

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
им. Н. В. ПУШКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ПРОЕКТ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

ТРУДЫ РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ ПО ПРОЕКТУ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

ТАРУСА, 11–13 мая 2011 г.

ПОД РЕДАКЦИЕЙ В. Д. КУЗНЕЦОВА

МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

МОСКВА
2012

Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Труды рабочего совещания
Таруса, 11–13 мая 2011 г.
Под ред. В. Д. Кузнецова

Рабочее совещание по проекту ИНТЕРГЕЛИОЗОНД состоялось с 11 по 13 мая 2011 г. в Тарусе, Россия, на базе Специального конструкторского бюро Института космических исследований РАН (СКБ ИКИ РАН). В совещании приняло участие около 40 специалистов из научно-исследовательских институтов — участников проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. На совещании были заслушаны доклады руководителей экспериментов, которые предложены для реализации на борту космического аппарата «Интергелиозонд», предназначенного для исследования внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений. Настоящий сборник содержит статьи, в которых дается краткое описание научных экспериментов в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД.

INTERHELIOPROBE Project. Workshop Proceedings
Tarusa, 11–13 May 2011
Ed. V. D. Kuznetsov

The Workshop on the INTERHELIOPROBE Project was held during May 11–13, 2011 at the Special Design Bureau of the Space Research Institute at Tarusa. The Workshop was attended by about 40 experts from the research institutions — participants of the Project. The Principal Investigators submitted their proposals concerning the experiments on board the INTERHELIOPROBE mission aimed at the study of the inner heliosphere and the Sun at close distances and from out-of-ecliptic positions. The book of Proceedings contains papers that provide a brief description of the scientific experiments to be realized within the frames of the INTERHELIOPROBE Project.

Редакторы: *Егорова И. Н., Корниленко В. С.*
Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*
Дизайн обложки: *Захаров А. Н.*

Содержание

Научные задачи проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>В. Д. Кузнецов</i>	5
Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг». Наземный прототип <i>В. Н. Обридко, И. Е. Кожеватов, Е. А. Руденчик</i>	15
Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг». Общее описание <i>В. Н. Обридко, И. Е. Кожеватов, Е. А. Руденчик, Е. Х. Куликова, В. Д. Кузнецов</i>	21
Комплекс изображающих инструментов проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>С. В. Кузин, С. А. Богачев, С. В. Шестов, А. А. Перцов, А. С. Ульянов, А. А. Рева, А. Кириченко, И. В. Зимовец, В. Д. Кузнецов</i>	27
Солнечный рентгеновский телескоп «Соренто» для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>А. Кириченко, И. В. Зимовец, С. А. Богачев, С. В. Кузин</i>	36
Фотометрические наблюдения флуктуаций излучения Солнца в эксперименте Фотоскоп <i>Н. И. Лебедев, Ю. Д. Жугжда, В. Д. Кузнецов, С. И. Болдырев</i>	47
«Хемикс» – солнечный брегговский спектрометр мягкого рентгеновского диапазона нового поколения <i>Я. Сильвестр, Я. Бакала, П. Подгорски, М. Ковалиньски, З. Кордылевски, С. Гбурек, В. Тржебиньски, В. Д. Кузнецов, С. И. Болдырев</i>	52
Прецизионная спектрометрия мягкого и жесткого рентгеновского излучения Солнца прибором ПИНГ-М в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>А. С. Гляненько, Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, Е. Э. Лупарь, Ю. А. Трофимов, И. В. Рубцов, Е. А. Жучкова, А. В. Кочемасов</i>	65
Поляриметрия жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек <i>Ю. Д. Котов, А. С. Гляненько, В. Н. Юров, Е. А. Жучкова, О. Н. Умнова, В. А. Дергачев, В. М. Круглов, Г. А. Матвеев, В. П. Лазутков, Д. В. Скородумов, М. И. Савченко</i>	76
Исследование линейчатого гамма-излучения солнечных вспышек с высоким энергетическим разрешением в эксперименте СИГНАЛ <i>С. Е. Улин, А. М. Гальпер, В. В. Дмитренко, З. М. Утешев, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, А. С. Новиков, И. В. Архангельская, К. В. Кривова</i>	88

Исследование жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков в эксперименте ГЕЛИКОН-И проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>М. В. Уланов, Р. Л. Аптекарь, С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец, Ф. П. Олейник, В. Д. Пальшин, Д. С. Свинкин, З. Я. Соколова, Д. Д. Фредерикс</i>	99
Исследование процессов образования и переноса в ближней и дальней гелиосфере солнечных космических лучей по измерениям электронов и ионов вблизи солнечной короны, а также спектров и поляризации нейтрального излучения, сопровождающего солнечные вспышки <i>А. М. Амелюшкин, В. В. Богомолов, Н. Н. Веденькин, В. И. Галкин, А. Ф. Июдин, О. В. Морозов, М. И. Панасюк, С. И. Свертилов, И. В. Яшин</i>	105
Исследование солнечного ветра в эксперименте ГЕЛИОН проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>М. И. Веригин, А. П. Ремизов, Г. А. Котова, В. В. Безруких, В. Трухлик, Ф. Хрушка, Г.-У. Аустер, Л. Гуикинг, М. Хильхенбах</i>	132
Измерения электронов солнечного ветра в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (эксперимент ГЕЛИЕС) <i>Р. А. Ковражкин, Г. А. Владимирова, А. Л. Глазунов, Ж.-А. Сого, Ж.-Ж. Токавен</i>	139
Изучение межпланетной и межзвездной пыли вблизи Солнца в миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (детектор пыли ПИПЛС-А) <i>Т. А. Шахвердян, О. Л. Вайсберг, Р. Срама</i>	144
Изучение ионизационного состояния солнечного ветра в миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (анализатор ионов ПИПЛС-Б) <i>О. Л. Вайсберг, Г. В. Койнаш, П. П. Моисеев, В. В. Летуновский, А. К. Тоньшев, С. Н. Подколзин, А. Ю. Шестаков, Р. Н. Журавлев, Т. А. Шахвердян</i>	151
Исследование межпланетной среды на космическом аппарате «Интергелиозонд» с помощью волнового эксперимента ИМВЭ <i>А. А. Скальский, Г. Н. Застенкер, Н. Л. Бородкова, К. В. Ануфрейчик, И. А. Добровольский, С. И. Климов, А. А. Петрукович, Н. Е. Рыбьева, В. В. Храпченков, З. Немечек, Я. Шафранкова, Л. Прех</i>	156
Магнитный эксперимент ГЕЛИОМАГ в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД <i>В. А. Стяжкин, Г. У. Аустер, В. Магнец</i>	169
Радиоизмерения в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (эксперимент РСД) <i>В. В. Фомичев, Г. П. Чернов, И. С. Прутенский, В. Д. Кузнецов, Х. Роткель, М. Моравский</i>	178

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

В. Д. Кузнецов

Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк

Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД предназначен для исследований внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений на гелиоцентрических орбитах. Дается описание актуальности, основных научных целей и задач проекта, предварительного состава комплекса научной аппаратуры, баллистического сценария и рабочих орбит космического аппарата. Обсуждаются возможные варианты кооперации с другими солнечно-гелиосферными космическими миссиями.

ВВЕДЕНИЕ

В физике Солнца и солнечно-земной физике остаются нерешенными вопросы: нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра; триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности — вспышек и выбросов массы; механизмы генерации и распространения энергичных частиц на Солнце и в гелиосфере; механизм солнечного динамо и 11-летнего солнечного цикла и др. Эти и многие другие проблемы гелиофизики представляют общий астрофизический интерес, поскольку аналогичные явления и процессы происходят на далеких звездах, а их детальное изучение возможно только на ближайшей к нам звезде — Солнце. Практический интерес изучаемых проблем связан с воздействием Солнца на Землю и влиянием факторов космической погоды на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе.

Ныне действующие солнечные космические миссии (SOHO, STEREO, SDO, HINODE и др.) и исследования прошлых лет (Yohkoh, КОРОНАС-Ф и др.) много дали для понимания того, как устроено Солнце, как оно работает, для изучения солнечно-земных связей. Дальнейшее продвижение в интерпретации происходящих на Солнце и в гелиосфере процессов связано с необходимостью новых исследований. Дистанционное зондирование Солнца с близких расстояний с высоким пространственным разрешением наряду с локальными измерениями вблизи светила, а также внеэклиптические наблюдения станут следующим шагом в нашем стремлении узнать больше о Солнце и околосолнечном пространстве.

В проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД [Oraevsky et al., 2001; Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, 2004] космический аппарат сблизится с Солнцем до расстояний в 60...70 солнечных радиусов и станет постепенно выходить из плоскости эклиптики, т.е. угол между плоскостью орбиты аппарата и плоскостью эклиптики будет возрастать.

Основные научные цели и задачи миссии:

- исследование магнитных полей в приполярных областях Солнца, динамо-механизма и солнечного цикла; структуры магнитного поля в приполярных областях; меридиональных течений и переноса магнитного поля к полюсам; солнечной постоянной и ее вариаций во внеэклиптических направлениях;

- исследование тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы; тонких магнитоплазменных образований, их динамики и роли в строении солнечной атмосферы и инициировании энерговыделения источников солнечного ветра на Солнце;

- исследование механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра; процессов энерговыделения от малых до больших масштабов и их роли в нагреве солнечной короны и ускорении солнечного ветра (микро- и нановспышки); волновых и турбулентных процессов в солнечном ветре, их роли в ускорении солнечного ветра; свойств солнечного ветра на разных гелиоширотах; структуры гелиосферного магнитного поля;

- изучение природы и глобальной динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности — солнечных вспышек и выбросов и их влияния на гелиосферу и космическую погоду; триггерных механизмов вспышек и выбросов; эффектов вспышек и выбросов в ближней и дальней короне, в гелиосфере (магнитные облака, ударные волны); гелиодолготной протяженности и динамики выбросов массы;

- исследование генерации и распространения энергичных частиц на Солнце и в гелиосфере; процессов ускорения заряженных частиц, генерации нейтронов и гамма-излучения во вспышках; связи активных явлений на Солнце с потоками энергичных частиц в гелиосфере.

Орбита космического аппарата (КА) «Интергелиозонд» позволит выполнить новые виды исследований, такие как внеэклиптические измерения, координированные наблюдения Солнца с близких расстояний и локальные измерения вблизи Солнца, наблюдения невидимой с Земли стороны Солнца.

Наблюдения с высоким пространственным разрешением, которые станут возможными за счет приближения космического аппарата к Солнцу, будут направлены на изучение тонкой струк-

туры и динамики солнечной атмосферы — мелкомасштабной магнитной структуры и активности (магнитная сетка и магнитный ковер), микровспышек и микропересоединений. Важно также понять их связь с механизмами нагрева солнечной короны, с формированием и ускорением солнечного ветра.

Исследование магнитных полей в приполярных областях Солнца будет осуществляться на внеэклиптических участках орбиты и направлено на лучшее понимание механизма солнечного цикла и солнечного динамо, изучение приполярных движений и меридиональной циркуляции, переноса магнитных полей, таких явлений как полярные выбросы, корональные дыры, быстрый и медленный солнечный ветер (а также торнадо, полярные перья и т. д.).

Изучение механизмов нагрева солнечной короны в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД будут связаны с наблюдениями процессов энерговыделения в разных масштабах — от малых петель и микровспышек до больших арок и вспышек. Наблюдение с высоким пространственным и временным разрешением позволит исследовать источники солнечного ветра на Солнце и роль мелкомасштабных энерговыделений в нагреве короны и ускорении солнечного ветра.

В изучении корональных выбросов массы важную роль будут играть как наблюдения с высоким пространственным разрешением, которые необходимы для изучения триггерных механизмов выбросов, так и внеэклиптические наблюдения. Они дадут новое видение картины инициирования выбросов, их долготной протяженности и распространения в гелиосфере, позволят увидеть эклиптическую корону, контролировать линию Солнце—Земля и видеть глобальную картину в плоскости эклиптики.

В исследовании солнечных вспышек и выбросов ключевым остается вопрос о триггерных механизмах. Наблюдения с высоким пространственным разрешением будут направлены на изучение связи изменений магнитного поля и движений плазмы с накоплением магнитной энергии и высвобождением ее в виде вспышек и выбросов.

Генерация энергичных частиц на Солнце, их распространение в гелиосфере будут изучаться с помощью дистанционных наблюдений и локальных измерений в гелиосфере. Гелиосферное магнитное поле имеет сложную топологию. Локальные внеэклиптические измерения дадут новую информацию о гелиосферном магнитном поле и распространении частиц в гелиосфере, что позволит более детально изучить формирование радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и улучшить ее предсказание.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ СЦЕНАРИЙ МИССИИ

Для сближений с Солнцем и наклона плоскости орбиты к плоскости эклиптики будут использованы многократные гравитационные маневры у Венеры. Баллистическая схема миссии, рассчитанная НПО им. С.А. Лавочкина, приведена на рис. 1. Она включает короткую эллиптическую фазу, в которой КА приблизится

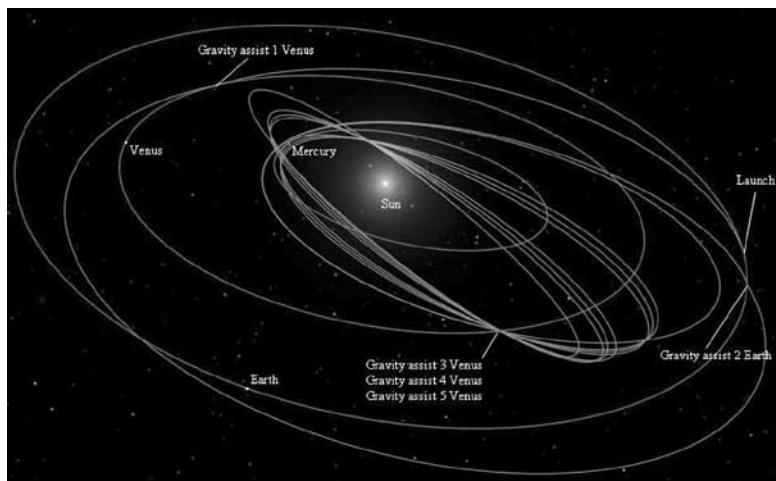


Рис. 1. Баллистическая схема миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД



Рис. 2. Баллистическая схема миссии ПОЛЯРНО-ЭКЛИПТИЧЕСКИЙ ПАТРУЛЬ — расширенный вариант миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

к Солнцу на расстояние 60...70 солнечных радиусов. Максимальное наклонение плоскости орбиты к плоскости эклиптики составит около 30°. Внеэклиптическая фаза станет основной и наиболее длительной фазой миссии.

Непрерывные внеэклиптические наблюдения Солнца могут быть обеспечены в баллистической схеме проекта ПОЛЯРНО-ЭКЛИПТИЧЕСКИЙ ПАТРУЛЬ (ПЭП) (рис. 2) [Kuznetsov, Orlovsky, 2002], когда два космических аппарата помещаются на наклоненные в разные стороны орбиты и при движении по орбитам разделены на четверть периода, так что сменяя друг друга один из аппаратов всегда будет вне плоскости эклиптики. Такая баллистическая схема обеспечит также координированные наблюдения Солнца и локальные измерения в плоскости эклиптики и вне нее, непрерывный контроль линии Солнце – Земля из внеэклиптического положения, и она рассматривается как расширенный вариант миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД.

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Состав научных приборов, их назначение и основные характеристики представлены в табл. 1 и 2. Комплекс научной аппаратуры включает приборы для дистанционных наблюдений Солнца, короны и гелиосферы, а также приборы для локальных гелиосферных измерений.

В табл. 3 приведены измерительные каналы приборов на общей шкале длин волн и энергий.

В табл. 4 показано, в решении каких научных задач будут использоваться данные наблюдений каждого прибора научного комплекса.

Более подробная информация о приборах научного комплекса, их измерениях, характеристиках и решаемых задачах содержится в статьях настоящего сборника.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Космический аппарат, который должен обеспечить функционирование комплекса научной аппаратуры на рабочих орбитах в условиях повышенных потоков излучения и радиации, находится в стадии разработки в НПО им. С. А. Лавочкина. Аппарат будет иметь тепловой экран для защиты от перегрева, отверстия в котором обеспечат поля зрения для оптических приборов. Объем передаваемой телеметрии составит около 1 ГБ/сут.

Таблица 1
Приборы для дистанционных наблюдений

Прибор	Измерения	Характеристики
Солнечный вектор-магнитограф «Тахомаг»	Параметры Стокса излучения, полный вектор магнитного поля и полей скоростей, интенсивность континуума	Поле зрения ~600 угл. с ($60 R_{\odot}$); $\lambda = 6300 \text{ \AA}$; чувствительность — 2 Гс; пространственное разрешение — 50 км (0,2 угл. с)
Многоканальный солнечный фотометр «Фотоскоп»	Измерения солнечной постоянной, собственные глобальные колебания Солнца	Поле зрения — 10° ; $\lambda = 300...16000 \text{ \AA}$
Спектрометр рентгеновский изображающий «Грек»	Изображения солнечного диска, локализация активных областей	Поле зрения — $0,7...2^{\circ}$; угловое разрешение* — $250...650 \text{ км}$; $\lambda = 132; 171; 304; 8,42 \text{ \AA}$
Солнечный рентгеновский изображающий телескоп «Соренто»	Изображения источников рентгеновского излучения, измерение спектров	Поле зрения — $1,5^{\circ}$; диапазон энергий $5...100 \text{ кэВ}$; угловое разрешение — $1100...2850 \text{ км}$; временное разрешение — $0,1 \text{ с}$
Внезатменный коронограф «Ока»	Изображение короны, эруптивные явления, транзиенты	Поле зрения — 8° ; угловое разрешение — $3000...7500 \text{ км}$; $\Delta\lambda = 4000...6500 \text{ \AA}$
Гелиосферный телескоп «Гелиосфера»	Изображения гелиосферы	Поле зрения — 20° ; угловое разрешение — $7500...19\,000 \text{ км}$; $\Delta\lambda = 4000...6500 \text{ \AA}$
Поляриметр рентгеновский «Пинг-М»	Поляризация солнечного рентгеновского излучения	$E_{\text{поляр}} = 20...150 \text{ кэВ}$; $E_{x,\gamma} = 0,002...10 \text{ МэВ}$
Сцинтилляционный гамма-спектрометр «Геликон-И»	Энергетические спектры жесткого X- и γ -излучения	$E = 10 \text{ кэВ} - 15 \text{ МэВ}$; $\Delta E/E = 0,15 \%$ (660 кэВ); временное разрешение — 1 с
Гамма-спектрометр «Сигнал»	Солнечное γ -излучение	$E_{\gamma} = 0,05...5 \text{ МэВ}$; временное разрешение — $0,1...60 \text{ с}$
Рентгеновский спектрометр «Хемикс»	Рентгеновские спектры короны, химический состав короны	$\Delta\lambda = 1,3...8 \text{ \AA}$

* В данном случае под угловым разрешением понимается линейный размер разрешения на солнечной поверхности в зависимости от расстояния между КА и Солнцем.

Таблица 2

Приборы для локальных измерений

Прибор	Измерения	Характеристики
Анализатор электронов солнечного ветра «Гелиес»	Функция распределения электронов солнечного ветра	$E = 2 \text{ эВ} - 5 \text{ кэВ}$; $\Delta E/E = 0,18$; поле зрения $- 70 \times 360^\circ$
Анализатор ионов солнечного ветра «Гелион»	Энергетические и угловые спектры ионов солнечного ветра	Ионы: $E = 50...12\,000 \text{ эВ}$; $\Delta E/E = 3\%$; FOV $- 120 \times 100^\circ$. Электроны: $E = 0,3...5250 \text{ эВ}$; $\Delta E/E = 9\%$; FOV $- 10 \times 20^\circ$
Магнитометр «Гелиомаг»	Гелиосферное магнитное поле и его возмущения	$\pm 2048 \text{ нТ}$
Анализатор плазмы солнечного ветра ПИПЛС	Ионный состав солнечного ветра, пылевые частицы	$M = 10^{-16}...10^{-6} \text{ г}$; $V = 5...100 \text{ км/с}$; $M/\Delta M > 100$; $E = 50...5000 \text{ эВ}$; $\Delta E/E = 83\%$
Магнитоволновой комплекс ИМВЭ	Магнитные и электрические поля, плазменные волны	$f = 10 \text{ Гц} - 1 \text{ МГц}$
Радиоспектрометр-детектор РСД	Радиоизлучение короны, плазмы солнечного ветра	$f = 20...300 \text{ МГц}$
Телескоп заряженных частиц СКИ-5	Энергичные частицы	Электроны: $E = 0,04...10 \text{ МэВ}$. Протоны: $E = 2...120 \text{ МэВ}$. Ионы: $E = 10...200 \text{ МэВ/н}$
Детектор нейтронов «ИнтерСонг»	Солнечные нейтроны, жесткое X- и γ -излучение	$E_n = 0,1...100 \text{ МэВ}$; $E_\gamma = 0,03...10 \text{ МэВ}$

Таблица 3

Измерительные каналы приборов КА «Интергелиозонд»

Электромагнитное излучение

Оптика		Ультрафиолет			Рентген			Гамма		
12 400 Å	1240 Å	124 Å	12,4 Å	1,24 Å	0,124 Å	10 ⁻² Å	10 ⁻³ Å	10 ⁻⁴ Å	10 ⁻⁵ Å	10 ⁻⁶ Å
1 эВ	10 эВ	100 эВ	1 кэВ	10 кэВ	100 кэВ	1 МэВ	10 МэВ	100 МэВ	1 ГэВ	10 ГэВ
Солнечный вектор-магнитограф «ТАХОМАГ»										
Солнечный фотометр «Фотоскоп»										
Гамма-спектрометр «Геликон-И»										
Гамма-спектрометр «Сигнал»										
Рентгеновский поляриметр «Пинг-М»										
Рентгеновский спектрометр «Хемикс»										
Рентгеновский изобращающий спектрометр «Грек»										
Рентгеновский телескоп «Соренто»										
Коронаграф «Ока»										
Гелиосферный телескоп «Гелиосфера»										
Магнитоволновой комплекс ИМВЭ $f = 10$ Гц – 1 МГц										
Радиоспектрометр-детектор РСД $f = 30$ кГц – 300 МГц										
Магнитометр «Гелиомаг» ± 2048 нТ										
Корпускулярное излучение										
1 эВ	10 эВ	100 эВ	1 кэВ	10 кэВ	100 кэВ	1 МэВ	10 МэВ	100 МэВ	1 ГэВ	10 ГэВ
Телескоп заряженных частиц СКИ-5										
Детектор нейтронов «ИнтерСонг»										
Анализатор плазмы солнечного ветра ПИПЛС										
Анализатор ионов солнечного ветра «Гелион»										
Анализатор электронов солнечного ветра «Гелиес»										

Таблица 4

Научные задачи и приборы

Основные задачи		Приборы
1 Динамо и цикл	←	1 «Тахомаг»
		2 «Фотоскоп»
		3 «Пинг-М»
2 Тонкая структура и динамика	←	4 «Геликон»
		5 «Сигнал»
		6 «Соренто»
3 Нагрев короны и ускорение солнечного ветра	←	7 «Трек»
		8 «Хемикс»
		9 «Ока»
4 Вспышки, выбросы, гелиосфера и космическая погода	←	10 «Гелиосфера»
		11 ПИПЛС
		12 «Гелиес»
		13 «Гелион»
		14 СКИ-5
5 Генерация и распространение частиц в гелиосфере	←	15 «ИнтреСонг»
		16 «Гелиомаг»
		17 ИМВЭ
		18 РСД

**КООПЕРАЦИЯ С ДРУГИМИ
СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНЫМИ МИССИЯМИ**

Реализация миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД может пересечься по срокам с другими солнечно-гелиосферными миссиями, которые находятся в стадии разработки в НАСА (SOLAR PROBE PLUS [Solar Probe Plus..., 2008]) и в ЕКА (SOLAR ORBITER [Solar Orbiter..., 2011]). В этом случае станет возможной организация координированных наблюдений и измерений с пространственно разнесенных аппаратов, что позволит обеспечить глобальный обзор солнечной активности, более детальную пространственно-временную картину солнечных и гелиосферных явлений: вспышек, выбросов, потоков солнечного ветра и энергичных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

- [Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, 2004] Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД // Результаты фундаментальных космических исследований в России 1999–2001 гг. / Под ред. Боярчука А. А. 2004. С. 18.
- [Kuznetsov, Oraevsky, 2002] *Kuznetsov V. D., Oraevsky V. N.* “Polar Ecliptic Patrol” (PEP) for Solar Studies and Monitoring of Space Weather // J. British Interplanetary Society. 2002. V. 55. N. 11/12. P. 398–403.
- [Oraevsky et al., 2001] *Oraevsky V. N., Galeev A. A., Kuznetsov V. D., Zelenyi L. M.* Solar Orbiter and Russian Aviation and Space Agency Interhelioprobe // Proc. of “Solar Encounter: The First Solar Orbiter Workshop”. Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, May 14–18, 2001 (ESA SP-493. ESA, Sept. 2001). 2001. P. 95–108.
- [Solar Orbiter..., 2011] Solar Orbiter — Exploring the Sun-heliosphere connection: definition Study Report. European Space Agency. ESA/SRE. July 14, 2011.
- [Solar Probe Plus..., 2008] Solar Probe Plus: Report of the Science and Technology definition Team. PRE-PUBLICATION VERSION. Febr. 14, 2008.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП «ТАХОМАГ». НАЗЕМНЫЙ ПРОТОТИП

В. Н. Обридко¹, И. Е. Кожеватов², Е. А. Руденчик¹

¹ Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк

² Научно-исследовательский радиофизический институт, Россия, 603950, Нижний Новгород, Большая Печерская, 25/12а

Представлен спектромагнитограф ИЗМИРАН — наземный прототип «Тахомаг», входящего в состав комплекса научной аппаратуры комической миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Уникальная особенность прототипа при его использовании и в космическом варианте — новый параллельный тип анализатора поляризации. Он обеспечивает параллельные (одновременные) измерения шести поляризационных компонентов спектральных линий и получение полного вектора Стокса магнитного поля одновременно в двух солнечных магнитоактивных линиях с точностью 4 Гс по продольному полю и 150 Гс по поперечному. В статье описана схема и принцип работы анализатора поляризации. Приведено сравнение данных измерений параметров Стокса, выполненных на спектромагнитографе ИЗМИРАН и на поляриметре HINODE. Затронуты вопросы калибровки поляризации.

