulence, Waves and Instabilities in the Solar Plasma* (Eds R Erdelyi et al.) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003)
- Nakariakov V M, Melnikov V F *Space Sci. Rev.* **149** 119 (2009)
- Jakimiec J, Tomczak M *Solar Phys.* **261** 233 (2010)
- Терехов О В и др. *Письма в Астрон. журн.* **28** 452 (2002) [Terekhov O V et al. *Astron. Lett.* **28** 397 (2002)]
- Зайцев А А, Степанов А В *Письма в Астрон. журн.* **15** 154 (1989) [Zaitsev A A, Stepanov A V *Sov. Astron. Lett.* **15** 66 (1989)]
- Stepanov A V, Urpo S, Zaitsev V V *Solar Phys.* **140** 139 (1992)
- Nakariakov V M et al. *Astrophys. J.* **708** L47 (2010)
- Lin R P et al., in *The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002) p. 1
- Chupp E L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **22** 359 (1984)
- Ramaty R, Murphy R J *Space Sci. Rev.* **45** 213 (1987)
- Абрамов В И, Котов Ю Д *Письма в Астрон. журн.* **13** 142 (1987) [Abramov V I, Kotov Yu D *Sov. Astron. Lett.* **13** 58 (1987)]
- Ramaty R, Mandzhavidze N *AIP Conf. Proc.* **522** 401 (2000)
- Боговалов С В, Котов Ю Д, Устинов П Л *Письма в Астрон. журн.* **23** 300 (1997) [Bogovalov S V, Kotov Yu D, Ustinov P L *Astron. Lett.* **23** 263 (1997)]
- Боговалов С В и др. *Астрон. журн.* **65** 147 (1988) [Bogovalov S V et al. *Sov. Astron.* **32** 76 (1988)]
- Корчак А А *ДАН СССР* **173** 291 (1967) [Korchak A A *Sov. Phys. Dokl.* **12** 192 (1967)]
- Сомов С В, Тиндо И П *Космич. исслед.* **16** 683 (1978)

41. Leach J, Petrosian V *Astrophys. J.* **269** 715 (1983)
42. Боговалов С В, Кельнер С Р, Котов Ю Д *Астрон. журн.* **64** 1280 (1987) [Bogovalov S V, Kelner S P, Kotov Yu D *Sov. Astron.* **31** 672 (1987)]
43. Tindo I P et al. *Solar Phys.* **14** 204 (1970)
44. Tindo I P, Shuryghin A I, Steffen W *Solar Phys.* **46** 219 (1976)
45. Житник И А и др., в сб. *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 128
46. McConnell M L et al. *Solar Phys.* **210** 125 (2002)
47. Boggs S E, Coburn W, Kalemci E *Astrophys. J.* **638** 1129 (2006)
48. Котов Ю Д, Боговалов С В, Ендалова О В *Изв. РАН. Сер. физ.* **61** 1201 (1997) [Kotov Yu D, Bogovalov S V, Endalova O V *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **61** 938 (1997)]
49. Ramaty R, Lingenfelter, Kozlovsky, in *The Light Elements and Their Evolution: Proc. of the 198th Symp. of the Intern. Astronomical Union, Brazil, 1999* (Eds L da Silva, M Spite, J R de Medeiros) (Provo, UT: Astron. Soc. of the Pacific, 2000) p. 51
50. Макриденко Л А, Котов Ю Д, Боярчук К А, Волков С Н, Салихов Р С (Ред.) *Космический комплекс "КОРОНАС-ФОТОН". Справочные материалы* (М.: ФГУП НПП ВНИИЭМ, 2008)
51. Назиров Р Р, Чулков И В, Юров В Н (Ред.) *Первые этапы летних испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-ФОТОН* (М.: ИКИ РАН, 2010)
52. Котов Ю Д и др., в сб. *Научная сессия МИФИ-2009 Т. 1* (М.: НИЯУ МИФИ, 2009) с. 100
53. Архангельский А И и др. *Труды НПП ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики* **111** (4) 9 (2009)
54. ТЕСИС, <http://www.thesis.lebedev.ru/>
55. LISIRD, <http://lasp.colorado.edu/lisird/index.html>
56. Rao A R et al. *Astrophys. J.* **714** 1142 (2010)
57. Churazov E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **323** 93 (2001)