Наземным прототипом космического многофункционального оптического телескопа «Тахомаг» (МФОТ «Тахомаг») для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (статья в настоящем сборнике *Обридко В. Н. и др. Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг». Общее описание*) стал «Спектромагнитограф ИЗМИРАН». Его устройство и методы калибровки описаны в работах [Кожеватов и др., 2004; 2011; Руденчик и др., 2011]. Принципиальная схема спектромагнитографа показана на рис. 1.

Как и в космическом варианте прибора в нем можно выделить несколько основных частей:

- питающий оптический телескоп, который состоит из целостатной пары М1 и М2, главного зеркала М3, ньютоновского (или кассегреновского) зеркала М4 и диагонального зеркала М5. Телескоп строит изображение Солнца на входной щели спектрографа Д1;
- спектрограф, состоящий из коллиматорного зеркала М6, дифракционной решетки (ДР) и камерного зеркала М7;
- анализатор поляризации (АП) с объективами О1, О2, строящими изображение выходной щели спектрографа Д2 в шести состояниях поляризации на ПЗС-камере с контроллером К1;
- ИПФ-фильтр с оптикой, строящей изображение Солнца в линии H_{α} на ПЗС-камере с контроллером К2.

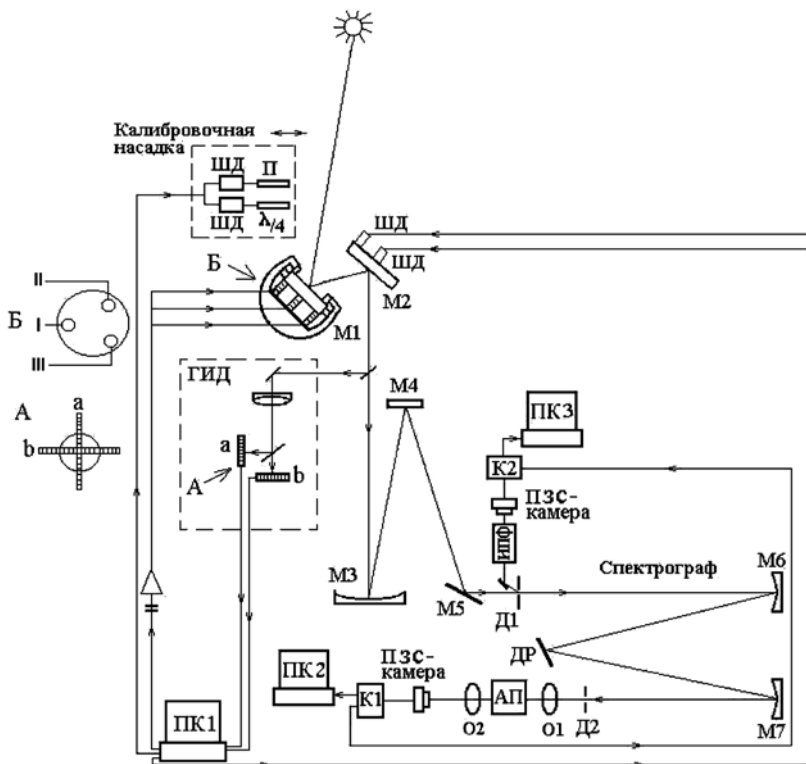


Рис. 1. Принципиальная схема «Спектромагнитографа ИЗМИРАН»

Для определения положения Солнца на входной щели спектрографа используется система гидирования, которая строит изображение Солнца на скрещенных ПЗС-линейках (а, б, см. рис. 1) и передает сигнал с линеек на компьютер ПК1, который вырабатывает координаты центра Солнца в системе координат линеек, жестко связанной с системой координат на входной щели. Управляющий сигнал подается на целостатное и дополнительное зеркало, что позволяет осуществлять сканирование активной области по щели спектрографа и стабилизировать изображение во время экспозиции с точностью до 1 угл. с. Подобную схему планируется использовать и в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД с тем, однако, отличием, что вместо громоздкой целостатной пары для сканирования будет использоваться небольшое диагональное зеркало (статья в настоящем сборнике Кожеватов И. Е. и др. Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг»; см. рис. 1,

зеркало МЗ). Это потребует создания отдельного блока, содержащего небольшой телескоп и позволяющего определять координаты центра Солнца. При характерных параметрах современных линеек (число пикселей 2048, динамический диапазон $\sim 10^3$, частота опроса $\sim 10^3$ Гц) координаты центра Солнца могут быть определены с точностью до 0,01 угл. с и частотой около 1000 Гц. Такая схема позволит наводить телескоп на область с заданными координатами средствами самого МФОТ.

Для более точного сканирования и стабилизации изображения в МФОТ «Тахомаг» будет использована схема, определяющая сдвиги изображения по максимуму корреляционной функции. Необходимость такой схемы обусловлена в первую очередь тем, что в наблюдаемой области может иметь место собственное движение, а во-вторых, таким образом дублируется процедура определения координат Солнца, что повышает общую надежность всего комплекса аппаратуры. Подобный коррелятор (Correlation Tracker) используется на Hinode в схеме стабилизации с частотой обратной связи около 20 Гц. Метод определения сдвигов по максимуму корреляционной функции используется и в «Спектромагнитографе ИЗМИРАН» при построении карт магнитного поля.

В «Спектромагнитографе ИЗМИРАН» испытаны все основные идеи и некоторые технические решения, используемые в МФОТ «Тахомаг». Прежде всего, это относится к анализатору поляризации (АП, рис. 2), который представляет собой наиболее оригинальный элемент обоих приборов. Входная щель магнитографа, лежащая в плоскости изображения спектра, расположена в фокусе объектива O_1 . Поэтому после прохождения объектива каждой точке на входной щели магнитографа ставится в соответствие пучок параллельных лучей. АП состоит из элементов с плоскими поверхностями, поэтому при распространении внутри него лучи остаются параллельными.

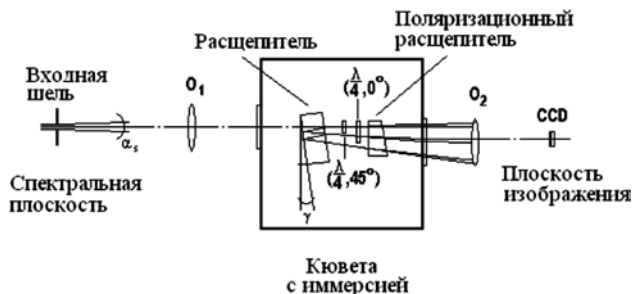


Рис. 2. Анализатор поляризации

Объектив O_2 , в фокусе которого расположена матрица ССD-камеры, собирает все параллельные лучи в одну точку, причем положение этой точки определяется только углом распространения лучей и не зависит от пробега фазы. Отметим, что при работе в непараллельных лучах (такие варианты использовались в ранних версиях АП) требование синфазности становится обязательным, что значительно затрудняет юстировку анализатора. После прохождения объектива O_1 пучки падают на расщепитель, который делит каждый из них на три пучка примерно равной интенсивности, разнесенные как по пространству, так и углам. Последнее обеспечивается тем, что грани расщепителя не параллельны, а имеют небольшой клин. Пучок, отразившийся в расщепителе четыре раза, попадает непосредственно на поляризационный расщепитель, представляющий собой кристалл исландского шпата. Компоненты излучения с горизонтальной и вертикальной линейными поляризациями разносятся по углам, и таким образом формируется анализатор линейной поляризации. Пучок, отразившийся в расщепителе два раза, проходит дополнительно четвертьволновую пластину, что позволяет сформировать анализатор круговой поляризации. И, наконец, пучок, не испытавший отражений, проходит две четвертьволновые пластины, повернутые под углом 45° , что формирует анализатор линейной поляризации, повернутой на 45° к горизонту. В результате на матрице ССD-камеры строится шесть изображений входной щели магнитографа, соответствующих шести состояниям поляризации, причем таким, которые позволяют построить устойчивую матрицу преобразования наблюдаемых величин в параметры Стокса.

В отличие от АП, использованного на Hinode, где изменение числа четвертьволновых пластин осуществляется последовательно во времени, анализатор поляризации «Спектромагнитографа ИЗМИРАН» не имеет движущихся частей. Это позволяет легко изменять экспозицию и «разменивать» быстродействие на разрешение, т. е. исследовать быстрые процессы (например, вспышки) с высоким временным разрешением, а медленные — с высоким пространственным разрешением.

Анализатор поляризации для МФОТ «Тахомаг» может быть испытан на базе телескопа и «Спектрографа ИЗМИРАН», для чего достаточно увеличить высоту щели последнего до 40 мм. При разработке, изготовлении и испытаниях АП «Тахомаг» будет использован опыт, накопленный при работе с АП «Спектромагнитографа ИЗМИРАН». Прежде всего, это относится к устранению интерференционных эффектов, уменьшению аберраций оптики и калибровке чувствительности пикселей камер.

Отдельно стоит вопрос о калибровке поляризации. В «Спектромагнитографе ИЗМИРАН» для сквозной калибровки используется поляризационная насадка, которая устанавливается перед целостатным зеркалом. Подобная методика может быть использована и для МФОТ «Тахомаг», если его разместить в параллельном пучке после целостатной пары. При таком расположении можно провести комплексные исследования МФОТ «Тахомаг».

Однако при этом необходимо будет с высокой точностью определить поляризацию зеркал целостата. Вторая проблема — необходимость увеличения входной апертуры телескопа до 50 см (в настоящее время она составляет 40 см). Другой путь — использование квазисолнечного источника неполяризованного света. Третий путь — создание для МФОТ «Тахомаг» отдельной платформы, которая скомпенсирует суточное движение Солнца.

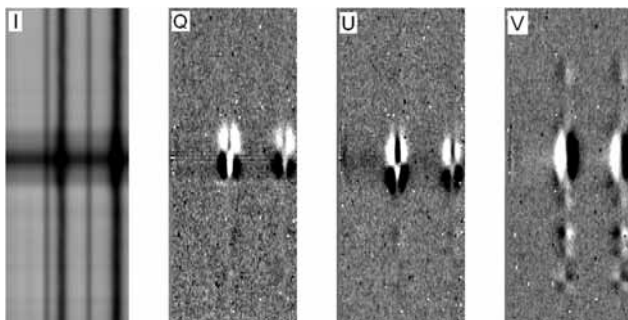


Рис. 3. Параметры Стокса, измеренные «Спектромагнитографом ИЗМИРАН»

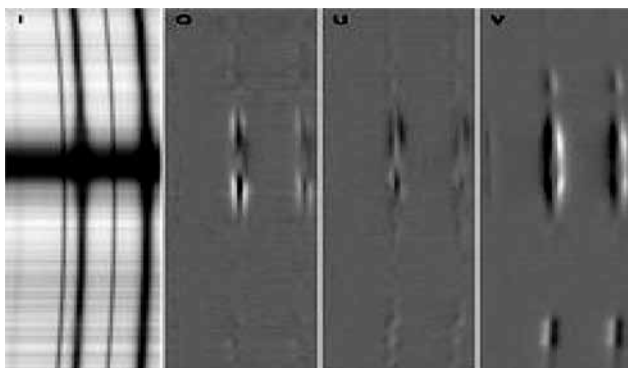


Рис. 4. Параметры Стокса, измеренные поляриметром HINODE

С помощью «Спектрографа ИЗМИРАН» могут быть изучены эффекты, возникающие при уменьшении шели до 5 мкм (рабочая ширина шели спектрографа) и исследованы свойства дифракционной решетки спектрографа «Тахомаг».

«Спектромагнитограф ИЗМИРАН» позволяет измерять параметры Стокса в окрестности солнечных магнитоактивных линий FeI 6301,5 Å и 6302,5 Å с точностью, определяемой квантовыми шумами приемников излучений, которые составляют примерно $2 \cdot 10^{-3}$. В предположении об однородности магнитного поля в области, соответствующей одному пикселю приемной матрицы, это обеспечит точность определения поля по одному кадру изображения, равную 4 Гс по продольному полю и 150 Гс по поперечному. Примеры распределения параметров Стокса, полученные «Спектромагнитографом ИЗМИРАН» и поляриметром Hinode, приведены на рис. 3 и 4.

Измерения структуры полных профилей параметров Солнца на Hinode показали, что даже в спокойной области Солнца существуют неразрешаемые оптически магнитные элементы с напряженностью поля порядка 1000 Гс [Viticchie et al., 2011]. Тем более, это справедливо для наземных магнитографов, где разрешение значительно хуже из-за влияния атмосферы. Главная задача, возникающая при интерпретации данных спектромагнитографа — определение допустимых параметров неразрешаемых неоднородностей магнитного поля. Алгоритмы такой задачи могут быть использованы при интерпретации данных МФОТ «Тахомаг».

ЛИТЕРАТУРА

- [Кожеватов и др., 2004] Кожеватов И. Е., Руденчик Е. А., Черагин Н. П., Иошпа Б. А., Куликова Е. Х. Калибровка спектромагнитографа ИЗМИРАН // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 1–10.
- [Кожеватов и др., 2011] Кожеватов И. Е., Иошпа Б. А., Обридо В. Н., Руденчик Е. А., Куликова Е. Х. Вторая версия солнечного спектромагнитографа ИЗМИРАН. Часть 1. Конструкция прибора // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 130–138.
- [Руденчик и др., 2011] Руденчик Е. А., Обридо В. Н., Кожеватов И. Е., Безрукова Е. Г. Вторая версия солнечного спектромагнитографа ИЗМИРАН. Часть 2. Алгоритмы предварительной обработки данных // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 139–147.
- [Viticchie et al., 2011] Viticchie B., Almedia J. Sanchez, Del Moro D., Berrilli F. Interpretation of HINODE SOT/SP Asymmetric Stokes Profiles Observed in the Quiet Sun Network and Internetwork // Astronomy and Astrophysics. Febr., 2011. V. 526.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП «ТАХОМАГ». ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

**В. Н. Обридко¹, И. Е. Кожеватов², Е. А. Руденчик¹, Е. Х. Куликова²,
В. Д. Кузнецов¹**

¹ *Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк*

² *Научно-исследовательский радиофизический институт, Россия, 603950, Нижний Новгород, Большая Печерская, 25/12а*

Представлен многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг», создаваемый в рамках проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Он содержит спектромагнитограф для прямых измерений полного вектора магнитного поля в солнечной фотосфере с близких к Солнцу расстояний (~60 солнечных радиусов) с высоким пространственным и спектральным разрешением. С помощью «Тахомаг» предполагается провести исследование тонкой структуры солнечной атмосферы в различных спектральных линиях и поляризациях; исследование характеристик магнитного поля солнечной фотосферы от низких до высоких эклиптических широт; исследование магнитных полей в приполярных областях Солнца. Даны предварительная оптическая схема «Тахомаг» и его предполагаемые характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из интригующих загадок солнечной атмосферы — тонкая структура магнитных полей на уровне фотосферы. Существуют многочисленные аргументы и свидетельства того, что магнитное поле сосредоточено в очень тонких жгутах, которые находятся за пределами разрешения земных телескопов. Все эти свидетельства в основном косвенные. Несмотря на большие технические трудности создания бортовых магнитографов, удовлетворяющих высоким требованиям по пространственному и временному разрешению, световой и поляризационной чувствительности, были предприняты многочисленные попытки их использования во внеатмосферных исследованиях магнитных полей солнечной фотосферы [Rust, 1987; Scherrer et al., 1995; Settele et al., 2002].

Однако загадка тонкой структуры солнечных фотосферных магнитных полей так и не была решена. Из статьи настоящего сборника (Обридко В. Н. и др. Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг». Наземный прототип) ясно, что она не могла быть решена приборами на приведенных объектах, созданных на базе фильтровых спектральных устройств, не только потому, что не хватало их пространственного разрешения, но и из-за низкого спектрального разрешения, которое не могло обеспечить

данными для постановки и решения обратных задач в условиях неоднородного магнитного поля в наблюдаемой точке.

Выше всех планка технических характеристик бортовых устройств была установлена спектромагнитографом на солнечной орбитальной станции Hinode (http://solar-b.nao.ac.jp/index_e.shtml). Солнечный спектромагнитограф Hinode обладает на сегодняшний день самым лучшим сочетанием высокого спектрального и пространственного разрешения (~150 км) по диску Солнца. Тем не менее, параметры Стокса, полученные на этом приборе, по-прежнему указывают на существование неразрешаемой структуры магнитных полей в пределах пространственного разрешения телескопа Hinode элементов солнечной фотосферы. Это обстоятельство свидетельствует о том, что нужны измерительные устройства в разы, превосходящие и без того высокую разрешающую способность спектромагнитографа.

Представляемое в настоящей статье устройство содержит спектромагнитограф полного вектора магнитного поля, который по своим техническим характеристикам очень близок к спектромагнитографу Hinode. Благодаря большему приближению к Солнцу, мы надеемся улучшить пространственное разрешение наблюдений по сравнению с Hinode в три и более раз. При этом угловое поле телескопа должно быть увеличено более чем в три раза. Это необходимо не только для того, чтобы обеспечить те же (или большие) линейные размеры наблюдаемых областей, но и получить свободу в выборе областей для сканирования на диске Солнца. Кроме того, особенность анализатора поляризации параллельного типа магнитографа «Тахомаг», позволяющая получать все параметры Стокса одновременно (без последовательного их перебора), дает возможность свободной вариации экспозиций и скоростей сканирования по солнечному диску.

Особенность траектории станции «Интергелиозонд» состоит не только в 3,5-кратном сближении с Солнцем, но и в переходе от около эллиптических орбит к орбитам его облета под углами ~30° к плоскости эклиптики. В связи с этим предполагается, используя эту возможность, получить магнитограммы не только экваториальных, но и приполярных областей солнечной фотосферы. Такие данные представляют ценность для уточнения механизмов генерации магнитных полей на Солнце и моделей солнечного динамо.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Ниже приведены основные исходные данные, которые были приняты для расчета параметров многофункционального оптического телескопа «Тахомаг» и краткий к нему комментарий.

Часть из приведенных здесь исходных данных связана с особенностями самой миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Она предусматривает не только определенный характер траектории полета и наименьшее расстояние до Солнца ($\sim 60R_{\odot}$), но и жесткие ограничения на габариты ($\sim 160 \times 130 \times 60$ см) и массу прибора (≤ 40 кг).

Основные исходные данные

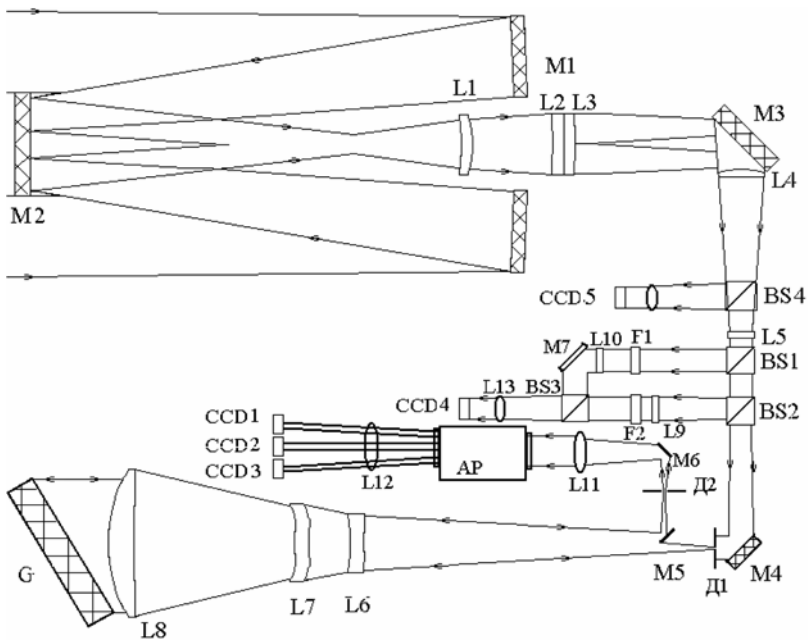
Наименьшее расстояние до Солнца	$\sim 60R_{\odot}$
Линейное разрешение телескопа в области длин волн работы спектромагнитографа $\lambda_1 = 0,6301$ мкм; $\lambda_2 = 0,6302$ мкм.	~ 50 км
Угловое поле	~ 600 угл. с (что соответствует $\sim 0,1D_c$ на удалении $60R_c$)
Диаметр первичного зеркала	50 см
Общая масса спектромагнитографа	~ 40 кг
Габариты	$\sim 160 \times 130 \times 60$ см

Другая часть исходных данных, например, линейное разрешение и угловое поле, определялась с учетом требований решаемых задач, значение апертуры телескопа (50 см) — исходя из минимального угла дифракции волн диапазона ($\lambda = 0,63$ нм) для получения углового разрешения 0,2 угл. с. Отметим, что оптический телескоп Ninode имеет такие же апертуру и угловое разрешение. Меньшее расстояние до Солнца должно обеспечить оптическому телескопу миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД трехкратный выигрыш по линейному разрешению по сравнению с оптическим телескопом миссии NINODE. Кроме того, большее угловое поле телескопа «Тахомаг» позволит проводить наблюдения на большей части солнечного диска, чем это обеспечивалось оптикой Ninode.

**2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА
«ТАХОМАГ»**

На рисунке представлена полученная в результате расчетов оптическая схема многофункционального оптического телескопа «Тахомаг». Схема рассчитана на видимый оптический диапазон от 0,3 до 0,65 мкм. Комплекс состоит из трех основных частей:

- питающий оптический телескоп;
- солнечный спектромагнитограф;
- блок узкополосных фильтров.



Оптическая схема многофункционального
оптического телескопа «Тахомаг»:

M1 — первичное зеркало; M2 — вторичное зеркало; L1–L3 — линзовый коллиматор; M3 — подвижное зеркало для сканирования и стабилизации изображения солнечного диска; L4, L5 — фокусирующая система линз; M4, M5, M6, M7 — поворотные зеркала; Д1 — входная щель спектрографа; L6–L8 — дифракционный спектрограф; G — дифракционная решетка; L11 — коллиматор анализатора поляризации; Д2 — входная щель анализатора поляризации; AP — анализатор поляризации; L9, L10, L13 — согласующие объективы; L12 — фокусирующий объектив; CCD1–CCD5 — ПЗС-камеры; BS1–BS4 — светоделители; F1, F2 — светофильтры

2.1. Питающий оптический телескоп

Питающий оптический телескоп в свою очередь включает в себя и три функциональные составляющие:

- телескопическую систему, преобразующую параллельный пучок диаметром 50 см в пучок диаметром 8 см;
- поворотное зеркало для сканирования и стабилизации изображения;
- фокусирующую систему для получения на входной щели спектромагнитографа изображения участка солнечной поверхности с требуемым разрешением, масштабом и полем.

Телескопическая система содержит первичное зеркало M1 диаметром 50 см, определяющим дифракционное угловое разрешение 0,2 угл.с в красной области (0,65 мкм) и 0,1 угл.с в синей области (0,3 мкм), вторичное зеркало M2 диаметром 20 см и линзовый коллиматор L1–L3 диаметром 8 см. Первичное изображение располагается в фокусе двух систем (M1–M2) и (L1–L3), которые преобразуют диаметры пучков в соотношении 6:1 и, соответственно, увеличивающих угловой спектр пучков в обратном соотношении.

Поворотное зеркало M3, размещенное в параллельных лучах, служит исполнительным элементом системы сканирования и стабилизации изображения солнечного диска с точностью ~0,03 угл.с. Это зеркало управляется тремя пьезоэлектрическими трансдюсерами. Контроль изображения осуществляется при помощи быстро опрашиваемой ПЗС-камеры (CCD5), на которую позиционируется небольшой участок солнечной фотосферы. Смещение изображения вычисляется по известным алгоритмам получения двумерных корреляционных функций. Цепь замкнутой обратной связи следящей системы содержит элемент управления, который работает по программе, сравнивающей реальное положение изображения с задаваемым, обеспечивая тем самым непрерывный контроль и управление в полосе частот до 10 Гц.

Фокусирующая система, включающая линзы (L4–L5), создает на входной щели дифракционного спектрографа изображение участка солнечной фотосферы с угловыми размерами 600 угл.с. Это изображение используется для регистрации полного профиля поляризационных параметров Стокса одновременно вдоль всего разреза изображения, выделяемого входной щелью спектромагнитографа.

2.2. Солнечный спектромагнитограф

Солнечный спектромагнитограф обеспечивает получение параметров Стокса в спектральной области с двумя магнитоактивными линиями нейтрального железа Fe I 6301,5 Å и Fe I 6302,5 Å. Спектромагнитограф содержит дифракционный спектрограф, включающий входную щель S1, коллиматор L6–L8, дифракционную решетку G, поворотное зеркало M5, выходную щель S2, и поляризационную оптику, в состав которой входит поворотное зеркало M6, коллиматор L11, анализатор поляризации AP, фокусирующий объектив анализатора поляризации L12 и ПЗС-детекторы CCD1–CCD3. Угловая ширина входной щели спектрографа 0,15 угл.с; разрешающая способность спектрографа 35 мÅ; чис-

ло пикселей ПЗС-детектора вдоль высоты выходной щели равно 8000.

2.3. Блок узкополосных фильтров

Блок узкополосных фильтров обеспечивает получение изображений участков солнечной поверхности в узких спектральных интервалах. Блок содержит спектроделители BS1–BS3, согласующие объективы L9, L10, L13 и ПЗС-камеру CCD4. Планируется установить два узкополосных фильтра: один на 0,3 мкм в континууме для получения фотосферного изображения Солнца с разрешением 25 км и второй на H_{α} для получения хромосферных изображений и короны с разрешением 50 км. Окончательная конфигурация блока узкополосных фильтров пока не определена. Решение будет принято после обсуждения участниками международной кооперации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье приведен предварительный вариант комплекса приборов, который представляет собой измерительное устройство оптического диапазона волн, предназначенное для получения параметров Стокса солнечных магнитоактивных линий. По своим техническим характеристикам (пространственное и спектральное разрешения, угловое поле) этот комплекс превосходит все действующие на сегодня солнечные магнитографические приборы. Однако, окончательный вариант будет утвержден к реализации после проработки технических вопросов и согласования со всеми участниками проекта.

ЛИТЕРАТУРА

- [Rust, 1987] *Rust D.M.* Use of Fabry-Perot Filter in Spaceflight Solar Vector Magnetograph: Preprint of Space Physics Groupe. The Jons Hopkins University, Jons Hopkins Road, Laurel, Maryland, Apr/Ju. 1987. N. 24.
- [Scherrer et al., 1995] *Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Schou J., Rosenberg W., Springer L., Tarbell T.D., Title A., Wolfson C.J., Zayer I.*, Team, t. M. E. The Solar Oscillations Investigation — Michelson Doppler Imager // *Solar Physics*. 1995. V. 162. P. 129–188.
- [Settele et al., 2002] *Settele A., Carroll T.A., Nickelt I., Norton A.A.* Systematic Errors in Measuring Solar Magnetic Fields with a FPI Spectrometer and MDI // *Astronomy and Astrophysics*. 2002. V. 386. P. 1123–1128.

КОМПЛЕКС ИЗОБРАЖАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОЕКТА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

С. В. Кузин¹, С. А. Богачев¹, С. В. Шестов¹, А. А. Перцов¹,
А. С. Ульянов¹, А. А. Рева¹, А. Кириченко¹, И. В. Зимовец²,
В. Д. Кузнецов³

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт
им. П. Н. Лебедева (ФИАН), Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53

² Учреждение Российской академии наук Институт космических
исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

³ Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН),
Россия, 142190, Московская обл., Троицк

Представляется комплекс изображающих инструментов рентгеновского и оптического диапазона для исследования короны Солнца, создаваемый в рамках проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. В состав комплекса входят рентгеновский телескоп-спектрометр «Соренто», телескоп вакуумного ультрафиолетового диапазона «Трек», оптический коронограф «Ока» и гелиосферный широкопольный телескоп «Гелиосфера». Комплекс предназначен для исследования различных проявлений солнечной активности как связанных процессов. Поля зрения приборов перенакладываются, что позволяет исследовать развитие отдельного явления от его зарождения в переходном слое или нижней короне до расстояния в несколько десятков солнечных радиусов над поверхностью. Управление комплексом осуществляется единым компьютером, что позволяет оптимизировать программы наблюдений. В статье представлены научные задачи комплекса и его характеристики. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 11-02-01079-а) и научной программы ОФН РАН VI.15 «Плазменные процессы в Солнечной системе».

ВВЕДЕНИЕ

Исследование солнечной короны в настоящее время считается одной из актуальных задач физики Солнца. Несмотря на значительные успехи в этой области в последние годы, связанные в первую очередь с исследованиями на космических аппаратах серии КОРОНАС, Yohkoh, SOHO, Hinode, TRACE, STEREO и SDO, остается ряд проблем, таких как определение механизмов накопления и трансформации энергии в короне, транспорт вещества из фотосферы в корону и др. Для их решения необходимы исследования сверхтонкой структуры магнитных полей в короне, изучение глобальных процессов солнечной активности, выявление связи между различными локальными процессами. Отдельно стоят задачи, которые могут иметь прикладное применение,

например изучение динамики корональных выбросов массы (КВМ) в плоскости эклиптики. На базе новых исследований можно принципиально улучшить прогнозирование геоэффективности этих событий.

Вопросы глобальной солнечной активности можно решить только наблюдением значительной части Солнца, включая невидимую с Земли область. Исследование же геоэффективных событий — проводить находясь вне плоскости эклиптики, т. е. выносить аппаратуру на околосоляную внеэклиптическую орбиту. Достоинство орбиты КА «Интергелиозонд» — возможность наблюдения приполярных областей, что важно для исследования устойчивых полярных корональных дыр как источников высокоскоростного солнечного ветра. Для орбиты «Интергелиозонда» характерны и периоды квазикоротационного исследования, когда есть возможность наблюдать одну область на Солнце в течение длительного времени. Сейчас это время ограничено примерно 12...14 днями. В то же время развитие активной области или корональной дыры значительно превышает это время.

У миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД есть и ряд ограничений, связанных со специфической орбитой. Это серьезные трудности по массе выводимой на орбиту полезной нагрузки и размерам аппаратуры, объему передаваемой информации, терморегиму и радиационным нагрузкам.

КОНЦЕПЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Комплекс изображающих инструментов, разрабатываемый в ФИАН для вывода на внеэклиптическую солнечную орбиту на борту КА «Интергелиозонд», предназначен для решения задач, связанных с изучением солнечных вспышек, последующим формированием выбросов коронального вещества, их развитием и взаимодействием с гелиосферой. Решение таких задач, очевидно, невозможно при помощи одного прибора, так как эти процессы имеют разные пространственные масштабы, существенно отличаются динамикой и проявляются в нескольких спектральных диапазонах.

Комплекс аппаратуры, представляемый ФИАН, содержит четыре независимых прибора, предназначенных для регистрации изображений в разных спектральных диапазонах, а также управляющий компьютер.

Основная концепция комплекса инструментов — регистрация изображений солнечного диска, ближней и дальней короны и гелиосферного пространства с частичным переналожением полей зрения.

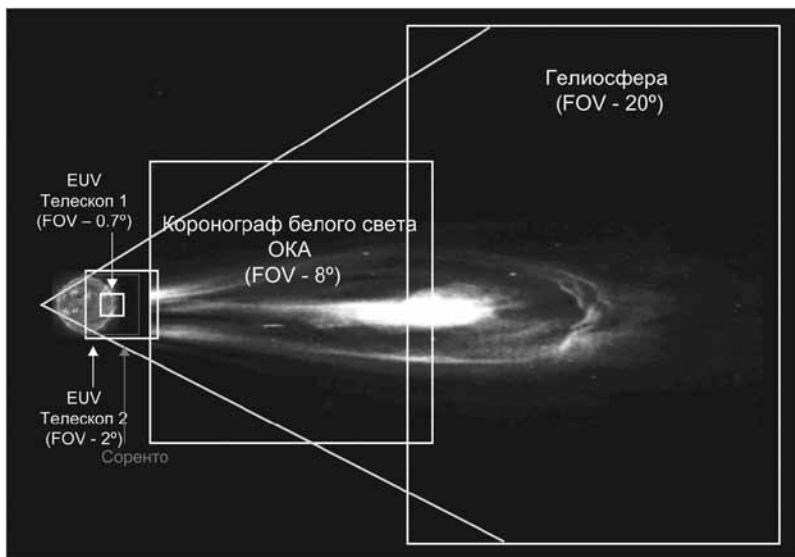


Рис. 1. Взаимное расположение полей зрения приборов «Соренто», «Трек», «Ока» и «Гелиосфера» (FOV — поле зрения)



Рис. 2. Корональный выброс массы, наблюдавшийся 13 мая 2009 г. одновременно ВУФ-телескопом «Тесис» спутника «КОРОНАС-Фотон» и оптическим коронаграфом C2 LASCO станции SOHO

Таким образом будет обеспечено «непрерывное» наблюдение окосолнечного пространства на высотах вплоть до 55 млн км (рис. 1). Комплекс приборов даст возможность проводить синхронизированные наблюдения вспышек и последующих выбросов корональной массы на разном удалении от Солнца. Пример изображения коронального выброса массы, зарегистрированный в ВУФ-диапазоне телескопом «Тесис» на спутнике «КОРОНАС-Фотон» и оптическим коронографом C2 LASCO на станции SOHO с частично пересекающимися полями зрения приведен на рис. 2.

Вместе с тем, каждый из изображающих приборов может работать полностью независимо от остальных и способен решать самостоятельные научные задачи.

Основные характеристики приборов ФИАН приведены в таблице.

Основные характеристики изображающих инструментов

Прибор	Спектральный (энергетический) диапазон	Поле зрения	Примечания
«Соренто»	5...100 кэВ	1,5°	Наблюдение сверхгорячей вспышечной плазмы
«Трек»	8,42; 171; 304 Å	0,7 и 1,5°	Наблюдение плазмы переходного слоя, спокойной короны и тепловой вспышечной плазмы
«Ока»	450...700 нм	8°	Наблюдение выбросов корональной массы в короне
«Гелиосфера»	450...700 нм	20°	Наблюдение выбросов корональной массы в гелиосфере

СОЛНЕЧНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП «СОРЕНТО»

Рентгеновский телескоп «Соренто» предназначен для регистрации изображений солнечного диска в энергетическом диапазоне 5...100 кэВ. Основные научные задачи телескопа:

- получение изображений солнечных вспышек в жестком рентгеновском диапазоне;
- наблюдение источников первичного энерговыделения солнечных вспышек;

- наблюдение областей формирования и траекторий распространения электронов в области вспышки;
- наблюдение горячей ($T \approx 10$ МК) и сверхгорячей ($T \approx 100$ МК) солнечной плазмы;
- наблюдение малых вспыхивающих явлений — микровспышек и нановспышек в жестком рентгеновском диапазоне.

Телескоп будет направлен на центр солнечного диска, поле зрения составит $1,5^\circ$, пространственное разрешение — 7 угл. с, временное разрешение — до $0,1$ с.

Конструктивно телескоп «Соренто» будет выполнен в виде моноблока и установлен за тепловым экраном КА «Интергелиозонд», входной люк закрывается бериллиевым фильтром.

Для формирования изображений в энергетическом диапазоне $5 \dots 100$ кэВ невозможно использовать ни линзовую, ни зеркальную оптику. Поэтому, принцип действия телескопа основан на модуляции проходящего излучения системой сеток с разными периодами и разной ориентацией друг относительно друга. Более подробно телескоп описан в статье настоящего сборника (*Кириченко А.* и др. Солнечный рентгеновский телескоп «Соренто» для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД).

РЕНТГЕНОВСКИЙ ИЗОБРАЖАЮЩИЙ СПЕКТРОМЕТР «ТРЕК»

Рентгеновский изображающий спектрометр «Трек» предназначен для наблюдений солнечной короны в узких интервалах мягкого рентгеновского (МР) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона спектра. Научные задачи аппаратуры:

- получение изображений короны и переходного слоя Солнца в спектральных линиях МР- и ВУФ-диапазонах;
- наблюдение структуры и динамики солнечной короны в области температур около 1 млн К;
- наблюдение структуры и динамики переходного слоя Солнца в области температур около 100 тыс. К;
- наблюдение структуры и динамики высокотемпературной солнечной плазмы в области температур около 10 млн К;
- наблюдение эруптивных солнечных явлений в диапазоне высот от поверхности Солнца до одного солнечного радиуса;
- наблюдение эмиссионных ядер солнечных вспышек в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне (в том числе микро- и нановспышек).

Аппаратура «Трек» конструктивно выполнена в виде моноблока и включает в себя пять независимых каналов на разные спектральные диапазоны и поля зрения. Три канала — на диапазоны 8,42; 171 и 304 Å — имеют поле зрения 1,5° (так называемые каналы полного диска Солнца). Два других имеют поле зрения 0,7° и работают в спектральных диапазонах 171 и 304 Å (так называемые каналы высокого разрешения).

Поле зрения 1,5° обеспечивает регистрацию всего солнечного диска в точке перигея КА, тогда как на остальных участках траектории в поле зрения этих каналов попадает и ближняя корона Солнца на высотах вплоть до двух радиусов Солнца (1,3 млн км). Спектральные диапазоны, в которых работают эти каналы, покрывают широкий диапазон температур плазмы и таким образом обеспечивают регистрацию широкого набора структур и явлений солнечной короны. Изображения в спектральном диапазоне вблизи 304 Å (линия He II 303,78 Å, $T \approx 50 \dots 100$ тыс. К) соответствуют достаточно холодной плазме переходного слоя. Спектральный диапазон вблизи 171 Å (линия Fe IX 171,01 Å, $T \approx 800$ тыс. — 1 млн К) соответствует плазме спокойной короны. В узкий спектральный диапазон вблизи 8,42 Å попадает только линия водородоподобного иона Mg XII. Излучение этой линии формируется лишь в достаточно горячей по солнечным меркам плазме с $T \approx 10$ млн К, которая характерна для солнечных вспышек или других активных явлений.

Каналы с полем зрения 0,7° обеспечивают регистрацию всего диска Солнца в начальной фазе полета КА и в точке апогея, тогда как на более близких расстояниях солнечный диск регистрируется частично, увеличивая при этом эффективное пространственное разрешение. В частности, в точке перигея 1 пиксел (1,2 угл. с) будет соответствовать 350 км. Для обеспечения аналогичного пространственного разрешения при наблюдениях с земной орбиты потребовался бы телескоп с угловым размером пиксела 0,5 угл. с.

Таким образом, изображающий спектрометр «Трек» позволит регистрировать изображения короны Солнца в различных спектральных диапазонах, соответствующих широкому интервалу температур. Благодаря различным полям зрения будет получена информация и о глобальной структуре короны Солнца, в том числе на больших высотах над фотосферой, и информация о мелкомасштабных динамических структурах.

В аппаратуре «Трек» для формирования и регистрации изображений будет использоваться многослойная и кристаллическая оптика нормального падения, тонкопленочные абсорбционные фильтры и детекторы изображений на основе backside-CCD-матриц.

ВНЕЗАТМЕННЫЙ КОРОНОГРАФ «ОКА»

Внезатменный коронограф «Ока» предназначен для регистрации изображений дальней короны Солнца на высотах от 1 до 20 млн км над фотосферой. Задачами наблюдений коронографа «Ока» станут:

- исследование структуры и динамики дальней короны Солнца на высотах до 20 млн км;
- эклиптические и внеэклиптические наблюдения распространения КВМ на ранних стадиях развития;
- изучение механизмов ускорения КВМ в дальней короне и их взаимодействия с солнечным ветром и магнитным полем Солнца;
- совместные наблюдения с прибором «Гелиосфера» структуры и динамики КВМ в плоскости эклиптики с общим полем зрения от $0,5^\circ$ до 28° .

Коронограф «Ока» будет выполнен в виде моноблока и установлен за термозэкраном КА. При этом на двух сторонах космического аппарата устанавливаются два одинаковых коронографа, оси которых наклонены на углы $+4,5^\circ$ и $-4,5^\circ$ относительно оси КА.

Каждый коронограф построен по схеме Лио с внешней «искусственной луной». Роль луны выполняет термозэкран КА. Такое решение позволит существенно сократить габариты коронографа при уменьшенном количестве рассеянного света на искусственной луне. Поле зрения коронографа частично пересекается с полями зрения телескопов «Трек», что, с одной стороны, даст возможность наблюдать непрерывную область пространства от центра солнечного диска до высот 20 млн км, с другой — отодвинуть край поля зрения достаточно далеко от края солнечного диска ($0,5^\circ$), существенно улучшая контраст коронографа.

Основные оптические элементы коронографа — линзы, диафрагмы, детектор изображений, основанный на backside-CCD.

ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ШИРОКОПОЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП «ГЕЛИОСФЕРА»

Гелиосферный широкопольный телескоп «Гелиосфера» предназначен для регистрации изображений дальней короны и гелиосферного пространства на высотах от 20 до 55 млн км. Задачами наблюдений телескопа станут:

- исследование структуры и динамики КВМ на высотах от 20 до 55 млн км над поверхностью Солнца;
- внеэклиптические наблюдения КВМ;

- изучение механизмов ускорения выбросов массы и их взаимодействия с солнечным ветром, магнитным полем и плазмой гелиосферы;
- совместные наблюдения КВМ с коронографом «Ока».

Телескоп «Гелиосфера» будет выполнен в виде моноблока и установлен за термозраном КА.

При этом на двух сторонах КА устанавливаются два одинаковых телескопа, оси которых наклонены на углы $+18$ и -18° относительно оси КА, что обеспечивает обзор диаметрально противоположных (центру Солнца) областей. Поле зрения телескопов составляет 20° . При этом поле зрения каждого телескопа частично пересекается ($0,5^\circ$) с полем зрения соответствующего коронографа «Ока».

Наибольшую сложность при наблюдениях такого типа представляет необходимость блокировки света, рассеянного на термозране КА и других его деталях, а также света, идущего от других космических объектов. Степень подавления боковых лучей должна достигать 10^{12} . Поэтому важной частью конструкции будет входная бленда, обеспечивающая надежное подавление боковых засветок. Другие оптические элементы телескопа — входная диафрагма, объектив, детектор изображений на основе backside-CCD.

БОРТОВОЙ КОМПЬЮТЕР БК-ГОСТ

Комплекс аппаратуры, разрабатываемый ФИАН, включает мощную систему электроники, которая должна управлять детекторами изображений, механическими приводами, обеспечивать первичную обработку и сжатие информации, связь со служебными системами КА. Бортовой компьютер БК-ГОСТ предназначен для общего управления аппаратурой, запуска синхронизированных программ наблюдений, сбора и обработки информации от всех приборов, ее первичной обработки и передачи в каналы телеметрии КА.

Поскольку объем накапливаемой во время экспериментов научной информации многократно превосходит объем информации, передаваемой на Землю по телеметрическому каналу, в БК-ГОСТ реализована поддержка базы данных научной информации всего комплекса изображающих инструментов. Наличие такой базы позволяет организовать режим предварительной оценки накопленной информации с последующим сбросом в телеметрию наиболее научно значимых фрагментов с селектированием по времени, качеству и пространству.

Бортовой компьютер содержит центральный процессор, оперативную память, контроллеры управления и интерфейсы связи со служебными системами. В критических, с точки зрения отказоустойчивости, узлах используются электронные компоненты с повышенной радиационной стойкостью. В качестве центрального использован процессор с избыточным кодированием исполнительных блоков. При передаче и хранении информации также используется избыточное кодирование, позволяющее восстановить полезную информацию в случае частичной потери или изменения. Для обеспечения дополнительной защиты электронных узлов от радиационной нагрузки бортовой компьютер должен располагаться в месте КА с максимальной защитой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс изображающей аппаратуры для солнечной обсерватории «Интергелиозонд» — уникальный наблюдательный инструмент для исследования задач солнечной активности. Особенность аппаратуры в том, что она направлена на решение как общей основной задачи развития активных процессов в короне от их зарождения до выхода в гелиосферу, так и отдельных задач, стоящих перед каждым из приборов комплекса. Ценность этих исследований существенно возрастет при координированных наблюдениях с другими приборами, размещенными на КА «Интергелиозонд»: магнитографом, рентгеновскими и гамма-спектрометрами, магнитно-волновым комплексом, анализаторами плазмы солнечного ветра.

СОЛНЕЧНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП «СОРЕНТО» ДЛЯ ПРОЕКТА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

А. Кириченко¹, И. В. Зимовец², С. А. Богачев¹, С. В. Кузин¹

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева (ФИАН), Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53

² Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

«Соренто» — это рентгеновский телескоп, предназначенный для построения изображений Солнца в диапазоне энергий 5...100 кэВ с высоким пространственным и энергетическим разрешением, близким к рекордному. Телескоп входит в состав научной аппаратуры космической обсерватории «Интергелиозонд», благодаря чему впервые в мире станет возможным выполнять изображающие наблюдения Солнца с близких гелиоцентрических орбит и за пределами плоскости эклиптики. Основной научной задачей «Соренто» будет получение высокоточной пространственной информации о положении и структуре источников жесткого рентгеновского излучения в атмосфере Солнца, измерение их спектров и получение фотометрической информации о потоках солнечного излучения в диапазоне 5...100 кэВ.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее актуальных проблем современной физики Солнца — выяснение источника энергии наблюдаемых в солнечной атмосфере активных процессов, механизма ее накопления и взрывного высвобождения, в том числе трансформации в кинетическую энергию плазмы и энергию ускоренных заряженных частиц [Сыроватский, 1979; Прист, Форбс, 2005]. Эта проблема помимо фундаментального носит и прикладной характер, поскольку, в частности, имеет отношение к проблеме управляемого термоядерного синтеза [Somov, 2006], а также прогнозирования солнечных вспышек и корональных выбросов массы (КВМ) [Сыроватский, 1973; Schrijver, 2009].

В целом, атмосфера Солнца, наряду с магнитосферой Земли, представляет собой удобную естественную лабораторию для изучения процессов накопления и высвобождения энергии в самых различных формах — тепловой, кинетической, но, прежде всего, магнитной. Особый интерес в этой связи представляют мощные спорадические явления — солнечные вспышки и КВМ, в которых за времена от секунд до нескольких минут может высвободиться до 10^{32} ... 10^{33} эрг энергии [Somov, 2006]. Указанные явления, как правило, сопровождаются нагревом окружающей корональной

плазмы до нескольких десятков миллионов Кельвинов (МК) [Aschwanden, 2009]. Также значительная часть высвобождаемой во вспышках энергии может трансформироваться в энергию нетепловых электронов, преимущественно в диапазоне 20...100 кэВ [Lin, Hudson, 1976; Lin et al., 2003].

Естественным следствием вспышечного нагрева плазмы и ускорения электронов становится генерация рентгеновского излучения, включающего в себя как тепловую компоненту (лежит в диапазоне 1...10 кэВ и формируется плазмой с температурой 10...100 МК), так и нетепловое излучение, которое возникает при торможении ускоренных вспышечных электронов в плотных слоях атмосферы. Наблюдения Солнца в рентгеновском диапазоне по этой причине представляют значительный интерес. Жесткое рентгеновское излучение вспышек, для которого атмосфера Солнца представляется оптически тонкой, содержит информацию о потоках и спектре сформировавших его электронов, пути их распространения в активной области и особенностях взаимодействия с плазмой короны и хромосферы. Мягкое рентгеновское излучение, в свою очередь, — важный источник информации о механизмах нагрева и охлаждения корональной плазмы.

Поскольку земная атмосфера непрозрачна для рентгеновских лучей, единственный способ получения изображений Солнца в этом диапазоне — внеатмосферные наблюдения. Наиболее эффективные из них — эксперименты на борту искусственных спутников Земли или межпланетных космических станций. При постановке таких экспериментов возникают существенные трудности, которые связаны с тем, что в области длин волн короче 30 Å (на энергиях выше 0,4 кэВ) не работают зеркала нормального падения, как обычные, так и многослойные. Таким образом, приходится создавать оптические схемы на основе оптики «косого» падения, либо переходить на альтернативные способы построения рентгеновских изображений, например, использовать метод кодированной апертуры. Последний способ основан на том, что изображение не регистрируется прямо, а восстанавливается математическими методами путем обработки модулированного сигнала. Модуляция при этом осуществляется пропусканием излучения через набор кодирующих масок, состоящих из чередующихся прозрачных и непрозрачных элементов.

За последние 30 лет на зарубежных космических аппаратах работало несколько жестких рентгеновских солнечных телескопов, основанных на принципе кодированной апертуры. Это прибор HXIS на спутнике SMM (1980) [Van Beek et al., 1980], жесткий рентгеновский телескоп на японском спутнике Hinotori (1981) [Takakura et al., 1983], телескоп НХТ на спутнике Yohkoh (1991)

[Kosugi et al., 1991] и изображающий спектрометр на спутнике Rhesi (2002) [Lin, et al., 2002]. Практика использования этих инструментов показала, что модулирующая рентгеновская оптика имеет ряд недостатков по сравнению с фокусирующей (прежде всего слабой чувствительностью и низким динамическим диапазоном), но существенно превосходит последнюю по угловому разрешению, которое достигает 2 угл.с. Именно благодаря применению модулирующей оптики в солнечных экспериментах последних лет были открыты новые типы источников жесткого рентгеновского излучения, которые находятся не в хромосфере Солнца, а в короне над вершинами вспыхивающих петель [Masuda et al., 1994]. Также благодаря высокому пространственному разрешению наблюдений был обнаружен ряд тонких эффектов, например, движение источников жесткого рентгеновского излучения во время импульсной фазы солнечных вспышек [Bogachev et al., 2005].