PACS numbers: 42.62.Be, 87.50.W-, **87.63.** – d
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201006i.0661

Лазерная физика в медицине

И.А. Щербаков

В области лазерной медицины Институт общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФ) РАН сотрудничает с различными организациями. Это ряд академических институтов: Институт проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН, Институт спектроскопии РАН, Институт аналитического приборостроения РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; ведущие медицинские центры страны: Межотраслевой научно-технический комплекс (МНТК) "Микрохирургия глаза" им. академика С.Н. Федорова, Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П.А. Герцена Росздрава, Российская медицинская академия последиplomного образования, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН, Центральная клиническая больница № 1 ОАО "Российские железные дороги", а также ряд коммерческих компаний: "Оптосистемы", "Визионика", "Новые энергетические технологии", "Лазерные технологии в медицине", "Кластер", Научно-технический центр "Волоконно-оптические информационно-измерительные системы".

Уникальные свойства лазера, позволяющие максимально концентрировать энергию в пространстве, во

времени и спектральном диапазоне, делают этот прибор незаменимым инструментом во многих областях человеческой деятельности, в частности в медицине.

На рисунке 1 приведены длины волн лазеров, нашедших в той или иной степени применение в медицинской практике. Как видно, спектральный диапазон простирается от ультрафиолетовой до средней инфракрасной области. При этом диапазон плотности энергии охватывает три порядка (от 1 Дж см⁻² до 10³ Дж см⁻²), диапазон плотности мощности — 18 порядков (от 10⁻³ Вт см⁻² до 10¹⁵ Вт см⁻²), временной диапазон — 16 порядков, от непрерывного излучения (~ 10 с) до фемтосекундных импульсов (10⁻¹⁵ с). Широкие диапазоны изменения параметров излучения дают возможность организовывать самые разные механизмы воздействия на биоткани.

На первых стадиях развития лазерной медицины модель биоткани представлялась как вода с "примесями", поскольку человек, как известно, на 75–80 % состоит из воды. Поэтому механизм воздействия лазерного излучения на биоткани определяется поглощением воды. При применении непрерывных лазеров такая концепция была более или менее работоспособной. Если необходимо организовать воздействие на поверхность биоткани, то следует выбрать длину волны излучения, сильно поглощаемого водой. Для объёмного воздействия на биоткани, напротив, требуется излучение с такой длиной волны, чтобы оно слабо поглощалось водой. Однако, как выяснилось в дальнейшем, другие компоненты биоткани также обладают способностью поглощать. В частности, в видимой области спектра существует сильное поглощение крови (рис. 2). Пришло понимание того, что биоткань — это не просто вода с примесями, а гораздо более сложный объект.

В то же время начали применяться импульсные лазеры. Воздействие на биоткани при этом определяется комбинацией длины волны, плотности энергии и длительности импульса излучения. В частности, длительность лазерного импульса является важным фактором, позволяющим разделить термическое и нетермическое воздействие.

В практику вошли импульсные лазеры с большим диапазоном изменения длительности импульса — миллисекунды, микросекунды, наносекунды, пикосекунды и фемтосекунды (10⁻¹⁵ с). При этом оказываются эффективными различного рода нелинейные процессы, а именно: оптический пробой на поверхности мишени, многофотонное поглощение, образование и развитие плазмы, генерация и распространение ударных волн. Стало очевидным, что невозможно создать единый алгоритм поиска нужного лазера и в каждом конкретном случае требуется свой алгоритм. С одной стороны, это крайне осложнило задачу, с другой — открыло совершенно фантастические возможности варьировать способы воздействия на биологическую ткань.

Большое значение при взаимодействии излучения с биотканями имеет также рассеяние. На рисунке 3 приведены два конкретных примера распределения интенсивности излучения в тканях предстательной железы собаки при падении на её поверхность лазерного излучения с разными длинами волн: $\lambda = 2,09$ мкм (Ho:YAG-лазер) и $\lambda = 1,064$ мкм (Nd:YAG-лазер). В первом случае поглощение превалирует над рассеянием, во втором — ситуация обратная (табл. 1).

И.А. Щербаков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ. E-mail: director@spfi.ru