Следует заметить, что в нашей стране опыт создания жестких рентгеновских солнечных телескопов ранее полностью отсутствовал. Основные данные о солнечном излучении в указанном диапазоне получались неизображающими методами, т.е. путем измерения потока, спектра и поляризации излучения от всего диска Солнца. Хотя такой способ исследования обладает рядом преимуществ, в частности, возможностью измерения рентгеновского излучения с временным разрешением порядка и лучше 0,01 с, при неизображающих измерениях невозможно локализовать и исследовать внутреннюю структуру и динамику отдельных источников излучения.

В настоящей работе дается краткое описание жесткого рентгеновского телескопа «Соренто» (головной разработчик — ФИАН), создаваемого для космической миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Прибор предназначен для высокоточного измерения потоков солнечного рентгеновского излучения, а также построения спектров и изображений Солнца в диапазоне энергий 5...100 кэВ. Благодаря близкой к Солнцу орбите, может быть значительно повышена чувствительность наблюдения телескопа (при сохранении той же эффективной площади, что и на аналогах). Преимуществом орбиты КА «Интергелиозонд» станет и существенное уменьшение габаритов и массы прибора без ухудшения его основных характеристик.

Телескоп «Соренто» создается как часть комплекса научной аппаратуры ФИАН (КНА ФИАН), который включает в себя многоканальный ВУФ-телескоп и два коронографа. Весь комплекс работает под управлением общего бортового компьютера. Благодаря этому, в миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД впервые появится возможность одновременного наблюдения Солнца в жестком рентгеновском, ВУФ и оптическом диапазонах без привлечения

данных других космических миссий. Также рассматривается возможность проведения совместных наблюдений прибором «Соренто» и рентгеновским телескопом STIX, входящим в состав европейской обсерватории Solar Orbiter. Это позволит получить первые в мире данные о структуре и динамике источников жесткого рентгеновского излучения Солнца в режиме стереонаблюдений. Ниже более подробно обсуждаются эти и другие научные задачи «Соренто», а также приводятся принципиальная схема инструмента и его основные технические характеристики.

1. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕЛЕСКОПА «СОРЕНТО»

Наблюдения Солнца в жестком рентгеновском диапазоне, как упоминалось выше, дают важную информацию о процессах ускорения и распространения заряженных частиц в атмосфере Солнца. Энергия и поток регистрируемых фотонов в первом приближении пропорциональны энергии и количеству электронов, ускоренных во вспышке. Что касается спектра регистрируемого рентгеновского излучения, то, в зависимости от используемой модели (тонкой или толстой мишени), он полностью повторяет исходный спектр электронов или оказывается жестче него на величину, известную из теории. Таким образом, хотя и в некотором приближении, наблюдения потоков и спектров жесткого рентгеновского излучения Солнца дают достаточно точную количественную информацию о потоках и спектрах ускоренных во вспышке электронов.

Важным преимуществом изображающей рентгеновской оптики представляется возможность локализации рентгеновских источников излучения. Одним из наиболее важных открытий в солнечной физике последних 15 лет стало установление того факта, что существенная часть жесткого рентгеновского излучения вспышек приходит не из плотных слоев атмосферы, хромосферы и фотосферы, а из короны, ранее считавшейся полностью прозрачной (бесстолкновительной) для электронов с энергиями выше 10...20 кэВ [Masuda et al., 1994]. Корректное разделение хромосферного и коронального излучений вспышек, очевидно, возможно только с использованием изображающих инструментов. Исключение составляют лишь лимбовые вспышки, в которых хромосферные источники могут быть скрыты за краем Солнца, и, благодаря этому, открывается возможность зарегистрировать излучение только из короны [Krucker, Lin, 2008]. В любом случае, речь идет только о регистрации одной компоненты излучения (корональной). При этом точное положение источника излучения по-прежнему остается неизвестным.

Наблюдения в жестком рентгеновском диапазоне с высоким временным и пространственным разрешением позволяют исследовать и ряд тонких эффектов. В качестве примера задачи, решаемой таким способом, можно привести сравнение спектров и потоков излучения из короны и хромосферы [Ishikawa et al., 2011]. По современным представлениям жесткое рентгеновское излучение в короне и хромосфере Солнца формируется одним и тем же ансамблем электронов. Сначала электроны получают энергию высоко в короне в области магнитного пересоединения. Затем при движении вниз вдоль силовых линий магнитного поля они частично теряют энергию в области над вершинами вспыхивающих магнитных петель. Здесь в результате формируется корональный источник жесткого рентгеновского излучения. Достигнув нижних плотных слоев солнечной атмосферы, электроны полностью тормозятся, что приводит к формированию интенсивного излучения, регистрируемого вблизи оснований вспыхивающих магнитных петель. В рамках такой концепции следует ожидать корреляцию между спектрами и потоками рентгеновского излучения из короны и хромосферы. При этом по положению источников излучения и по запаздыванию хромосферного излучения относительно коронального можно делать выводы о траектории распространения электронов во вспышке. Из изменения же наклона спектра хромосферного излучения по отношению к спектру, регистрируемому в короне, можно извлекать информацию о физических условиях на пути распространения электронов из короны к хромосфере, а также о наличии или отсутствии во вспышках второй ступени ускорения частиц. Такой анализ входит в число задач наблюдений с помощью телескопа «Соренто».

Одним из интересных результатов последних лет, полученных в жестком рентгеновском диапазоне спектра, стало обнаружение движения источников излучения во время импульсной фазы солнечных вспышек [Vogachev et al., 2005]. По современным представлениям скорость этого движения прямо пропорциональна темпу магнитного пересоединения в короне. Это едва ли не единственный способ получения информации о скорости пересоединения (альтернативой может считаться, лишь измерение скорости движения вспыхивающих лент в линии H_{α}). Важную информацию содержит и направление движения источников — оно показывает степень скрученности глобальной магнитной конфигурации активной области или, в других терминах, степень отклонения магнитной конфигурации от потенциальной. Проведение таких исследований требует предельно высоких временных и пространственных характеристик аппаратуры, что, как мы полагаем, может быть достигнуто в рамках эксперимента с учетом тех преимуществ, что дает орбита КА «Интергелиозонд».

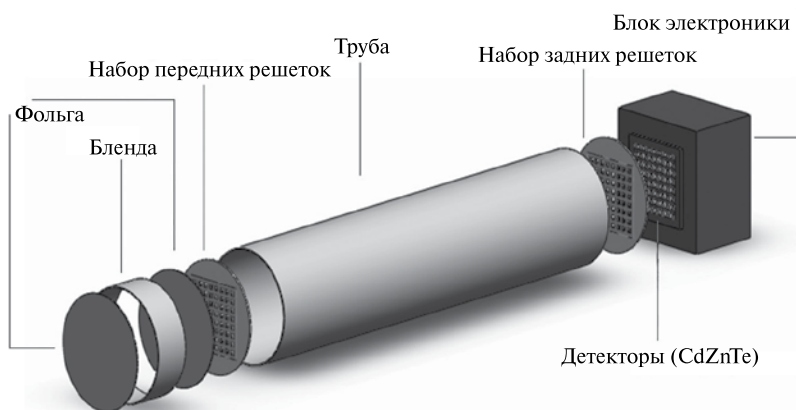
Дополнительные возможности в научном плане возникают при проведении одновременных наблюдений «Соренто» с другими приборами в составе КНА ФИАН. Из наиболее важных задач следует отметить одновременные исследования нетепловой электронной компоненты вспышки, наблюдаемой «Соренто», и тепловой ионной компоненты плазмы, которую мы сможем измерять в линии иона магния Mg XII $8,42 \text{ \AA}$ (соответствующим каналом оснащен телескоп «Трек»). Такой сравнительный анализ позволит лучше понять механизмы обмена энергией между электронами и ионами во вспышках, а также точнее измерить долю тепловой и нетепловой энергии во вспышках разного типа. Представляет интерес и сравнение областей формирования жесткого рентгеновского излучения вспышек с тонкой структурой короны Солнца, наблюдаемой телескопом «Трек» в каналах Fe IX 171 \AA и He II 304 \AA . Кроме того, поскольку в состав КНА ФИАН входит сразу два коронографа, в рамках эксперимента СОРЕНТО предполагается детально исследовать механизмы формирования жесткого рентгеновского излучения не только во вспышках, но и в эруптивных событиях, сопровождающихся выбросами корональной массы.

Предварительный список научных задач эксперимента СОРЕНТО включает в себя:

- локализацию и исследование областей первичного энерговыделения солнечных вспышек и корональных выбросов массы;
- изучение механизмов ускорения и путей распространения ускоренных электронов в области вспышки;
- исследование относительной доли тепловой и нетепловой компонент во вспышках разного типа и их взаимного энергообмена;
- стереоскопические наблюдения Солнца в жестком рентгеновском диапазоне, в том числе с целью точной локализации источников излучения и исследования анизотропии жесткого рентгеновского излучения вспышек;
- получение высокоточной фотометрической и спектральной информации об источниках жесткого рентгеновского излучения Солнца, наблюдаемых в короне и хромосфере, а также их сравнительный анализ.

2. СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕСКОПА «СОРЕНТО»

Принципиальная схема рентгеновского телескопа «Соренто» включает в себя шесть основных узлов: входной фильтр, бленда,



Принципиальная схема прибора «Соренто»

набор передних решеток, труба, набор задних решеток и плоскость детекторов с блоком электроники (см. рисунок).

Входной фильтр прибора выполняется из монолитного или многослойного бериллия, толщина которого подобрана таким образом, чтобы обеспечить эффективное пропускание излучения в рабочем диапазоне (5...100 кэВ) и его поглощение на энергиях ниже 5 кэВ. Поскольку в точке перигелия орбиты «Интергелиозонда» температура на входном фильтре может достигать примерно до 600 °С, необходимо предпринимать меры для уменьшения тепловых потоков с входного фильтра на прибор. Одно из возможных решений — размещение входного фильтра не на приборе, а на переднем защитном щите спутника, в котором с этой целью предусматривается специальное окно. Такое решение позволяет пространственно разнести горячий фильтр и прибор, который получает возможность работать в гораздо более комфортных тепловых условиях. Для дополнительного уменьшения тепловых потоков от входного фильтра к прибору, непосредственно на фильтре монтируется бленда высотой от 10 до 30 см. Она играет роль радиатора и позволяет понизить температуру примерно до 250 °С на нижнем крае бленды и примерно до 55 °С на верхней панели решеток.

Коллиматор телескопа представляет собой полу трубу длиной около 55 см и диаметром 20 см, в верхней и нижней частях которой размещаются две параллельные панели с набором модулирующих решеток. Трубу предполагается выполнить из армированного углепластика, что обеспечит ее малую массу (плотность

материала составляет $\sim 1,7 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) и, в то же время, прочность конструкции. Наборы решеток представляют собой плиты из вольфрама толщиной 0,4 мм, внутри которых монтируются модулирующие элементы — решетки с различными периодами и наклонами щелей. Каждая решетка имеет размер 10×10 мм. Число щелей в решетке зависит от ее шага (суммарной ширины щели и стенки) и меняется от 5...7 для решетки с максимальным периодом, равным 2 мм, до 250...400 для решетки с шириной щели 20 мкм. Точное число питчей зависит от позиционного угла решетки, т.е. от угла между щелью и осью X (нижней стороной решетки).

Толщина и материал решеток выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное поглощение излучения непрозрачными элементами (стенками) в рабочем диапазоне прибора (5...100 кэВ) и, одновременно, свободное прохождение фотонов через щели. Такое чередование прозрачных и непрозрачных элементов создает эффект модуляции, который затем используется для построения изображения. Наиболее подходящими материалами для модулирующих решеток представляются тантал и вольфрам, обладающие достаточно высокой эффективностью поглощения в диапазоне 5...100 кэВ и одновременно имеющие очень высокие температуры плавления. Расчетная толщина решетки составляет 0,4 мм при использовании вольфрама и 0,5 мм для тантала. Учитывая значительную толщину решетки (400 мкм) по сравнению с шириной щелей (от 20 мкм), к точности нарезки предъявляются высокие требования ($\sim 5\%$ от ширины щели, т.е. до 1 мкм для самых узких щелей). Достижение указанной точности представляет собой весьма непростую техническую задачу, которая дополнительно усложняется высокой плотностью и температурой плавления указанных материалов. В настоящее время прорабатывается несколько способов создания модулирующих решеток: электрокоррозия, лазерная резка и фотохимическое травление. Ранее при создании схожего по конструкции прибора НХТ/ЮНКОН использовались методы электрокоррозии и фотохимического травления [Kosugi et al., 1991]. Считается, что первый целесообразно использовать для крупных щелей с шириной $>0,2$ мм, второй — для щелей с шириной менее 0,2 мм.

В качестве детектирующих элементов в «Соренто» предполагается использовать кристаллы CdTe или CdZnTe. В приборах ранних конструкций в основном применялись сцинтилляторы, которые имеют низкое временное разрешение, например NaI(Tl) в телескопе НХТ. В более современном приборе RHESSI уже использовались полупроводниковые Ge-детекторы. Для их полноценной работы необходимо охлаждение до очень низких

температур, что естественно усложняет конструкцию и приводит к увеличению массы прибора.

Рабочий диапазон температур CdZnTe-детекторов, предлагаемых для прибора «Соренто», лежит в пределах от 0 до 40 °С. Регистрация рентгеновских фотонов в интервале энергий от 5 до 100 кэВ может осуществляться с энергетическим разрешением около 1,6 кэВ. Размер каждого детектора будет составлять порядка 10×10×2 мм, т.е. площадь поверхности кристалла должна примерно соответствовать площади решетки. Число детекторов равно числу пар решеток на передней и задней панелях и, в зависимости от выбранной оптической схемы, может составлять от 32 до 74. На блок электроники прибора, таким образом, возлагается задача одновременного приема, оцифровки и обработки сигнала с большого числа (до 74) независимых детекторов, что предъявляет высокие требования к его производительности.

Учитывая ограничения по телеметрии, которые существуют в миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД по сравнению с околоземными спутниками, блок электроники должен реализовывать как минимум два режима работы с информационными потоками: «фоновый», в котором информативность прибора минимальна, и «вспышечный» с максимально возможным потоком телеметрии. Управлять объемом телеметрии с прибора можно будет, изменяя спектральное и временное разрешение инструмента, т.е. меняя время накопления сигнала, а также спектральные диапазоны интегрирования фотометрической информации. Средний суточный объем телеметрии предполагается поддерживать на уровне 50 МБ в сутки.

Сводные технические характеристики прибора «Соренто» приведены ниже.

Технические характеристики «Соренто»

Диапазон энергий	5...100 кэВ
Поле зрения (полное)	1,5°
Разрешение в пределах поля зрения	До 7 угл. с
Временное разрешение	До 0,1 с
Габариты	∅236×1000 мм
Общая масса	8 кг
Режим работы	Фоновый и вспышечный
Энергопотребление пиковое	6 Вт
Объем телеметрической информации	50 МБ/сут

Поскольку модулирующая оптика не позволяет получать изображение непосредственно, а лишь предоставляет информацию для его реконструкции математическими методами, большое

значение в проекте будет иметь математический аппарат, используемый для решения обратной задачи — определения пространственного распределения сигнала по модулированным потокам излучения, регистрируемым на детекторах. В ходе предыдущих экспериментов (HXIS/SMM, HINOTORI Imager, HXT/Yohkoh и RHESSI) для этой цели успешно применялись методы: MEM, Clean, Pixon, Forward Fitting и др. [Hurford et al., 2002; Metcalf et al., 1996]. В проекте СОРЕНТО планируется использовать модификацию одной из этих стандартных процедур, либо разработать оригинальный подход к решению задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [Прист, Форбс, 2005] *Прист Э., Форбс Т.* Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения. М.: Физматлит, 2005.
- [Сыроватский, 1973] *Сыроватский С.И.* Прогнозирование солнечных вспышек. Теоретические модели вспышек // Вестн. АН СССР. 1973. № 3. С. 31.
- [Сыроватский, 1979] *Сыроватский С.И.* Ключевые вопросы теории вспышек // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1979. Т. 43. № 4. С. 695.
- [Aschwanden, 2009] *Aschwanden M.J.* Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2009.
- [Bogachev et al., 2005] *Bogachev S.A., Somov B.V., Kosugi T., Sakao T.* The Motions of the Hard X-Ray Sources in Solar Flares: Images and Statistics // Astrophysical J. 2005. V. 630. N. 1. P. 561.
- [Hurford et al., 2002] *Hurford G.J., Schmahl E.J., Schwartz R.A.* et al. The RHESSI Imaging Concept // Solar Phys. 2002. V. 210. P. 61.
- [Ishikawa et al., 2011] *Ishikawa S., Krucker S., Takahashi T., Lin R.P.* On the Relation of Above-the-loop and Footpoint Hard X-ray Sources in Solar Flares // Astrophysical J. 2011. V. 737. N. 2. P. 48.
- [Kosugi et al., 1991] *Kosugi T., Masuda S., Makishima K.* et al. The Hard X-ray Telescope (HXT) for the Solar-A Mission // Solar Phys. 1991. V. 136. P. 17.
- [Krucker, Lin, 2008] *Krucker S., Lin R.P.* Hard X-Ray Emissions from Partially Occulted Solar Flares // Astrophysical J. 2008. V. 673. N. 2. P. 1181.
- [Lin et al., 2003] *Lin R.P., et al.* RHESSI Observations of Particle Acceleration and Energy Release in an Intense Solar Gamma-Ray Line Flare // Astrophysical J. Letters. 2003. V. 595. N. L69.
- [Lin et al., 2002] *Lin R.P.* et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // Solar Phys. 2002. V. 210. P. 3.
- [Lin, Hudson, 1976] *Lin R.P., Hudson H.S.* Non-thermal processes in large solar flares // Solar Phys. 1976. V. 50. P. 153.

- [Masuda et al., 1994] *Masuda S., Kosugi T., Hara H.* et al. A Loop-Top Hard X-ray Source in a Compact Solar Flare as Evidence for Magnetic Reconnection // *Nature*. 1994. V. 371. N. 6497. P. 495.
- [Metcalf et al., 1996] *Metcalf T. R., Hudson H. S., Kosugi T.* et al. Pixon-based Multiresolution Image Reconstruction for Yohkoh's Hard X-ray Telescope // *Astrophysical J*. 1996. V. 466. P. 585.
- [Schrijver, 2009] *Schrijver C.* Driving major solar flares and eruptions: A review // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. N. 5. P. 739.
- [Somov, 2006] *Somov B. V.* Plasma Astrophysics. Part II: Reconnection and flares. Springer, 2006.
- [Takakura et al., 1983] *Takakura T., Tsuneta S., Nitta N.* et al. Hard X-ray Imaging of a Solar Limb Flare with the X-ray Telescope Aboard the HINOTORI Satellite // *Astrophysical J*. 1983. V. 270. N. L83.
- [Van Beek et al., 1980] *Van Beek H. F., Hoyng P., Lafleur B., Simnett G. M.* The Hard X-ray Imaging Spectrometer HXIS // *Solar Phys.* 1980. V. 65. P. 39.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ФОТОСКОП

Н. И. Лебедев, Ю. Д. Жугжда, В. Д. Кузнецов, С. И. Болдырев

Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк

Наблюдения флуктуаций солнечного излучения в широком спектральном диапазоне, от ультрафиолета до ближнего инфракрасного, имеют большое значение для решения научных задач в области гелиосейсмологии, изучения различных проявлений солнечной активности, определения связи вариаций потока солнечного излучения и изменения климата на Земле. Эксперимент ФОТОСКОП на борту космического аппарата (КА) «Интергелиозонд» предназначен для получения непрерывных, высокоточных данных об изменении потока солнечного излучения не менее чем в 160 точках спектра, в диапазоне от 300 до 1600 нм, в течение всего времени активного существования КА. Измерение потоков солнечного излучения на внеэклиптических участках орбиты «Интергелиозонда» позволит впервые определить величины этих потоков и их изменения для разных гелиоширот. Приведены основные измерительно-технические характеристики многоканального солнечного фотометра, описана конструкция прибора.

ВВЕДЕНИЕ

В первом приближении изучение процесса испускания и распространения энергии от Солнца можно рассматривать как излучение абсолютно черного тела с эффективной температурой примерно 5780 К. Любые проявления солнечной активности приводят к отклонению от равновесного значения как полного потока излучения, так и распределения энергии по спектру. Изучение флуктуаций потока излучения Солнца в разных спектральных диапазонах и в различных временных масштабах имеет важное значение для решения многих задач физики Солнца — от вопросов гелиосейсмологии до 11-летнего цикла солнечной активности.

Другая важная причина изучения солнечных флуктуаций в том, что величина солнечного потока, падающего на Землю, определяет тепловой режим на поверхности нашей планеты и, следовательно, вариации этого потока прямым образом сказываются на изменении климата. Можно предполагать, что флуктуации абсолютной величины солнечной постоянной, имеющие характерное время, сравнимое с продолжительностью солнечного цикла, влияют в основном на долговременные изменения климата,

в то время как перераспределение энергии по спектру излучения вследствие мощных проявлений солнечной активности могут приводить к кратковременным (сезонным), но достаточно заметным изменениям погоды.

Для длительных непрерывных измерений флуктуаций солнечного излучения в спектральном диапазоне от 300 до 1600 нм для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД готовится эксперимент ФОТОСКОП.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

Главная цель эксперимента — получение непрерывных, высокоточных данных об изменении потока солнечного излучения не менее чем в 160 точках спектра в диапазоне от 300 до 1600 нм в течение всего времени активного существования космического аппарата.

Круг научных задач, которые предполагается решать на основе полученных данных, можно условно разделить на три группы.

Первая группа относится к гелиосейсмологии. В частности представляют интерес следующие задачи [Жугжда и др., 2009]:

- изучение зависимости относительной мощности солнечных колебаний от длины волны наблюдения и уточнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов, полученных в предыдущих экспериментах;

- изучение взаимодействия акустических и тепловых волн в верхних слоях конвективной зоны (большой интерес представляют наблюдения в инфракрасной области спектра, излучение в которой выходит из наиболее глубоких слоев фотосферы) [Жугжда, Лебедев, 2009];

- установление связи параметров собственных колебаний с проявлениями солнечной активности и определение условий возникновения колебаний;

- исследование зависимости параметров наблюдаемых глобальных колебаний от 11-летнего цикла солнечной активности;

- определение величины скорости звука как функции глубины от поверхности Солнца, распределения плотности и скорости вращения внутренних слоев Солнца.

Ко второй группе научных задач можно отнести вопросы, касающиеся флуктуаций «солнечной постоянной» [Frohlich, 2005]:

- определение изменения величины интегрального потока и перераспределения энергии солнечного излучения в диапазоне длин волн от 300 до 1600 нм в зависимости от 11-летнего

солнечного цикла и во время мощных проявлений солнечной активности;

- выяснение относительного вклада пятен, факелов, фото-сферной сетки и других проявлений солнечной активности в изменение солнечной постоянной;

- измерения солнечной постоянной для разных гелиоширот.

Так как КА «Интергелиозонд» будет подниматься над плоскостью эклиптики на угол до 30° , то определение зависимости потока солнечного излучения от гелиошироты представляет несомненный научный интерес. Такие исследования никогда прежде не проводились.

И, наконец, к третьей группе задач относится изучение связи изменения параметров «солнечной постоянной» с изменением климата Земли.

ФОТОМЕТР «ФОТОСКОП»

Инструмент, предназначенный для наблюдений флуктуаций солнечного излучения, представляет собой многоканальный фотометр. Прибор должен осуществлять непрерывные измерения в диапазоне от ультрафиолета до ближней инфракрасной области спектра. Основные измерительно-технические характеристики фотометра следующие:

- диапазон наблюдения — 300...1600 нм;
- количество спектральных каналов в диапазоне наблюдения — не менее 160;
- периодичность измерений — не более 10 с;
- относительная разрешающая способность по интенсивности излучения — $2 \cdot 10^{-6}$ за время накопления сигнала 10 с;
- суточный объем информации, сбрасываемой на Землю, — не более 20 МБ;
- мощность, потребляемая при включенной системе охлаждения фотоприемников, — не более 10 Вт;
- габариты — $130 \times 130 \times 510$ мм;
- масса — 5,2 кг.

Фотометр «Фотоскоп» состоит из одного блока, который устанавливается на верхней платформе космического аппарата непосредственно под теплозащитным экраном. Предварительная конструкция прибора приведена на рис. 1.

Весь спектральный диапазон наблюдения разбит на два поддиапазона: видимый (300...920 нм) и ближний инфракрасный (900...1600 нм). Интенсивность солнечного излучения в каждом поддиапазоне измеряется малогабаритным спектрометром низкого разрешения.

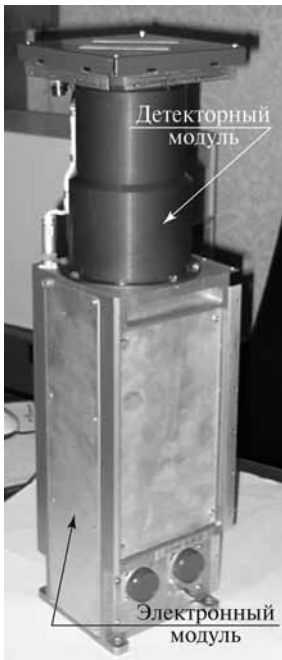


Рис. 1. Многоканальный солнечный фотометр «Фотоскоп»

В качестве фотоприемников в спектрометрах используются кремниевые линейные матрицы для видимого и из InGaAs для инфракрасного поддиапазонов. Инфракрасный фотоприемник имеет встроенный полупроводниковый холодильник. На рис. 2 изображен спектр солнечного излучения и приведены измерительные поддиапазоны.

Для сопоставления данных от соседних фотоприемников границы поддиапазонов выбраны с небольшим перекрытием.

Проведение абсолютных измерений [Stock, Heine, 2000] потока солнечного излучения требует очень высокой точности и стабильности измерений фотоприемниками.

Последние вследствие деградации при продолжительной работе в условиях космоса не способны обеспечить заданные параметры в течение всего времени полета. Чтобы решить эту проблему, в приборе предусмотрена периодическая калибровка фотоприемников с помощью двух узкополосных каналов измерения интенсивности солнечного излучения (один в видимой области спектра,

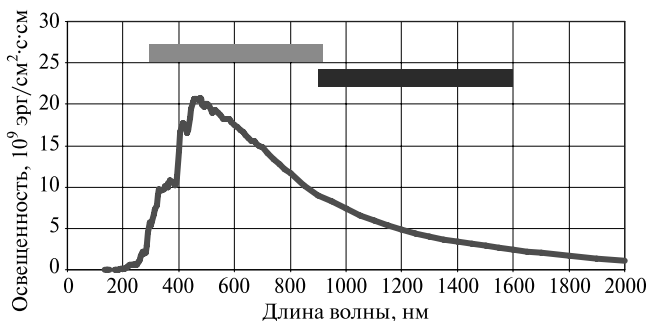


Рис. 2. Спектр излучения Солнца и измерительные поддиапазоны фотометра «Фотоскоп»

другой — в инфракрасной), в которых применены специальные фотоприемники на основе трап-детекторов. Конструкция трап-детекторов обеспечивает практически 100% квантовую эффективность фотопреобразования, что делает эти приборы идеально подходящими для проведения абсолютных измерений. Включение калибровочных каналов на небольшое время не чаще, чем один раз в неделю, должно значительно уменьшить старение калибровочных фотоприемников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение флуктуаций потока излучения Солнца в разных спектральных диапазонах и в различных временных масштабах имеет большое значение для решения многих задач физики Солнца.

Главной целью эксперимента ФОТОСКОП на борту космического аппарата «Интергелиозонд» станет получение непрерывных, высокоточных данных об изменении потока солнечного излучения не менее чем в 160 точках спектра в диапазоне от 300 до 1600 нм в течение всего времени активного существования космического аппарата. Особый интерес представляют измерения на внеэллиптических участках орбиты КА.

Научная программа эксперимента охватывает решение на основе полученных данных ряда задач в области гелиосейсмологии, различных аспектов солнечной переменности, связи флуктуаций потока солнечного излучения с изменениями климата на Земле.

Для выполнения наблюдений в ИЗМИРАН разрабатывается высокоточный и стабильный многоканальный солнечный фотометр «Фотоскоп».

ЛИТЕРАТУРА

- [Жугжда и др., 2009] *Жугжда Ю.Д., Кузнецов В.Д., Лебедев Н.И.* Флуктуации яркости Солнца и его собственные колебания (эксперимент ДИФОС) // Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф» / Под ред. В.Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. Гл. 2. С. 35–64.
- [Жугжда, Лебедев, 2009] *Жугжда Ю.Д., Лебедев Н.И.* Функции потемнения и видимости для глобальных пятиминутных колебаний // Письма в Астроном. журн. 2009. Т. 35. № 7. С. 547–560.
- [Frohlich, 2005] *Frohlich C.* Solar Irradiance Variability since 1978 // Mem. A. It. 2005. V. 36. P. 731.
- [Stock, Heine, 2000] *Stock K.D., Heine R.* Spectral Characterization of InGaAs Trap Detectors and Photodiodes Used as Transfer Standarts // Metrologia. 2000. V. 37. P. 449–452.

«ХЕМИКС» – СОЛНЕЧНЫЙ БРЕГГОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Я. Сильвестр¹, Я. Бакала¹, П. Подгорски¹, М. Ковалиньски¹,
З. Кордылевски¹, С. Гбурек¹, В. Тржебиньски¹, В. Д. Кузнецов²,
С. И. Болдырев²

¹ Отделение солнечной физики Центра космических исследований Польской академии наук, Польша, 51-622 Вроцлав, Коперника, 11

² Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк

Представлено краткое описание прибора «Хемикс» — солнечного брегговского телескопа-спектрометра мягкого рентгеновского диапазона высокого спектрального разрешения (ChemX — Chemical composition from X-ray) для межпланетной миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. На расстояниях от Солнца в 0,3 а. е. прибор будет наблюдать с очень высоким спектральным разрешением спектры излучения от вспышек и активных областей в солнечной короне. Анализ и интерпретация этих спектров, получаемых оперативно в спектральном диапазоне от 1,5 до 7 Å, позволят впервые исследовать основные физические характеристики вспышечной плазмы: объем плазмы с разными температурами; турбулентное и ламинарное движение плазмы; ионизацию и ионную температуру; вклад нетепловых электронов в поток излучения в линиях и в континууме; химический состав горячей корональной плазмы. Чувствительность спектрометра «Хемикс» будет в несколько раз выше, чем у его предшественника — спектрометра РЕСИК, который находился на борту спутника «КОРОНАС-Ф» (запущен в 2001 г.). Измерения спектрометра «Хемикс» будут иметь более высокое спектральное разрешение, что позволит определять абсолютное (по отношению к водороду) содержание химических элементов в солнечной короне с атомными номерами между 12 и 30 (Mg-Cu). Для многих химических элементов точность их определения будет превышать полученную по фотосферным измерениям на основе спектров видимого и инфракрасного диапазонов.

ВВЕДЕНИЕ

Миссия ИНТЕРГЕЛИОЗОНД — один из самых современных астрофизических проектов российской космической программы. Его цель — исследовать пространство в непосредственной близости от Солнца и наблюдать нашу звезду с расстояний в 60...70 солнечных радиусов. Такая близость точки наблюдения к Солнцу позволит впервые исследовать солнечную поверхность

с пространственным разрешением, примерно в четыре раза лучшим, чем при наблюдениях с расстояния в 1 а.е., и, что даже более важно, измерять потоки солнечного излучения, примерно в 15...20 раз большие, чем вблизи Земли.

Спектрометр «Хемикс» на борту КА «Интергелиозонд» будет представлять собой наиболее чувствительный рентгеновский спектрометр из когда-либо использовавшихся в космосе. В его конструкции принцип рентгеновского доплерометра впервые объединен с бреговским отражением в изогнутом кристалле. Это позволит изучать движение плазмы в абсолютной системе координат, осуществлять детальную проверку так называемого сценария испарения во вспышечном гидродинамическом моделировании. Предложенная конструкция солнечного бреговского спектрометра с изогнутыми кристаллами новой разработки — в настоящее время единственный такой прибор, предлагаемый для солнечной миссии следующего десятилетия, т.е. для периода 25-го цикла солнечной активности.

Спектрометр «Хемикс» берет свое начало от многих предыдущих миссий с бреговскими спектрометрами: P78-1 [Doschek, 1983] Национальной исследовательской лаборатории США; SMM XRP: FCS и VCS спектрометры [Acton et al., 1980]; японской миссии Hinotori [Tanaka et al., 1982]; Yohkoh VCS [Culhane et al., 1991]; РЕСИК [Sylwester et al., 2005] и ДИАГЕНЕСС [Sylwester, Farnik, 1990] на борту спутника «КОРОНАС-Ф». Все предыдущие эксперименты имели определенные ограничения в получении научных результатов. В спектрометре «Хемикс» мы предполагаем освободиться от большей части этих недостатков и добиться, чтобы он представлял собой наилучший в настоящее время прибор для детальной диагностики состояния плазмы в рентгеновских областях солнечной короны. Это, в первую очередь, вспышки — наиболее энергичные явления, наблюдаемые в Солнечной системе, а также плазма внутри магнитных структур невспышечных активных областей (так называемые петли).

1980-е гг. были «золотым веком» солнечной рентгеновской спектроскопии, когда было реализовано несколько миссий, в том числе SOLAR MAXIMUM MISSION (SMM) [Acton et al., 1980] с двумя современными бреговскими спектрометрами (хорошо коллимированными спектрометрами FCS и VCS, которые имели конструкцию, аналогичную предусматриваемой для «Хемикс»). Спектрометр VCS на SMM как и аналогичный прибор в последующей миссии YOHKOH японского агентства JAXA [Culhane et al., 1991] очень высокого спектрального разрешения, с позиционночувствительными газовыми детекторами, позволяли выполнять мгновенные измерения спектров на всех длинах волн

наблюдаемого диапазона. Однако очень высокое спектральное разрешение было доступно только в достаточно ограниченных областях, поэтому детально исследовались только части спектра в представляющем интерес рентгеновском спектральном диапазоне. Конструкция прибора VCS не позволяла выполнить точные измерения абсолютных доплеровских сдвигов рентгеновских эмиссионных линий, были возможны только относительные измерения. На измерения доплеровского сдвига до некоторой степени оказали влияние возможные движения источников в плоскости дисперсии.

В сканирующем коллимированном спектрометре FCS на ранней фазе миссии имела место серьезная проблема с системой считывания углового положения. Это привело к очень ограниченному числу спектральных сканов, которые были получены только по двум ярким вспышечным областям за все время работы прибора. Другой недостаток прибора — временные изменения были свернуты внутри спектральных сканов, что затруднило интерпретацию потоков излучения в линиях.

Высококачественный солнечный вспышечный рентгеновский спектр был получен в японской миссии HINOTORI [Tanaka, 1986] за счет вращения космического аппарата как целого, но опять же в ограниченном диапазоне рентгеновских длин волн, покрывающем линии излучения Fe XXVI и Fe XXV.

После 45 лет изучения солнечного рентгеновского излучения состояние экспериментальных исследований в этой области все еще остается неудовлетворительным. Так и не представилось возможным изучить весь диапазон солнечного рентгеновского излучения ниже 25 \AA , так называемый диапазон мягкого рентгена. В основном это было связано с неисправностью наиболее «продвинутого» спектрометра, летавшего на борту SMM в начале 1980-х гг., а именно FCS (Flat Crystal Spectrometer, масса $\sim 200 \text{ кг}$, длина 2 м).

Как следствие, не существует систематических записей вариаций солнечного рентгеновского излучения во всем этом спектральном диапазоне, кроме записей, полученных спектрометром РЕСИК/КОРОНАС-Ф, лишь для ограниченного спектрального участка ($3...6 \text{ \AA}$, 1 млн спектров). Эти спектры имеют инструментальное ограничение по спектральному разрешению в $0,01 \text{ \AA}$.

НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ

Некоторые общие сведения были получены на основе интерпретации более ранних измерений в нескольких ограниченных спек-

тральных диапазонах, сосредоточенных в так называемых He-подобных триплетах солнечно-распространенных ионов: Fe XXV, Ca XIX, S XV. На основе результатов анализа этих измерений в настоящее время установлено:

- спектральные линии на ранней фазе вспышек уширены из-за турбулентности [Jakimiec et al., 1986; Fludra et al., 1989] без видимого эффекта центр – лимб;
- наблюдаются компоненты спектральных линий, имеющие голубое смещение по отношению к основной тепловой плазме в течение начальных фаз вспышек и интерпретируемые в рамках сценария модели испарения [Lemen et al., 1984; Antonucci, 1985], при этом прослеживается четкая модуляция центр – лимб;
- в одном случае сильной рентгеновской вспышки наблюдались чистые доплеровские сдвиги линии [Plocieniak et al., 2002];
- K_{α} - и K_{β} -линейчатое излучение имеет заметную модуляцию центр – лимб [Phillips et al., 1994];
- относительные интенсивности излучения в линиях указывают на мультитемпературный характер источников излучения, т. е. корональной плазмы, как во вспышках, так и во вневысшечных активных областях [Sylwester et al. 2008a; 2010a];
- наблюдаемое отношение интенсивностей в линиях к континууму указывает на различие в содержании элементов в короне и в фотосфере [Phillips et al., 2010; Sylwester et al., 2008b; 2010b];
- наблюдаемое отношение интенсивностей излучения в спателлитных и резонансных линиях указывает на наличие немаксвелловского распределения (так называемое κ - или n -распределение) электронов внутри высшечных источников излучения [Dzifčáková et al., 2008; Kulinova et al., 2009].

Прибор «Хемикс» позволит, по крайней мере, в 10 раз улучшить спектральное разрешение и/или точность рентгеновских наблюдений, на основе которых ранее были получены вышеупомянутые результаты. Станет возможным выполнить исследование сотен, если не тысяч вспышек и активных областей с беспрецедентным временным и спектральным разрешением. Эти явления будут отбираться в полете по результатам анализа бортовым компьютером отдельных источников по изображениям короны, полученным через точечное отверстие.

Использование в спектрометре «Хемикс» охлаждаемых CCD-детекторов для записи спектров приведет не менее чем к десятикратному увеличению отношения сигнала фонового непрерывного излучения к шуму по сравнению с данными спектрометра РЕСИК. Это повысит точность определения абсолютного содержания химических элементов, по крайней мере, на фактор 3, что

сделает рентгеновскую диагностику состава солнечной плазмы наиболее точной. Знание относительного содержания химических элементов в солнечной плазме имеет фундаментальное значение для астрофизики в контексте гелиосейсмологии [Antia, Basu, 2006; Serenelli et al., 2009], FIP (First Ionization Potential); дифференциации элементов в солнечной атмосфере [Laming, 2009; Testa, 2010] и мощности радиационных потерь из плазмы. Комплексные исследования относительных и абсолютных интенсивностей ди-электронных линий обеспечат первую комплексную диагностику функции распределения по энергиям электронов, ответственных за возбуждение линий в наиболее интересном энергетическом диапазоне — 2...10 кэВ, где характер рентгеновского излучения меняется от теплового к нетепловому.

Основная научная цель эксперимента со спектрометром «Хемикс» — определение химического состава солнечной корональной плазмы в ярких рентгеновских структурах на основе анализа их коллимированных спектров высокого спектрального разрешения. Для анализа таких спектров будет использована наиболее современная версия специального программного обеспечения CHIANTI (<http://www.chiantidatabase.org/>). В результате станет возможным определять относительное содержание отдельных химических элементов с намного большей точностью, чем это достижимо сегодня на основе анализа фотосферных и корональных спектров. Из других целей прибора «Хемикс» отметим возможность осуществления наилучших за все время измерений излучения горячей плазмы в температурном диапазоне 2...50 МК. Это также окажет свое влияние на диагностику плазмы термоядерного синтеза.

Ожидается, что будет получено около 10 млн спектров в ранее слабо исследованном спектральном рентгеновском диапазоне (сегодня нет ни одного спектра с предполагаемым разрешением в этом диапазоне).

В течение следующего десятилетия не запланировано другого эксперимента, который мог бы обеспечить наблюдения такого качества и физического содержания, как это предусматривается в эксперименте со спектрометром «Хемикс».

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Прибор «Хемикс» разрабатывается с учетом коллективного опыта, накопленного в ходе реализации всех предыдущих экспериментов в области брегговской рентгеновской спектроскопии и потенциала активного сотрудничества, полученного при разработке

спектрометра РЕСИК/КОРОНАС-Ф. Учитывался также опыт разработки спектрометров FCS и VCS и создания спектрометров группой Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, которую возглавляли С. Л. Мандельштам и И. А. Житник [Jakimiec et al., 1975; Korneev et al., 1979; Krutov et al., 1981].

Прибор для миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД должен удовлетворять положениям, содержащимся в соответствующих документах Роскосмоса, которые превосходят требования, необходимые для космических миссий на околоземной орбите.

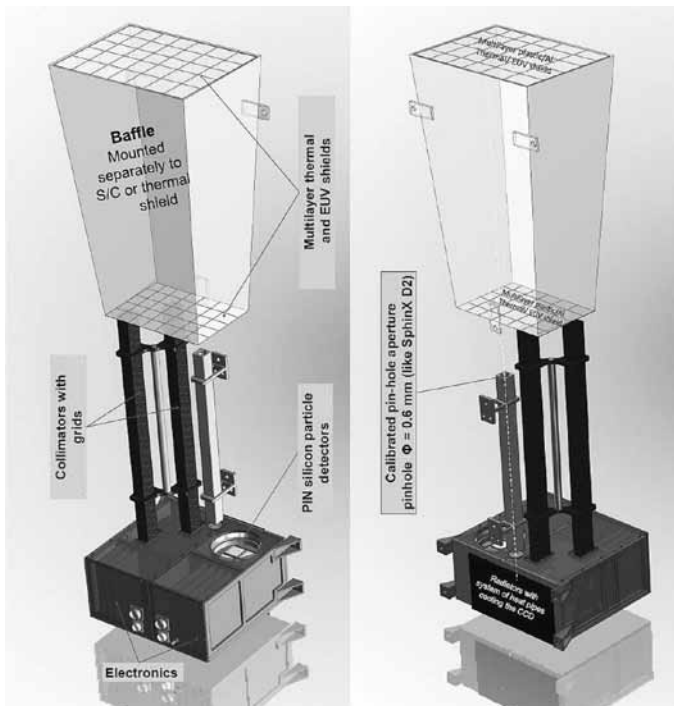
«Хемикс» — это спектрометр с выпуклым, изогнутым кристаллом. Он разрабатывается международным коллективом под руководством Отделения солнечной физики Центра космических исследований Польской академии наук во Вроцлаве (Wrocław Solar Physics Division (SPD) of the Polish Academy of Sciences Space Research Centre (PAS-SRC)) с участием специалистов ИЗМИРАН. Общий вид прибора и его характеристики представлены на рисунке и в таблице. Они соответствуют ранее разработанной польскими учеными общей концепции спектрометра.

Основные конструктивные элементы прибора приведены ниже.

- *Тепловой щит*, состоящий из двух многослойных экранов с широким полем зрения, защищает от теплового потока и ультрафиолетового излучения. Каждый экран состоит из многочисленных слоев тонкой фольги майлара или кевлара, разделенных слоями алюминия толщиной в несколько сотен ангстрем. Основная их функция — блокировать тепловую нагрузку солнечного излучения на прибор. Однако поглощение в этих слоях мягкого рентгеновского излучения ограничит спектральный диапазон прибора «Хемикс» сверху до длин волн ниже $\sim 7 \text{ \AA}$, т. е. ниже границы поглощения алюминием.

- *Движущаяся (вращающаяся) щель коллиматора*. Основная функция — ограничение поля зрения до значений, отвечающих выбранным областям на солнечном диске — активным типичного размера 100 000 км (несколько угловых минут) для волн диапазона выше 4 \AA и со вспышками размера 20 000 км (~ 20 угл. с) для более коротких длин волн.

- *Изображающий элемент* (телескоп типа камеры-обскуры (pin-hole)) с апертурой порядка 1 мм^2 . Проецирует рентгеновское солнечное изображение в реальном времени на CCD-матрицу (используется бериллиевый 12-микронный толстый фильтр). Изображения имеют характерное пространственное разрешение в несколько угловых минут, достаточное, чтобы различить излучение, исходящее из отдельных активных областей короны. Изображения затем анализируются в реальном времени процессором



Основная схема конструкции прибора «Хемикс» (подробности в тексте)

прибора, при этом будет определяться положение наиболее ярких элементов. Эта информация передается на двигатель коллиматора, который наводит спектрометр на конкретный объект, обычно на наиболее яркую область короны. Такая процедура может быть отменена командой с Земли, если в интересах всего комплекса научной аппаратуры «Интергелиозонда» предпочтение будет отдано исследованию области, расположенной в другом месте.

- *Две кристаллические части*, ориентированные противоположно в смысле спектральной дисперсии. Каждая из них будет состоять из двух широких монокристаллических подложек (кварц или кремний), изогнутых соответствующим образом до требуемого радиуса, и трех специальных кристаллических полос для доплерометра. Эти кристаллы покроют спектральный диапазон примерно от 1,2 до 7 Å в ~8 тыс. спектральных каналах, обеспечиваемых двумя 2k×2k CCD-матрицами. При этом может быть достигнуто более высокое разрешение спектра при увеличенных

порядках отражения, которые сразу отфильтровываются ADC преобразователем. Возможны 2-й и 3-й порядок отражения для кварца и 3-й порядок для кремния. Выбор кристаллов для доплерометра предстоит еще сделать. Они будут предназначены для измерений с очень высоким спектральным разрешением в наиболее значимых узких спектральных диапазонах, в которых ожидается получение наиважнейшей информации.

- *Детекторы* будут состоять из трех идентичных CCD-матриц (испытанных в космосе — аналогично e2v-технологиям — <http://www.e2v.com/>). Две из них предназначены для измерения спектра бреговского отражения, третья — для канала камеры-обскуры солнечного телескопа. Все CCD-матрицы пассивно охлаждаются системой тепловых трубок (заполненных конденсированным газом), соединенных с внешним радиатором. Это позволит обеспечить рабочую температуру CCD-матриц ниже ~ 20 °С. Система CCD-матриц будет разработана и проверена совместно с ФИАН (группа С. В. Кузина).

- *Система мониторинга фоновой радиации (частиц)* из специально разработанных штыревых (pin) кремниевых подложек и сцинтилляторов, помещенных на CCD-матрицу. Задача системы — измерять в реальном времени поток заряженных частиц (электронов и протонов), которые возникают от пучков солнечных энергичных частиц (SEP), сопровождающих большие вспышки. Поток этих частиц может достигать такого уровня, что потребуются закрывать детекторный блок соответствующим механизмом, чтобы предотвратить разрушение детекторов. Работа затвора будет контролироваться бортовым процессором по показаниям в различных каналах монитора частиц. Монитор планируется разрабатывать в кооперации со специалистами из Харьковского университета (О. В. Дудник), которые имеют проверенные данные успешных измерений радиационной обстановки на спутнике «КОРОНАС-Фотон» (СТЕП-Ф) [Дудник, 2010].

- *Электроника прибора* будет основана главным образом на FPGA-технологии. Важной ее частью станет процессор-контроллер, снабженный программами: записи измерений; активации моторов движущихся частей прибора; локализации излучающих областей на солнечном диске меняющегося диаметра; оповещения о вспышках; сжатия данных и форматирования их соответствующим образом для ввода в телеметрический канал. Время будет задаваться для каждой CCD-матрицы (с точностью до 1 мс), чтобы иметь возможность последующего анализа по запросу с Земли.

- *Большой буфер памяти* (до 64 Гб) для хранения истории всех зарегистрированных событий, включая время начала и знак амплитуды события (первый, второй и третий порядок отражения).

Эти данные могут быть сброшены на Землю при возможности передачи телеметрии с высокой скоростью.

Прибор «Хемикс» будет иметь специальную часть с радиоактивным изотопом Fe^{55} для калибровки отклика CCD-матрицы в течение всей миссии. Орбитальный сценарий допускает начало работы прибора сразу после завершения фазы дегазации и на протяжении предполагаемой длительности миссии — около 10 лет. Поэтому при его разработке особое внимание должно уделяться радиационной стойкости элементов и конструктивных блоков, используемых при проектировании прибора, а также значительной автономности работы прибора в периоды ограниченной связи космического аппарата с Землей (космический аппарат будет находиться вблизи Солнца и за Солнцем, если «смотреть» с Земли).

Основные характеристики прибора «Хемикс»

Вес	5...6 кг
Размер	30×30×140 см (с экранами)
Энергопотребление	10 Вт
Телеметрия	60 МБ/сут

Выделенная квота по телеметрии около 60 МБ/сут позволит после завершения проекта в 2023 г. сформировать базу данных по рентгеновским спектрам высокотемпературной плазмы средней плотности (типичной для солнечных вспышек), на порядки величин большую любой другой, существующей в настоящее время.

Спектральные данные будут накапливаться с использованием CCD-детекторов: 5 спектральных полос на каждой CCD-матрице длиной в 2000 спектральных ячеек в направлении дисперсии. Спектральная информация записывается в телеметрию для каждого из 10 спектральных диапазонов, формируя средние ее нормы с некоторой погрешностью. Оставшиеся квоты телеметрии за счет неосвещаемых концов диапазонов на каждой CCD-матрице (2×24 ячейки полос) планируется использовать для оценки фона. Данные камеры-обскуры будут собираться и обрабатываться на борту. Профили излучения отдельных активных областей записываются в память. Информация о вспышках для «Хемикса» будет выдаваться так же, как и для других приборов «Интергелиозонда», на ССНИ бортового компьютера. Положения наиболее ярких элементов или представляющих интерес областей на Солнце определяются на борту КА или передаются по команде с Земли. Следует иметь в виду, что время передачи команды может достигать 15 мин, так что при создании прибора необходимо предусмотреть достаточные функциональные возможности для его автономной работы.

Будут определяться следующие величины, характеризующие физические условия в отдельных корональных структурах:

- тепловая (ионная температура) и турбулентная ширина линий для всех данных накапливаемого временного интервала (вплоть до 1 с) для элементов Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ar, Ca, Fe, Ni;
- направленные плазменные движения ключевых плазменных компонентов, таких как Si, S, Ar, Ca, Fe (впервые будет предоставлена возможность определения абсолютных движений благодаря проверенной в космосе концепции рентгеновского доплерометра);
- мультитемпературная структура тепловой плазмы, впервые на основе сотен, а не десятков, как в настоящее время, температурно чувствительных линий, включая переходы в многократно ионизованных H- и He-подобных ионах и последовательности резонансных линий, простирающихся до спектральных компонент с $n > 10$;
- профили функции распределения возбудителей (электронов) в диапазоне 2...10 кэВ в источниках излучения на основе анализа истинных относительных интенсивностей так называемых сателлитных линий, образующихся в резонансных процессах ди-электронных возбуждений;
- радиационный фон (фон частиц) на CCD-матрице с использованием специального детектора мониторинга частиц.

Эти измерения, привязанные по времени, и в совокупности с данными других космических аппаратов и наземных наблюдений, позволят впервые реализовать полный и детальный подход к решению наиболее общего уравнения энергетического баланса для корональной плазмы, разгадать сложные фундаментальные процессы передачи энергии от места ее накопления в корональных магнитных структурах к нетепловым и тепловым компонентам, которые проявляются посредством высокоэнергичного излучения. Благодаря специфической орбите «Интергелиозонда» станет возможным решить научные задачи, недоступные при наблюдениях с других орбит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дается краткое описание польско-российского бреговского спектрометра «Хемикс», разработанного для межпланетной миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, в которой космический аппарат приблизится к Солнцу до 60...70 солнечных радиусов.

Прибор «Хемикс» на борту КА «Интергелиозонд» будет представлять собой самый современный и самый чувствительный рентгеновский спектрометр из когда-либо использовавшихся в космосе. В его конструкции принцип рентгеновского доплерометра впервые объединен с брегговским отражением изогнутого кристалла. Это даст возможность изучить движения плазмы в абсолютной системе координат, позволяя выполнить детальную проверку так называемого сценария испарения вспышечного гидродинамического моделирования. Предложенная конструкция солнечного брегговского спектрометра с изогнутым кристаллом нового поколения — в настоящее время единственная инструментальная разработка, планируемая для солнечной миссии на следующее десятилетие, т. е. на период 25-го цикла солнечной активности.

Одна из основных задач прибора «Хемикс» — измерения с высоким спектральным разрешением, оперативная рентгеновская спектроскопия солнечной корональной плазмы, нагретой до температур во много миллионов градусов. Спектры станут регистрироваться в десяти спектральных каналах со спектральным разрешением, позволяющим измерять тепловые профили линий во всех 10 тысячах спектральных точек. Интерпретация этих спектров будет использоваться для определения абсолютного содержания следующих элементов: Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ar, Ca, Fe и Ni, вносящих вклад в спектр линейчатого излучения, наблюдаемого в спектральном диапазоне ниже 7 Å.

Ожидается получение около 10 млн спектров в год в ранее слабо исследованном спектральном рентгеновском диапазоне (сегодня не существует ни одного спектра с предполагаемым разрешением в этом диапазоне). Полученные данные будут объединены в уникальную базу спектральных данных. Открытая для доступа, она может использоваться не только для исследований по солнечной физике, но и в интересах плазменных физиков, специалистов атомной физики и плазменной диагностики, так как термодинамические характеристики солнечной вспышечной плазмы схожи с характеристиками плазмы термоядерного синтеза в токамаках и в других термоядерных установках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая разработка прибора «Хемикс» была возможна благодаря тесной кооперации сотрудников Центра космических исследований Польской академии наук Jarek Bakala, Szymon Gburak, Zbigniew Kordylewski, Mirosław Kowalinski, Stefan Płoceniak,

Piotr Podgurski, Marek Siarkowski, Barbara Sylwester, Witold Trzebinski, а также благодаря содействию российских специалистов из ИЗМИРАН (под руководством В.Д. Кузнецова) и из ФИАН (С.В. Кузин).

ЛИТЕРАТУРА

- [Дудник, 2010] Дудник О.В. // Космическая наука и технология. 2010. Т. 16. № 2. С. 12.
- [Acton et al., 1980] *Acton L. W., Finch M. L., Gilbreth C. W., Culhane J. L., Bentley R. D., Bowles J. A., Guttridge P., Gabriel A. H., Firth J. G., Hayes R. W.* // *Solar Physics*. 1980. V. 65. P. 53.
- [Antia, Basu, 2006] *Antia H. M., Basu S.* // *Astrophysical J.* 2006. V. 644. P. 1292.
- [Antonucci et al., 1985] *Antonucci E., Dennis B. R., Gabriel A. H., Simnett G. M.* // *Solar Physics*. 1985. V. 96. P. 129.
- [Culhane et al., 1991] *Culhane J. L., Bentley R., Hiei E., Watanabe T., Doschek G., Brown C., Cruise A., Lang J., Ogawara Y., Uchida Y.* // *Solar Physics*. 1991. V. 136. P. 89.
- [Doschek, 1983] *Doschek G. A.* // *Solar Physics*. 1983. V. 86. P. 9.
- [Dzifčáková et al., 2008] *Dzifčáková E., Kulinová A., Chifor C., Mason H. E., Del Zanna G., Sylwester J., Sylwester B.* // *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 488. P. 311.
- [Fludra et al., 1989] *Fludra A., Bentley R. D., Lemen J. R., Jakimiec J., Sylwester J.* // *Astrophysical J.* 1989. V. 344. P. 991.
- [Jakimiec et al., 1975] *Jakimiec J., Korneev V. V., Krutov V. V., Zhitnik I. A., Plocieniak S., Sylwester B., Sylwester J.* // *Solar Physics*. 1975. V. 44. P. 391.
- [Jakimiec et al., 1986] *Jakimiec J., Fludra A., Lemen J. R., Dennis B. R., Sylwester J.* // *Advances in Space Research*. 1986. V. 6. N. 6. P. 191.
- [Korneev, 1979] *Korneev V. V., Krutov V. V., Mandelshtam S. L., Urnov A. M., Zhitnik I. A., Kononov A. Ia., Golts E. Ia., Sidelnikov Iu. V., Sylwester B., Sylwester J.* // *Solar Physics*. 1979. V. 63. P. 319.
- [Krutov et al., 1981] *Krutov V. V., Korneev V. V., Karev U. I., Lomkova V. M., Oparin S. N., Urnov A. M., Zhitnik I. A., Bromboszcz G., Starkowski M., Sylwester J.* // *Solar Physics*. V. 73. P. 105.
- [Kulinová et al., 2009] *Kulinová A., Dzifčáková E., Sylwester B., Sylwester J.* // *Central European Astrophysical Bulletin*. 2009. V. 33. P. 243.
- [Laming, 2009] *Laming J. M.* // *Astrophysical J.* 2009. V. 695. P. 954.
- [Lemen et al., 1984] *Lemen J. R., Phillips K. J. H., Cowan R. D., Hata J., Grant I. P.* // *Astronomy and Astrophysics*. 1984. V. 135. P. 313.
- [Phillips et al., 1994] *Phillips K. J. H., Pike C. D., Lang J., Watanabe T., Takahashi M.* // *Astrophysical J.* 1994. V. 435. P. 888.
- [Phillips et al., 2010] *Phillips K. J. H., Sylwester J., Sylwester B., Kuznetsov V. D.* // *Astrophysical J.* 2010. V. 711. P. 179.

- [Plocieniak et al., 2002] *Plocieniak S., Sylwester J., Kordylewski Z., Sylwester B.* // ESA SP-506. 2002. V. 2. P. 963.
- [Serenelli et al., 2009] *Serenelli A. M., Basu S., Ferguson J. W., Asplund M.* // Astrophysical J. Letters. 2009. V. 705. N. L123.
- [Sylwester, Farnik, 1990] *Sylwester J., Farnik F.* // Bull. of the Astronomical Inst. of Czechoslovakia . 1990. V. 41. P. 149–157.
- [Sylwester et al., 2005] *Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowaliński M., Nowak S., Płocieniak S., Starkowski M., Sylwester B., Trzebiński W., Bąkała J., and 12 co-authors* // Solar Physics. 2005. V. 226. P. 45.
- [Sylwester et al., 2008a] *Sylwester B., Sylwester J., Landi E., Phillips K.J.H.* // J. Astrophysics and Astronomy. 2008. V. 29. P. 147.
- [Sylwester et al., 2008b] *Sylwester J., Sylwester B., Landi E., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* // Advances in Space Research. 2008. V. 42. P. 838.
- [Sylwester et al., 2010a] *Sylwester B., Sylwester J., Phillips K.J.H.* // Astronomy and Astrophysics. 2010. V. 514. id. A82.
- [Sylwester et al., 2010b] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* // Astrophysical J. 2010. V. 710. P. 804.
- [Tanaka, 1986] *Tanaka K.* // Publications of the Astronomical Society of Japan. 1986. V. 38. N. 2. P. 225.
- [Tanaka et al., 1982] *Tanaka K. et al.* // Annu. Tokyo Astronomical Observatory. 1982. V. 18. N. 4. P. 237.
- [Testa, 2010] *Testa P.* // Space Science Reviews. 2010. V. 157. P. 37.

ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ МЯГКОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПРИБОРОМ ПИНГ-М В ПРОЕКТЕ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

**А. С. Гляненько, Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, Е. Э. Лупарь,
Ю. А. Трофимов, И. В. Рубцов, Е. А. Жучкова, А. В. Кочемасов**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ), Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

Обсуждаются научные задачи эксперимента по прецизионной спектрометрии излучения солнечных вспышек в диапазонах мягкого (1,5...25 кэВ) и жесткого рентгеновского и гамма-излучения (25...2000 кэВ). Приведены описания и характеристики полупроводникового и сцинтилляционного спектрометров прибора ПИНГ-М для спутникового проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование энергетических спектров электромагнитного излучения Солнца в рентгеновском и гамма-диапазонах дает уникальную информацию о процессах энерговыделения и нагрева в корональной плазме, трансформации и передачи энергии магнитного поля ускоренным заряженным частицам во время вспышечных процессов.

Существующие модели солнечной вспышки основаны на процессах, которые происходят во взаимодействующих друг с другом магнитных петлях, частично выходящих в корону. Вспышечные события регистрируются по вторичным процессам, возникающим в областях петель, отличных от зоны первичного энерговыделения, и запаздывающим по времени. При диссипации энергии магнитного поля происходит нагрев корональной плазмы до температур в десятки миллионов градусов, а электроны, протоны и ядра солнечного вещества ускоряются до высоких энергий [Модель космоса, 2007].

Электромагнитные излучения несут основную информацию о процессах ускорения при движении частиц во вспышечных областях. Для понимания первичного энерговыделения важно измерение характеристик мягкого (SXR — энергии 1,5...25 кэВ) и жесткого (HXR — энергии 25...300 кэВ) рентгеновского и гамма-излучения (энергия >300 кэВ). Мягкое рентгеновское излучение с энергией <20 кэВ и линейчатое рентгеновское излучение не полностью ионизованных атомов вещества солнечной плазмы возникает вследствие разогрева фотосферы и нижней короны

тепловым фронтом и торможения в ней ускоренных электронов. Непрерывный спектр может носить не только тепловой характер, но быть и квазистепенным, образующимся при радиационном торможении электронов с $5 < E_e < 40$ кэВ, ускоренных каким-либо механизмом. При торможении ускоренных нетепловым механизмом электронов ($E_e > 30 \dots 40$ кэВ) возникает жесткое рентгеновское излучение, а ускоренные протоны и ядра при взаимодействии с веществом производят линейчатое гамма-излучение и нейтроны [Котов и др., 2009, 2011; Матвеев и др., 2009; Dennis et al., 2007; Krucker et al.; Gburek et al., 2011, 2008; Jain et al., 2005, 2006; Smith et al., 2002; Sylwester et al., 2005].

Поведение SXR и HXR-излучений отражает временные и энергетические характеристики ускорительного механизма. Если в процессе ускорения возникают пучки электронов, то их тормозное излучение для наблюдателя будет линейно поляризованным. Плоскость и степень поляризации излучения связаны с угловым и энергетическим распределением электронов, а также с гелиоцентрическим углом наблюдения вспышки. При взаимодействии ускоренных ядер с энергиями 10...30 МэВ/нукл с веществом солнечной атмосферы возникает излучение в узких гамма-линиях, лежащее в интервале 0,17...17 МэВ. Временное поведение линий отражает мгновенные изменения интенсивностей потоков ускоренных частиц, а их соотношение связано с составом солнечной атмосферы.

ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

Прецизионные спектрометрические измерения рентгеновского и низкоэнергетичного гамма-излучения Солнца проводятся с целью анализа амплитудно-временного поведения спектров в диапазоне энергий:

- SXR от 1,5 до 25 кэВ;
- HXR от 25 до 300 кэВ;
- гамма-линий от 0,3 до 2,0 МэВ.

РЕШАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Результаты измерений будут использованы для решения следующих научных задач:

- разделение тепловой и нетепловой компонент в энергетических спектрах солнечных вспышек для уточнения соотношения теплового (нагрева) и нетеплового ускорения электронов и оценки суммарной энергии, переданной ускоренным электронам;

- определение степени линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по результатам спектрометрических измерений блоком ПИНГ-ПИРС и поляризационных измерений блоком ПИНГ-П;
- развитие моделей ускорения электронов, протонов и ядер до энергий 10...30 МэВ/нукл;
- определение характеристик излучающей плазмы (температура, мера эмиссии);
- поиск триггерных механизмов запуска солнечных вспышек.

ОПИСАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТУРЫ

Прибор ПИНГ-М состоит из двух измерительных блоков:

- блока ПИНГ-П, предназначенного для поляризационных измерений;
- блока ПИНГ-ПИРС, реализующего спектрометрические функции в диапазоне от 1,5 кэВ до 2,0 МэВ.

Блок ПИНГ-ПИРС также осуществляет информационное взаимодействие с системой ССНИ и обеспечивает для блока «Пинг-П» доступ к информационным ресурсам этой системы. Функциональная схема прибора ПИНГ-М приведена на рис. 1.

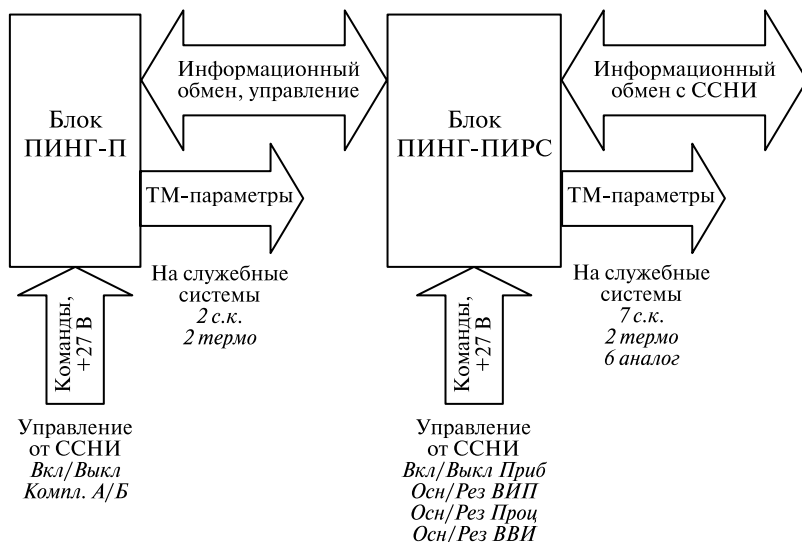


Рис. 1. Функциональная схема прибора ПИНГ-М

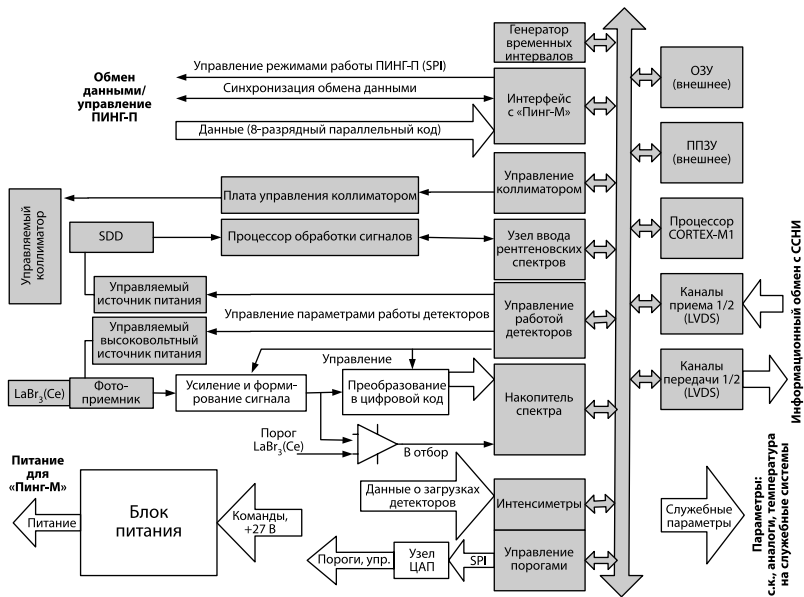


Рис. 2. Функциональная схема блока «Пинг-Пирс»

Далее будем рассматривать только характеристики блока ПИНГ-ПИРС (его функциональная схема приведена на рис. 2).

Блок ПИНГ-ПИРС обеспечивает выполнение следующих задач.

А. Взаимодействие с блоком ПИНГ-П:

- сбор данных с блока ПИНГ-П;
- передача управляющих воздействий на ПИНГ-П.

Общеприборные задачи:

- обеспечение вторичного электропитания для всех блоков;
- первичная обработка данных;
- упаковка полученных данных;
- привязка данных по времени;
- передача данных на телеметрическую систему ССНИ;
- прием управляющих кодовых слов и меток времени от телеметрической системы ССНИ;
- преобразование информации, поступающей в виде потоков импульсов (интенсиметры), в цифровой код и передача данных на телеметрическую систему ССНИ.

Эти задачи реализуются специализированной системой сбора и обработки данных на базе ПЛИС RT 3PE3000L фирмы Actel

с использованием вычислительного ядра CORTEX-M1 и необходимых дополнительных интерфейсов и узлов.

Б. Спектрометрия низких энергий

Для спектрометрии низких энергий используется кремниевый дрейфовый диод (SDD), позволяющий проводить прецизионные спектрометрические измерения в диапазоне 1,5...25 кэВ. Типичные характеристики эффективности и энергетического разрешения (при различных временах формирования сигнала и различных входных нагрузках) для SDD-детекторов фирмы Amptek, США, тип XR100SDD [<http://www.amptek.com/>], приведены на рис. 3 и 4. Основные преимущества SDD по сравнению с обычными кремниевыми детекторами — малая емкость анода и наличие «дрейфового промежутка», что позволяет быстрее собирать заряд с меньшими шумами и более высоким энергетическим разрешением. Для SDD этого типа было получено рекордное энергетическое разрешение 123 эВ при энергии квантов 5,9 кэВ (при времени сбора заряда 11,2 мкс). Очень важная особенность этих детекторов — малое время сбора, что позволяет использовать их при достаточно больших нагрузках рентгеновскими квантами.

При времени формирования и накопления сигнала 0,8 мкс, обеспечивается быстродействие до 10^6 квант/с при энергетическом разрешении, не превышающем 180 эВ. Для сравнения,

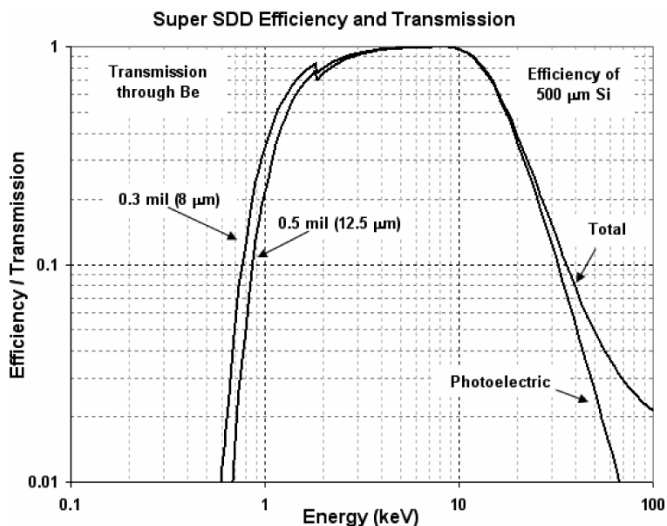


Рис. 3. Зависимость эффективности SDD от энергии фотонов

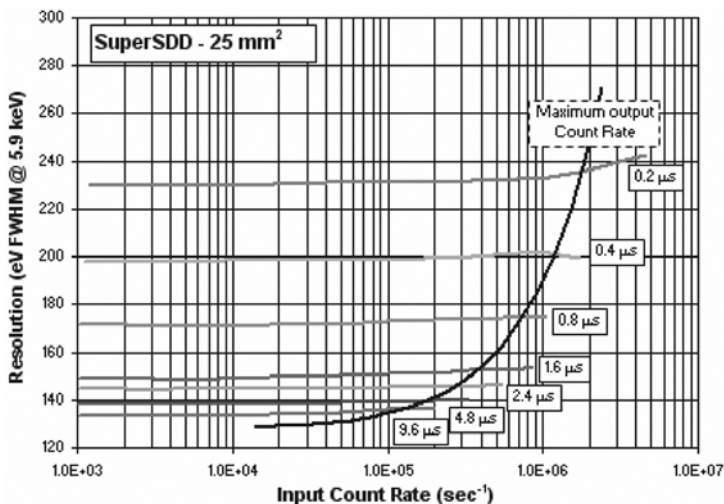


Рис. 4. Зависимость энергетического разрешения от загрузки детектора для различных времен формирования сигнала

в эксперименте SphinX (проект КОРОНАС-ФОТОН) использовались Si-PIN-детекторы производства фирмы Amptek толщиной 500 мкм, с энергетическим разрешением ~360 и 430 эВ [Гбурек и др., 2011].

Подсистема обработки информации (процессор сигналов) позволяет проводить спектрометрические измерения, варьируя по командам с Земли различные параметры — число каналов (от 256 до 4096), время накопления спектра (от 0,1 до 60 с). Кроме того, в блоке ПИНГ-ПИРС предполагается использование управляемого коллиматора, который позволит в автоматическом режиме менять на 3 порядка входную апертуру для того, чтобы обеспечить возможность прецизионного измерения спектров вспышек в диапазоне от А- до Х-классов по шкале GOES на различном удалении от Солнца.

В. Спектрометрия жесткого излучения

В качестве детектора для диапазона HXR и γ -линий используется неорганический кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ диаметром 38 и высотой 38 мм. Сбор света осуществляется фотоэлектронным умножителем производства Hamamatsu. Отличительная особенность $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ — максимальный, на данный момент, световыход среди сцинтилляционных детекторов и малое время высвечивания, что позволяет проводить амплитудно-временной анализ потоков из-

лучения с параметрами, значительно лучшими, чем при использовании других типов сцинтилляторов. Кроме того, $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ имеет очень слабую зависимость световых выхода от температуры. К недостаткам кристалла можно отнести высокую гигроскопичность и довольно значительную собственную и примесную активность. Стоит отметить, что кристалл достаточно дорог и стоимость сборки кристаллов ($\varnothing 38 \times 38$ мм) — ФЭУ, изготавливаемых компанией Canberra Industries, составляет около 30 000 дол. Причем данные блоки не предназначены для работы в условиях жестких механических и климатических воздействий и требуют значительной конструкционной доработки. Для определения параметров спектрометра в НИЯУ МИФИ были проведены расчеты и выполнены экспериментальные исследования с лабораторным образцом кристалла диаметром 25 и высотой 25 мм отечественного производства. Результаты приведены на рис. 5 и 6.

Из полученных результатов можно сделать следующее заключение:

- спектрометр на кристалле $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ способен обеспечить высокую линейность сигнала в диапазоне от 0,025 до 4,4 МэВ;
- энергетическое разрешение при энергиях 60, 662 и 1332 кэВ будет не хуже 12; 3,5 и 2,7 % соответственно;

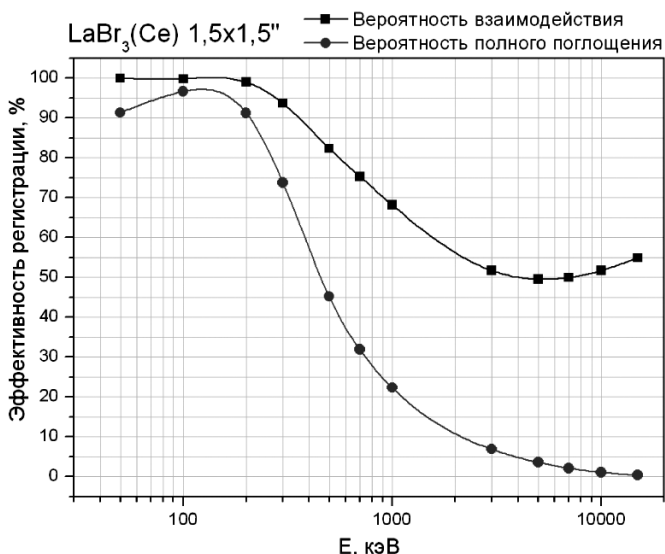


Рис. 5. Зависимость эффективности $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ от энергии фотонов

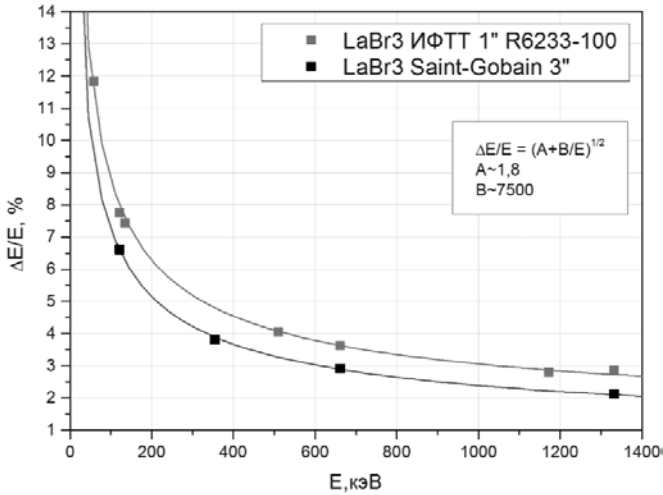


Рис. 6. Зависимость энергетического разрешения $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ от энергии квантов

- доля событий в пике полного поглощения уменьшается от 90 % при энергии 50 кэВ до 5 % при энергии 2 МэВ;
- собственное излучение дает значительный фоновый вклад в области энергий 2,0...3,0 МэВ;
- при использованном времени интегрирования около 1 мкс максимальная скорость регистрации в канале составит до $5 \cdot 10^5$ квантов/с.

Основные характеристики блока ПИНГ-ПИРС

габариты 120×170×320 мм
 масса, не более 3,5 кг
 энергопотребление, не более 6,5 Вт
 рабочая температура 0...50 °С

Характеристики детекторов блока ПИНГ-ПИРС

Характеристика	Детектор	
	SXR	HXR
Диапазон энергий, кэВ	1,5...25	25...2000
Площадь, мм ²	0,01...5	1100
Энергетическое разрешение	Не хуже 200 эВ при $E_{\phi} = 5,9$ кэВ	Не хуже 12 % при $E = 60$ кэВ Не хуже 3,5 % при $E = 662$ кэВ

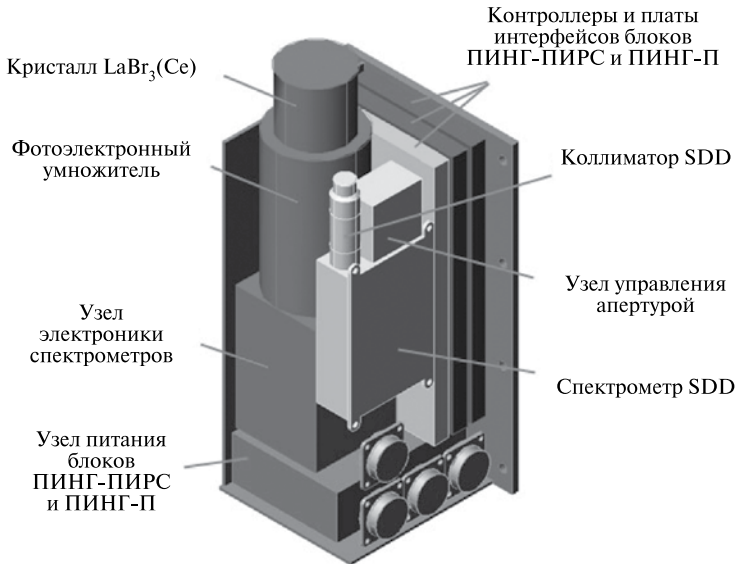


Рис. 7 Сборка блока ПИНГ-ПИРС

На рис. 7 приведена сборка блока ПИНГ-ПИРС.

Общие ресурсы прибора ПИНГ-М

Подача питания и управление выбором резервных блоков прибора ПИНГ-М осуществляется одиннадцатью разовыми импульсными командами. Для настройки прибора используются цифровые управляющие массивы ССНИ. Объем передаваемых данных не более 200 байт за сеанс управления.

Для контроля режимов работы планируется вводить в состав научной информации следующие параметры:

- сухие контакты — 9 (режим функционирования),
- температурные — 4 (температуры детекторов и платы источников питания).

Информативность прибора (ПИНГ-ПИРС + ПИНГ-П) не более 30 МБ/сут.

Для привязки экспериментальных данных к системе единого времени требуется код бортового времени и синхрочастоты 1 мс и 1 с. Точность привязки должна быть не хуже 1 мс.

Режим работы аппаратуры — непрерывный при ориентации на Солнце. В период минимума солнечной активности (вспышки

классов А, В) возможно периодическое отключение блока поляризации и снижение энергопотребления до 6 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследований на КА «Интергелиозонд» блок ПИНГ-ПИРС прибора ПИНГ-М обеспечит необходимые эффективность и точность измерений энергетических спектров рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, что позволит решить или значительно продвинуться в решении следующих задач:

- разделение тепловой (тепловых) и нетепловой компонент по виду энергетических спектров SXR;
- определение временных и энергетических характеристик ускоренных электронов и низкоэнергичных протонов по спектрам HXR и гамма-линиям;
- получение спектральной информации для определения степени линейной поляризации HXR.

Разрабатываемая аппаратура будет иметь значительно лучшие характеристики по энергетическому и временному разрешению, чем ранее использовавшиеся аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

- [Гбурек и др., 2011] *Гбурек С., Сильвестер Я., Ковалински М.* и др. Спектрофотометр мягкого рентгеновского диапазона SphinX: научные задачи, конструкция и функционирование // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 3. С. 195–206.
- [Котов и др., 2009] *Котов Ю. Д., Архангельский А. И., Гляненко А. С.* и др. Исследование характеристик нестационарных потоков космического гамма-излучения по данным аппаратуры АВС-Ф / *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф»* / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит. 2009. С. 178–258.
- [Котов и др., 2011] *Котов Ю. Д., Гляненко А. С., Архангельский А. И.* и др. Эксперимент по исследованию характеристик рентгеновского излучения солнечных вспышек с помощью прибора ПИНГВИН-М на КА КОРОНАС-Фотон // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 2. С. 139–149.
- [Матвеев и др., 2009] *Матвеев Г. А., Дмитриев П. Б., Кудрявцев И. В.* и др. Исследование временной структуры и энергетических спектров рентгеновского излучения солнечных вспышек / *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит. 2009. С. 366–400.

- [Модель космоса, 2007] Модель космоса. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 872 с.
- [Dennis et al., 2007] *Dennis B. R., Hudson H. S., Krucker S.* Review of Selected RHESSI Solar Results // *Lecture Notes in Physics (LNP)*. 2007. V. 725. P. 33–64.
- [Gburek et al., 2011] *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 Research*. 2011. V. 45. N. 2. P. 182–187.
- [Jain et al., 2005] *Jain R., Dave H., Shah A. B.* et al. Solar X-Ray Spectrometer (SOXS) Mission on Board Gsat2 Indian Spacecraft: The Low-Energy Payload // *Solar Physics*. 2005. V. 227. P. 89–122.
- [Jain et al., 2006] *Jain R., Pradhan A. K., Joshi V.* et al. The Fe-Line Feature in the X-Ray Spectrum of Solar Flares: First Results from the SOXS Mission // *Solar Physics*. 2006. V. 239. P. 217–237.
- [Krucker et al., 2008] *Krucker S., Battaglia M., Cargill P. J.* et al. Hard X-ray Emission from the Solar Corona // *Astronomy and Astrophysics Rev*. 2008. V. 16. P. 155–208.
- [Smith et al., 2002] *Smith D. M., Lin R. P., Turin P.* et al. The RHESSI Spectrometer // *Solar Physics*. 2002. V. 210. P. 33–60.
- [Sylwester et al., 2005] *Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z.* et al. RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // *Solar Physics*. 2005. V. 226. P. 45–72.

ПОЛЯРИМЕТРИЯ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Ю. Д. Котов¹, А. С. Гляненко¹, В. Н. Юров¹, Е. А. Жучкова¹,
О. Н. Умнова¹, В. А. Дергачев², В. М. Круглов², Г. А. Матвеев²,
В. П. Лазутков², Д. В. Скородумов², М. И. Савченко²

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ), Россия, 123456, Москва, Каширское ш., 31*

² *Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ), Россия, 194021, Санкт-Петербург,
Политехническая, 26*

В статье дан анализ ожидаемой величины степени поляризации для различных моделей солнечных вспышек. Представлен принцип определения степени линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек, основанный на восстановлении степени поляризации по азимутальной асимметрии комптоновского рассеяния. Сравниваются эффективные площади поляриметров RHESSI, СПР-Н («КОРОНАС-Ф») и «Пингвин-М» («КОРОНАС-Фотон»). Приведен обзор выполненных к настоящему времени результатов измерений поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца. Описана структура и характеристики поляриметра ПИНГ-П, предназначенного для проведения эксперимента на космическом аппарате (КА) «Интергелиозонд». Принцип построения прибора основан на анализе работ и опыта прибора «Пингвин-М»/«КОРОНАС-Фотон».

Ускоренные в солнечных вспышках электроны испытывают торозное излучение, формирующее непрерывный энергетический спектр с максимальными энергиями порядка начальной кинетической энергии электронов. Спектр не имеет спектральных особенностей. При субрелятивистских и релятивистских энергиях фотоны испускаются преимущественно вперед с характерным углом отклонения $\theta \approx 1/\gamma$, где γ — лоренц-фактор частицы. Для мононаправленного пучка электронов, имеющих различные энергии, наблюдаемая форма спектра фотонов будет зависеть от угла движения пучка электронов 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 [Боговалов и др., 1985] для рентгеновского излучения в диапазоне 10...600 кэВ для разных угловых распределений ускоренных электронов. Из сопоставления данных прибора «Снег-2МЗ», работавшего на борту КА «Венера-13, -14», с расчетом [Боговалов и др.,

1997] следует [Боговалов и др., 1988а], что обнаруженное смягчение спектров к центру диска Солнца, вероятнее всего, обусловлено угловой анизотропией ускоренных электронов.

При наличии угловой анизотропии излучающих электронов возможно появление линейной поляризации у наблюдаемых рентгеновского и гамма-излучений. На возможность получения информации об угловом распределении частиц, ускоренных в солнечных вспышках, на основании поляризационных измерений было впервые указано в работе [Корчак, 1967]. Здесь и далее речь идет о линейной поляризации излучения.

Возникающая степень поляризации была вычислена в работе [Боговалов и др., 1988б] с одновременным учетом энергетических потерь и многократного кулоновского рассеяния. На рис. 1 линиями представлена угловая зависимость степени поляризации тормозного излучения с энергией 16 кэВ в модели мононаправленного пучка по нормали к поверхности Солнца и модели диффузного падения пучка.

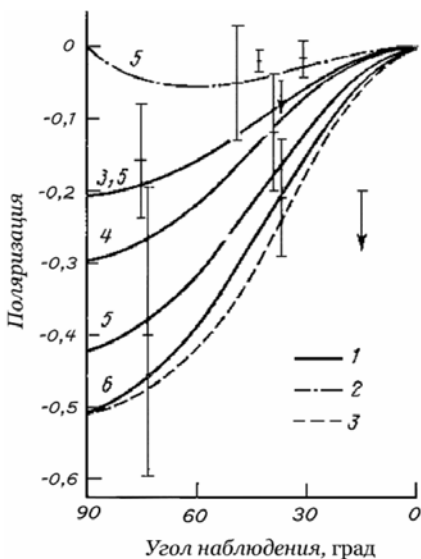


Рис. 1. Угловая зависимость степени поляризации тормозного излучения с энергией 16 кэВ в модели мононаправленного пучка по нормали к поверхности Солнца (кривые 1) и модели диффузного падения пучка (кривые 2). Цифры у кривых — показатели степенных энергетических спектров ускоренных электронов. Кривая 3 — поляризация тормозного излучения, генерируемого мононаправленным пучком электронов с показателем спектра $\delta = 6$

Вычисления поляризации ансамбля частиц в двух пространственных конфигурациях, выполненные в работах [Langer, Petrosian, 1977; Leach, Petrosian, 1983] представлены на рис. 2 и 3.

Как следует из результатов расчетов, степень поляризации в лучшем случае не превышает 50%. Отметим, что в обычно используемых моделях ожидаемая степень поляризации максимальна для прилиम्бовых вспышек, стремясь к нулю для вспышек с нулевым гелиоцентрическим углом. Учет вклада альbedo может привести для мягкого и жесткого рентгена к степени поляризации несколько процентов для вспышек в центре диска.

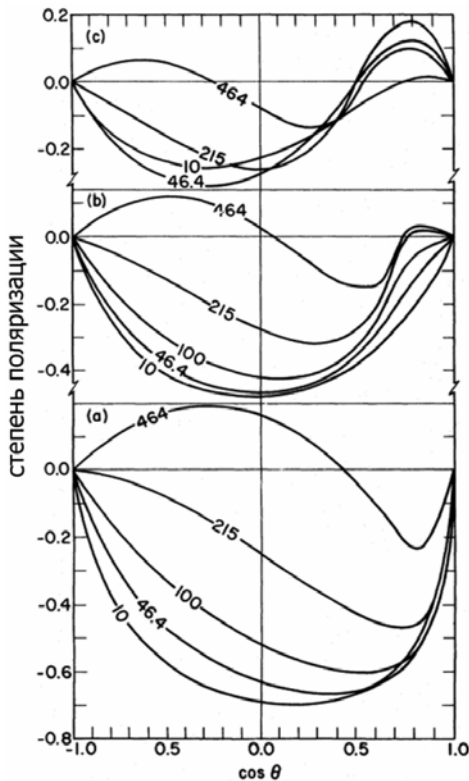


Рис. 2. Зависимость от угла наблюдения степени поляризации тормозного излучения (с учетом альbedo) при движении электронов в вертикальном однородном магнитном поле для трех значений питч-угла μ , град: (a) — 0; (b) — 30; (c) — 45. Показатель степенного энергетического спектра электронов $\delta = 4$. Цифры у кривых — энергия фотонов в килоэлектронвольтах

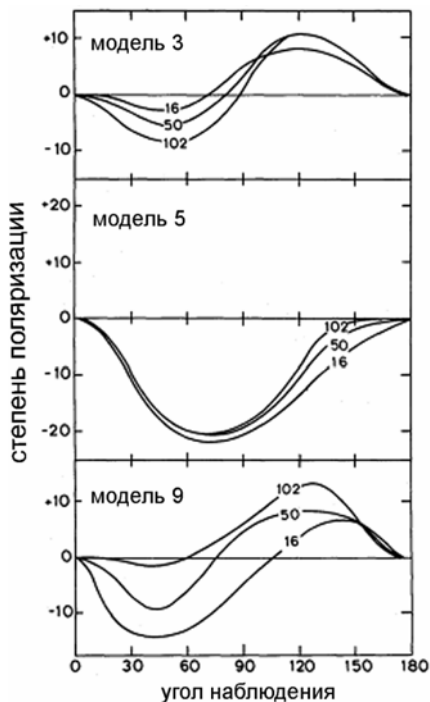


Рис. 3. Зависимость от угла наблюдения вспышки степени поляризации тормозного излучения для трех моделей с показателем степенного энергетического спектра электронов $\delta = 5$. Модель 3 — поле однородно по всей длине арки, пучок электронов изотропен. Модель 5 — поле однородно по всей длине арки, пучок электронов коллимирован. Модель 9 — поле сильно неоднородно по всей длине арки, пучок электронов изотропен. Цифры у кривых — энергия фотонов в килоэлектронвольтах

Построение поляриметров жесткого рентгеновского излучения основано на зависимости азимутального распределения фотонов, рассеянных на электронах среды в результате комптон-эффекта (рис. 4).

Для полностью поляризованного пучка дифференциальное сечение, проинтегрированное по всем переменным, кроме азимутального угла, имеет вид:

$$d\sigma = a(1 + \lambda \cos^2 \varphi) d\varphi / 2\pi,$$

где φ — азимутальный угол положения плоскости разлета вторичного фотона и электрона отдачи относительно плоскости, содержащей импульс начального фотона и его вектор поляризации.

Если пучок фотонов имеет степень линейной поляризации s , то выражение для сечения может быть представлено в виде:

$$d\sigma = a_s (1 + \lambda_s \cos^2 \varphi) d\varphi / 2\pi ,$$

где
$$a_s = a \left(1 + \frac{1}{2} \lambda (1 - s) \right) ,$$

$$\lambda_s = \frac{s\lambda}{1 + \frac{1}{2} \lambda (1 - s)} .$$

Для комптон-эффекта величины a и λ определяются следующими выражениями:

$$a = \frac{\pi r_0^2}{\chi} \left(\ln(1 + 2\chi) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 + 2\chi)^2} \right) ,$$

$$\lambda = -\frac{4}{\chi} \frac{\left(1 + \frac{1}{\chi} \right) \ln(1 + 2\chi) - 2}{\ln(1 + 2\chi) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 + 2\chi)^2}} ,$$

где $\chi = E/mc^2$.

В нерелятивистском и ультрарелятивистском предельных случаях имеем:

при $E \ll mc^2$ $a = 4\pi r_0^2$, $\lambda = -\frac{2}{3}$,

при $E \gg mc^2$ $a = \frac{\pi r_0^2}{\chi} \left(\ln 2\chi + \frac{1}{2} \right)$, $\lambda = -\frac{4}{\chi} \frac{\ln 2\chi - 2}{\ln 2\chi + \frac{1}{2}}$.

Отметим, что величина асимметрии λ падает с увеличением энергии.

Выполненные к настоящему времени измерения линейной поляризации солнечного рентгеновского и гамма-излучения носят крайне фрагментарный характер из-за значительных методических трудностей их осуществления, обусловленных небольшой величиной измеряемого эффекта и вклада приборных методических погрешностей. Первые спутниковые поляризационные

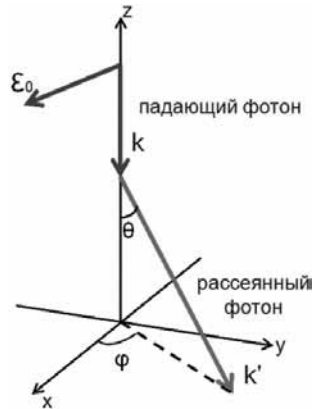


Рис. 4. Кинематика комптон-эффекта

измерения рентгеновского излучения вспышек были проведены сотрудниками ФИАН на спутниках серии «Интеркосмос» [Сомов, Тиндо, 1978]. Измеренные для нескольких вспышек величины поляризации лежали в области значений, допускаемых моделями, приведенными в работах [Leach, Petrosian, 1983; Боговалов, 1987] и, не смотря на большие погрешности, вероятно, свидетельствовали о сильной анизотропии быстрых электронов. Первоначально опубликованная величина средней поляризации для трех слабых вспышек в октябре–ноябре 1970 г. составила 40 ± 20 % [Tindo et al., 1970]. Затем она была скорректирована до 20 %. В эксперименте на КА «Интеркосмос-11» измеренная величина для двух вспышек составила несколько процентов при энергии в районе 15 кэВ [Tindo et al., 1976].

В 1990-х гг. поляризационные спутниковые эксперименты не выполнялись. Они возобновились с 2000-х гг. на спутниках «КОРОНАС-Ф» (поляриметр СПР-Н) [Житник и др., 2009], RHESSI [McConnell et al., 2002] и «КОРОНАС-Фотон» (поляриметр «Пингвин-М») [Дергачев и др., 2009]. По данным RHESSI в двух вспышках для диапазона 0,2...1 МэВ получены значения степени поляризации $0,21 \pm 0,09$ (23.07.2002) и $-0,11 \pm 0,05$ (28.10.2003) [Boggs et al., 2006]

За четырехлетний период эксперимента прибором СПР-Н зарегистрировано 128 солнечных вспышек, в 25 из которых число отсчетов было достаточно для поиска азимутальной асимметрии рассеяния, вызванной линейной поляризацией. Для события 29.10.2003 были получены значения поляризации в зависимости от энергии фотонов: более 70 % для каналов 40...60 кэВ и 60...100 кэВ, около 50 % в канале 20...40 кэВ [Житник и др., 2009]. Принимая во внимание близость вспышки к центру диска Солнца (S15W02) указанные величины не могут быть согласованы с теоретическими ожиданиями, сделанными в предположении, что арка не имеет аномально большого наклона к поверхности Солнца. Для остальных вспышек по данным СПР-Н установлены лишь верхние пределы доли поляризованного излучения на уровне от 8 до 40 %.

Анализ жесткого излучения, зарегистрированного прибором «Пингвин-М» на борту «КОРОНАС-Фотон» во вспышке 26 октября 2009 г. за время с 22:49:31 по 22:50:17 UT, позволил заключить, что степень поляризации излучения в указанный период составляла ~ 20 % [Котов, 2010]. Сравнение эффективных площадей трех указанных приборов представлено на рис. 5.

В приборе «Пингвин-М» вместо традиционного пассивного рассеивателя из бериллия использовалось четыре органических сцинтиллятора, сигналы от которого включались на совпадения

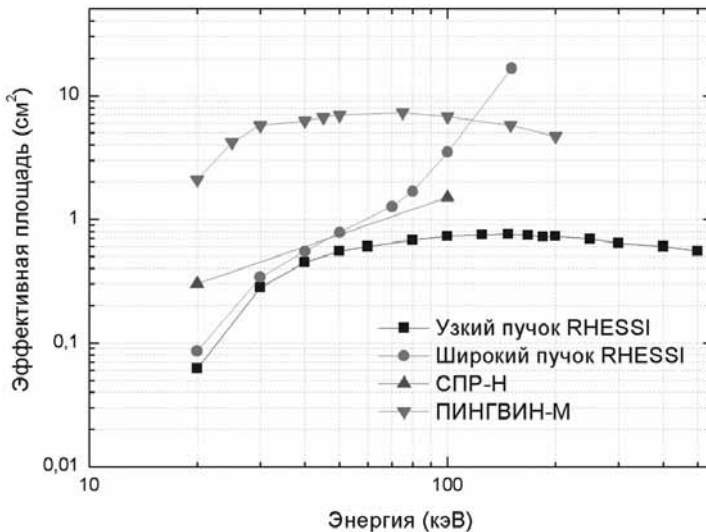


Рис. 5. Зависимость эффективной площади поляриметров от энергии падающего излучения

с сигналами от детекторов рассеянного излучения (поглотителей), что резко снижало вклад фона. Характеристики всех детекторов были охвачены системой автоматической стабилизации и, кроме того, в полете регулярно калибровались встроенным в прибор p/a -источником.

Результаты выполненных к настоящему времени измерений поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца сведены в таблицу. Отметим, что все данные, кроме «Пингвин-М»/«КОРОНАС-Фотон», относятся к мощным вспышкам класса X по классификации GOES.

Принцип построения поляриметра «Пинг-П»/«Интергелиозонд» рентгеновского излучения солнечных вспышек показан на рис. 6.

Как и в поляриметре «Пингвин-М»/«КОРОНАС-Фотон», использован активный детектор-рассеиватель (ДР) на основе быстрого органического сцинтиллятора (три идентичных детектора), окруженный шестью идентичными детекторами — поглотителями (ДП) рассеянных фотонов, построенными на основе неорганических сцинтилляторов NaI(Tl). Размеры рассеивателей 30 мм высотой и 30 мм в диаметре, размеры поглотителей $\varnothing 40 \times 40$ мм. Нижняя граница энергии регистрируемых фотонов определяется порогом T_{\min} регистрации электронов отдачи в рассеивателе.

*Обзор экспериментальных данных по линейной поляризации
рентгеновского излучения солнечных вспышек*

Дата Спутник	Степень по- ляризации, %	Энер- гия, кэВ	Балл	Область вспышки Угол наблюдения	Теоретические модели углового распределения электронов солнечной вспышки
23.07.2002 RHESSI	21±9 (18±3)	20...40	X4.8	S13E72 $\Theta = 72^\circ$	1. Движение пучка электронов по спира- ли вдоль линий однородного магнитного поля; пичч-угол $\mu = 45^\circ$. Показатель спектра электронов $\delta = 4$; $E = 16...50$ кэВ. 2. Диффузная инжекция коллимированного пучка электронов в арке с однородным полем вдоль ее длины; $\delta = 5$, $E = 16...50$ КэВ. 3. Падение мононаправленного пучка электро- нов на границу хромосферы; $\delta = 3, 5...4$; $E = 20$ кэВ
28.10.2003 «КОРОНАС-Ф»	<25 (11±5)	20...100	X17	S18E20 $\Theta = 26^\circ$	1. Движение пучка электронов по спирали вдоль линий однородного магнитного поля; пичч-угол $\mu = 30^\circ$; $\delta = 4$; $E < 20$ кэВ. 2. Изотропное ускорение электронов в арке с сильной неоднородностью магнитного поля; $\delta = 5$; $E = 16$ кэВ. 3. Падение мононаправленного пучка электро- нов; $\delta = 5...6$; $E = 20$ кэВ
29.10.2003 «КОРОНАС-Ф»	>70 (1 пик > 85) (2 пик > 75) 50	40...100 20...40	X10	S15E02 $\Theta = 15^\circ$	Нет модели

Дата Спутник	Степень поляризации, %	Энергия, кэВ	Балл	Область вспышки Угол наблюдения	Теоретические модели углового распределения электронов солнечной вспышки
4.11.2003 «КОРОНАС-Ф»	<40	20...100	X28	S19W83 $\Theta = 83^\circ$	1. Движение по спирали в однородном магнитном поле; $\mu = 0^\circ$; $\delta = 2$; $E = 22$ кэВ. 2. Падение мононаправленного пучка электронов; $\delta = 4...5$; $E = 20$ кэВ
20.01.2005 RHESI «КОРОНАС-Ф»	21 ± 10 <17	20...100	X7.1	N16W61 $\Theta = 62^\circ$	1. Движение пучка электронов вдоль линий однородного магнитного поля; $\mu = 0^\circ$; $\delta = 4$. 2. Диффузная инжекция коллимированного пучка электронов в арке с однородным полем вдоль ее длины; $\delta = 5$. 3. Падение мононаправленного пучка электронов; $\delta = 3,5...4$; $E = 20$ кэВ
26.10.2009 «КОРОНАС-Фотон»	~20	20...160	C1.3	N12W33 $\Theta = 35^\circ$	1. Движение пучка электронов вдоль линий однородного магнитного поля; $\mu = 0^\circ$; $\delta = 2$; $E = 22$ кэВ. 2. Движение пучка электронов вдоль линий однородного магнитного поля; $\mu = 30^\circ$; $\delta = 4$; $E = 50$ кэВ. 2. Диффузная инжекция коллимированного пучка электронов в арке с однородным полем вдоль ее длины; $\delta = 5$; $E = 16...100$ кэВ. 3. Падение мононаправленного пучка электронов на границу хромосферы; $\delta = 3,5...4$; $E = 20$ кэВ

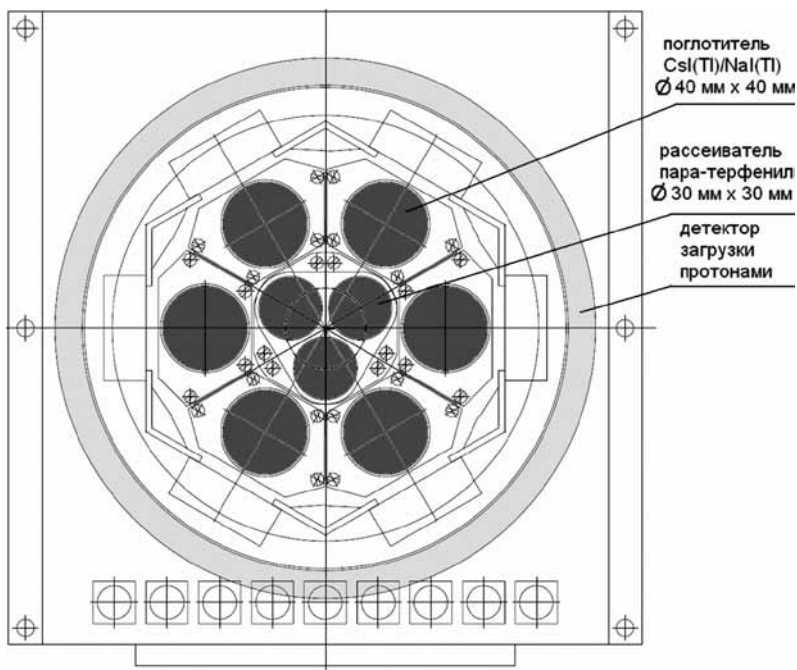


Рис. 6. Принцип построения поляриметра «Пинг-П» / «Интергелиозонд»

Для минимально реализуемой величины порога $T_{\min} = 0,6$ кэВ энергия фотона составляет $E_{\gamma} = 18$ кэВ (для азимутального угла рассеяния $\theta = \pi/2$).

Максимальная асимметрия, составляющая при 100% поляризации и при $\hbar\omega \ll mc^2$ $d\zeta = A(1 - 0,667\cos^2(\varphi - \varphi_0))d\varphi$, уменьшается из-за отличия степени поляризации от 100%, конструктивной асимметрии прибора, расхождения параметров детекторов в полете. В частности, при различии в энергетической шкале детекторов-поглотителей на 10% возникает «кажущаяся» поляризация со степенью $\sim 17\%$. Для обеспечения требуемой эквивалентности и стабильности детекторов в полете планируется непрерывно осуществлять стабилизацию сцинтилляционных детекторов по сигналу от светодиодов. Будет также проводиться калибровка путем регулярного набора энергетических спектров от p/a -источника ^{129}I , имеющего $T_{1/2} = 1,57 \cdot 10^7$ лет (β -распад) и наиболее интенсивные рентгеновские линии:

$$\begin{array}{ll} E_{\gamma} = 29,461 \text{ (20 \%)} & E_{\gamma} = 33,562 \text{ (3,46 \%)} \\ E_{\gamma} = 29,782 \text{ (38 \%)} & E_{\gamma} = 33,624 \text{ (6,69 \%)} \end{array}$$

На основе калибровочных спектров по командам осуществляется регулярная (раз в неделю) подстройка в полете системы стабилизации для компенсации деградации фотодиодов

Выводимые на телеметрию данные разбиваются на четыре группы.

Научные (основные):

- поляризационные матрицы двойных совпадений сигналов рассеивателя и поглотителя;

- спектры одиночных импульсов прямого излучения ДР

Вспомогательные:

- калибровочные спектры РИ ДР;

- калибровочные спектры РИ ДП;

- спектры светодиодов системы стабилизации;

- данные интенсивметров.

Научные и вспомогательные данные при выводе логарифмируются из исходного 24-разрядного кода. Погрешность логарифмирования при этом не превышает 0,1 %.

Технические и контрольные данные выводятся словами размером 2 байта.

Поляриметр ПИНГ-П в качестве детекторного блока наряду с блоком спектрометрических измерений ПИНГ-ПИРС входит в состав прибора ПИНГ-М Информативность блока ПИНГ-П составляет 10 МБ/сут. Масса блока ПИНГ-П — 10 кг, потребляемая мощность 11 Вт, размер 300×300×450 мм. Информационные характеристики прибора ПИНГ-М даны в статье настоящего сборника [Глянченко А.С. и др. Прецизионная спектрометрия мягкого и жесткого рентгеновского излучения Солнца прибором ПИНГ-М в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД], где описано также взаимодействие блока ПИНГ-П со служебными системами спутника.

ЛИТЕРАТУРА

- [Боговалов, 1987] Боговалов С.В., Кельнер С.Р., Котов Ю.Д. // Астрон. журн. 1987. Т. 64. С. 1280–1290.
- [Боговалов и др., 1985] Боговалов С.В., Котов Ю.Д., Зенченко В.М. и др. // Письма в Астрон. журн. 1985. Т. 11. № 10. С. 763–768.
- [Боговалов и др., 1988а] Боговалов С.В. и др. // Письма в Астрон. журн. 1988. Т. 65. С. 147.
- [Боговалов и др., 1988б] Боговалов С.В., Кельнер С.Р., Котов Ю.Д. // Астрон. журн. 1988. Т. 65. С. 1275–1282.
- [Боговалов и др., 1997] Боговалов С.В., Котов Ю.Д., Устинов П.Л. // Письма в Астрон. журн. 1997. Т. 23. С. 300.

- [Дергачев и др., 2009] *Дергачев В.А., Матвеев Г.А., Круглов Е.М.* и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 437–438.
- [Житник и др., 2009] *Житник И.А.* и др. // Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф / Под ред. В.Д. Кузнецова, М: Физматлит, 2009. С. 128–150.
- [Корчак, 1967] *Корчак А.А.* // Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. С. 291.
- [Котов, 2010] *Котов Ю.Д.* // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 6. С. 647–661.
- [Сомов, Тиндо, 1978] *Сомов Б.В., Тиндо И.П.* // Космич. исслед. 1978. Т. 16. С. 686–697.
- [Boggs et al., 2006] *Boggs S.E., Coburn W., Kalemci E.* Gamma-Ray Polarimetry of Two X-Class Solar Flares // *Astrophysical J.* 2006. V. 638. P. 1129–1139.
- [Langer, Petrosian, 1977] *Langer S.H., Petrosian V.* Impulsive solar X-ray bursts. III — Polarization, directivity, and spectrum of the reflected and total bremsstrahlung radiation from a beam of electrons directed toward the photosphere // *Astrophysical J.* 1977. V. 215. P. 666–676.
- [Leach, Petrosian, 1983] *Leach J., Petrosian V.* The impulsive phase of solar flares. II - Characteristics of the hard X-rays // *Astrophysical J.* 1983. V. 269. P. 715–727.
- [McConnell et al., 2002] *McConnell M.L.* et al. Rhesi as a hard X-ray polarimeter // *Solar Physics.* 2002. V. 210. P. 125–142.
- [Tindo et al., 1970] *Tindo I.P.* et al. Polarization of the emission of X-ray solar flares // *Solar Physics.* 1970. V. 14. P. 204–207.
- [Tindo et al., 1976] *Tindo I.P., Shuryghin A.I., Steffen W.* The polarization of X-ray emission of some solar flares in July 1974 // *Solar Physics.* 1976. V. 46. P. 219–227.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С ВЫСОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СИГНАЛ

**С. Е. Улин, А. М. Гальпер, В. В. Дмитренко, З. М. Утешев,
К. Ф. Власик, В. М. Грачев, А. С. Новиков, И. В. Архангельская,
К. В. Кривова**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ), Россия, 123456, Москва, Каширское ш., 31*

Сформулированы основные цели и задачи эксперимента СИГНАЛ. Дано описание спектрометра, разработанного на основе ксенонового γ -детектора, и приведены его основные физико-технические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Физические процессы, происходящие на Солнце, обнаружены и на других звездах: осцилляции, пятна, вспышки, глубокие и длительные минимумы активности и т. д. Близость Солнца позволяет исследовать их наиболее детально, что обеспечивает возможность проверки моделей эволюции звезд, основополагающих проблем магнитогидродинамики: физики плазмы, ядерной физики, а также физики элементарных частиц. В результате комплексного изучения солнечных вспышек с использованием спутниковых, баллонных, наземных и подземных экспериментов достигнут значительный прогресс в понимании вспышечных явлений. Тем не менее, остается много нерешенных вопросов, в частности: проблемы накопления вспышечной энергии, процессы ускорения и генерации различных частиц и т. д. Кроме того, физические процессы на Солнце существенно влияют на климат и биосферу Земли, состояние магнитного поля в околоземном космическом пространстве. Соответственно, их исследование имеет особое не только научное, но и научно-прикладное значение.

На космическом аппарате (КА) «Интергелиозонд» будут установлены приборы для изучения Солнца в широком диапазоне электромагнитного спектра (от ультрафиолета до жесткого γ -излучения), а также потоков нейтральных и заряженных частиц. Движение КА будет осуществляться по спиральной траектории, что обеспечит постепенное приближение его к Солнцу на расстояние $\sim 60...70$ радиусов Солнца. При этом предполагается, что плоскость траектории «Интергелиозонда» выйдет за пределы эклиптики на $20...30^\circ$. Изменение траектории будет осущест-

вляться за счет собственной двигательной установки и гравитационного взаимодействия с Венерой на участке сближения с ней.

В работе сформулированы основные цели и задачи эксперимента СИГНАЛ, который планируется на КА «Интергелиозонд», дано описание конструкции ксенонового γ -спектрометра (КГС) и приведены его основные физико-технические характеристики.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА СИГНАЛ

Исследование γ -излучения, образующегося во время солнечных вспышек, крайне важно для понимания ядерных процессов в атмосфере Солнца, а также предсказания результатов воздействия солнечной активности на Землю и околоземное космическое пространство. Кроме того, существенный вклад в понимание свойств процессов ускорения частиц может дать изучение γ -всплесков и нестационарных потоков рентгеновского и γ -излучения от различных космических объектов.

Особенности траектории КА «Интергелиозонд» и возможности, предоставляемые ксеноновым γ -спектрометром (КГС) на борту этого КА, определяют цели и научные задачи эксперимента СИГНАЛ:

- исследование линейчатого излучения и континуума в диапазоне энергий 30 кэВ — 5 МэВ, возникающего во время солнечных вспышек;
- изучение γ -всплесков (GRB) галактического и метagalактического происхождения;
- изучение нестационарных потоков рентгеновского и γ -излучения от различных космических объектов;
- анализ линейчатого γ -излучения вблизи планет Земля и Венера;
- регистрация потоков заряженных частиц вдоль траектории КА.

1.1. Исследование рентгеновского и γ -излучения, возникающего во время солнечных вспышек

Рентгеновское и γ -излучение (линейчатое и континуум), которые образуются в процессах взаимодействия ускоренных в солнечных вспышках частиц с окружающим веществом, — источник уникальной информации о различных процессах, происходящих в атмосфере Солнца. Далее перечислены основные задачи и ожидаемые результаты эксперимента, для которых наиболее эффективно использование КГС.

- Определение количественного соотношения ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$ и потоков ускоренных α -частиц в атмосфере Солнца. Интенсивность γ -линий с $E = 0,431$ МэВ и $E = 0,478$ МэВ зависит от величины потоков α -частиц и количественного содержания ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$, которые образуются в ядерных реакциях ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$, ${}^4\text{He}(\alpha, p){}^7\text{Li}^*$.

- Изучение углового распределения ускоренных α -частиц в солнечных вспышках. Форма γ -линий 0,431 МэВ и 0,478 МэВ зависит от направления скорости генерируемых α -частиц. При анизотропном угловом распределении указанные линии хорошо разделяются, что позволяет оценить степень угловой анизотропии движения этих α -частиц.

- Измерение интенсивности отдельных γ -линий позволяет определить в солнечной атмосфере количественный состав различных ядер: ${}^{56}\text{Fe}$ (0,84 и 1,24 МэВ), ${}^{24}\text{Mg}$ (1,37 МэВ), ${}^{20}\text{Ne}$ (1,63 МэВ), ${}^{28}\text{Si}$ (1,78 МэВ), ${}^{12}\text{C}$ (1,99 и 4,43 МэВ), ${}^{14}\text{N}$ (2,31 МэВ).

- Изучение процессов синтеза легких элементов на Солнце по измерению интенсивности γ -линии 2,22 МэВ, которая излучается при захвате тепловых нейтронов протонами, либо ${}^3\text{He}$ с генерацией дейтерия и трития соответственно. Ее интенсивность содержит уникальную информацию о концентрации ${}^3\text{He}$, позволяющую «заглянуть» в подфотосферную область Солнца

- Исследование характеристик послевспышечной плазмы в солнечной атмосфере путем изучения интенсивности γ -линии 0,511 МэВ, возникающей при аннигиляции позитронов, испускаемых при распаде образованных в ядерных реакциях π^+ и изотопов ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{N}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{14}\text{O}$, ${}^{19}\text{Ne}$ и т. д. Время задержки генерации аннигиляционных γ -квантов определяется периодом полураспада радиоактивных ядер и временем замедления позитронов. В начальной фазе ускорения частиц преобладающую роль играет распад π^+ -мезонов и короткоживущих ядер ${}^{14}\text{O}$, ${}^{15}\text{O}$. Ядра ${}^{11}\text{C}$ — источники позитронов в более поздней фазе, когда прекращаются ядерные реакции, т. е. соответствующие позитроны содержат информацию о полевспышечной плазме.

- Измерение температуры солнечной атмосферы по ширине γ -линии 0,511 кэВ, которая зависит от температуры как $T^{1/2}$. В частности, при ширине этой линии 3,5 кэВ температура атмосферы Солнца должна быть $T < 10^5$ К. С увеличением температуры ширина линии растет до 11 кэВ при 10^6 К и 20 кэВ при $3 \cdot 10^6$ К. С помощью научной аппаратуры (НА) эксперимента СИГНАЛ можно надежно измерить ширину аннигиляционной γ -линии начиная с 30 кэВ, что позволяет измерять температуру солнечной атмосферы в широком диапазоне.

- Исследование динамики ядерных процессов в атмосфере Солнца, по результатам измерения временных зависимостей интенсивности отдельных γ -линий в солнечных вспышках, позволит проследить динамику развития процессов образования вспыхивающего γ -излучения и даст дополнительную информацию для построения теоретических моделей ядерных процессов, протекающих в атмосфере Солнца.

- Изучение процессов ускорения частиц во время вспышек путем измерения их временных профилей и соотношения интенсивности в различных диапазонах (в частности, эффекта Ньюперта — подобие поведения временного профиля интенсивности потока жесткого рентгеновского излучения и поведения производной временного профиля интенсивности потока излучения в мягком рентгеновском диапазоне связано с процессами генерации излучения в солнечных вспышках, а отсутствие такого подобия позволяет сделать вывод о значительном вкладе нетепловой компоненты).

- Изучение формы спектра и временного профиля линии 2,2 МэВ позволит сделать выводы о показателях спектров ускоренных во вспышке частиц.

- Измерение концентрации ^3He и ее изменение во времени путем изучения интенсивности линий спектрального комплекса, образующегося в прямой реакции с ^3He (0,937; 1,04 и 1,08 МэВ).

- Изучение возможных рентгеновских предшественников солнечных вспышек. КА «Интергелиозонд» будет находиться на достаточно близкой от светила околосолнечной орбите, что обеспечит регистрацию более слабых вариаций рентгеновского излучения, чем вблизи околоземной орбиты, и изучение предшествующих вспышкам процессов.

- Изучение слабых вспышек классов В и С, от которых наблюдается жесткое γ -излучение. Широкий энергетический диапазон и хорошее энергетическое разрешение КГС даст возможность детально изучить форму континуума спектра и определить диапазон, в котором начинает превалировать нетепловая компонента. Это позволит изучить механизмы генерации жесткого излучения в слабых событиях.

- Прогноз космической «погоды». Солнечные вспышки — предвестники изменения радиационной обстановки в космическом пространстве. Исследование спектрометрических характеристик и закономерностей, определяющих класс солнечных вспышек, время прихода плазмы в различные области космического пространства — одна из важнейших задач прогноза космической «погоды», позволяющего заблаговременно выполнить необходимые мероприятия для обеспечения безопасности экипажей на космических станциях.

1.2. Измерение γ -излучения несолнечного происхождения

КА «Интергелиозонд», двигаясь по спиральной траектории, большую часть времени будет находиться в межпланетном пространстве. Это даст возможность детально исследовать пространственное и временное распределения потоков космических γ -квантов, которые образуются не только в атмосфере Солнца, но и за пределами Солнечной системы. Основные задачи исследования потоков γ -излучения несолнечного происхождения:

- измерение потоков и спектров γ -излучения в межпланетном космическом пространстве на различных расстояниях от Солнца, исследование временных изменений и флуктуаций фоновых потоков γ -излучения вдоль орбиты КА «Интергелиозонд» с целью определения величины галактических потоков γ -излучения, прояснения общей радиационной обстановки в различных областях межпланетного пространства и определения фона γ -излучения, который необходимо учитывать при регистрации γ -вспышек от далеких космических объектов;

- регистрация космических γ -всплесков (GRB), изучение их энергетических спектров, изучение временных профилей и общей динамики их развития; эта информация позволит анализировать процессы ускорения и взаимодействия частиц, происходящие во время всплеска и уточнять модели этих явлений;

- регистрация спектров и временных профилей нестационарного рентгеновского и γ -излучения от различных космических объектов (например, пульсаров) для анализа происходящих в таких источниках процессов ускорения и взаимодействия частиц, а также исследования неустойчивости характеристик этих объектов.

1.3. Измерение рентгеновского и γ -излучения вблизи планет Земля и Венера

На начальном этапе движения КА «Интергелиозонд» будет находиться на околоземной орбите, что обеспечит проведение измерений потоков γ -излучения в ближайшем космическом пространстве Земли. Приближаясь к Солнцу по спиральной траектории, КА будет периодически пролетать вблизи планеты Венера. Это даст возможность измерить потоки и спектры γ -излучения, исходящего от ее поверхности. Далее перечислены основные научные задачи исследования γ -излучения в околоземном пространстве и вблизи планеты Венера с помощью НА:

- исследование γ -излучения вблизи планет (Земля, Венера), регистрация γ -излучения в ближайшем космическом про-

странстве, определение фоновой и радиационной обстановки по результатам измерения спектрального состава γ -излучения, исследование пространственного и временного распределения γ -излучения вблизи планет;

- изучение характеристик рентгеновских и γ -вспышек в верхних слоях атмосферы Земли и Венеры, вызванных грозowymi явлениями, что даст новую информацию о процессах ускорения заряженных частиц и генерации высокоэнергичных γ -квантов.

1.4. Измерение потоков заряженных частиц в околосолнечном и межпланетном пространстве

Наличие сцинтилляционных антисовпадательных счетчиков в составе аппаратуры «Сигнал» обеспечит измерение потоков заряженных и нейтральных частиц вдоль траектории КА «Интергелиозонд».

В околосолнечном пространстве измерение заряженной компоненты космических лучей имеет большое значение для анализа движения солнечного ветра, важного для прогнозирования «космической погоды». В околопланетном пространстве прибор «Сигнал» позволит исследовать распределение потоков заряженных частиц вблизи Земли и Венеры, исследовать структуру их радиационных поясов (если они имеются) и процессы высыпания заряженных частиц из радиационных поясов при воздействии на них потоков солнечной плазмы, которые образуются при активных процессах на Солнце.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Научная аппаратура «Сигнал» состоит из одного блока, внешний вид которого показан на рис. 1а. На рис. 1б приведена схема ксенонового γ -детектора (КГД) прибора, в основе которого — цилиндрическая ионизационная камера, наполненная сжатым ксеноном и работающая в импульсном режиме [Vlasik et al., 1998, 2004; Elokhin et al., 2007; Ulin et al., 2004], и сцинтилляционные детекторы (СД), со всех сторон окружающие КГД и обеспечивающие антисовпадательную защиту от заряженной компоненты космического излучения. В нижней части аппаратуры расположены блоки источников высоковольтного питания для КГД и СД. Снаружи КГД закрыт герметичным кожухом, имеющим форму параллелепипеда. БЭ, расположенный также в нижней части блока состоит из нескольких электронных плат, на которых установлены

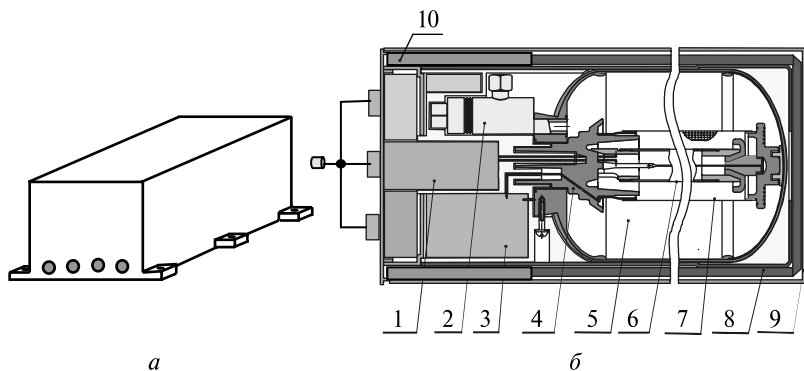


Рис. 1. НА «Сигнал» и схема ксенонового γ -детектора:

1 — зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ); 2 — вентиль; 3 — блок высоковольтного питания; 4 — керамический гермоввод; 5 — цилиндрическая ионизационная камера; 6 — анод; 7 — экранирующая сетка; 8 — антисовпадательная сцинтилляционная защита (АС); 9 — защитный корпус; 10 — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

преобразователи и стабилизаторы рабочих напряжений, микропроцессоры, амплитудно-цифровые преобразователи, элементы цифровой электроники, осуществляющие накопление и обработку информации, поступающей с детекторов, а также обеспечивающих управление работой всей НА и ее связь с бортовой телеметрией. На торцевой стенке контейнера установлено четыре разъема для соединения со служебными системами КА.

В НА «Сигнал» предусмотрена собственная система контроля и стабилизации температуры, которая обеспечивает необходимые температурные режимы. Она состоит из трех термодатчиков, нагревательного элемента и электронного блока управления.

Научная аппаратура устанавливается на одной из боковых граней платформы космического аппарата и закрывается общим экраном от прямого воздействия солнечной радиации. При этом в поле зрения КГД (угол обзора составляет 180°) практически не попадают конструкционные элементы КА и другой научной аппаратуры.

Основные физико-технические характеристики НА «Сигнал»

Эффективность регистрации для пика полного поглощения в зависимости от энергии γ -квантов, полученная с помощью лабораторного прототипа КГД с чувствительным объемом два литра, показана на рис. 2.

Планируется, что эффективность регистрации γ -квантов будет, в зависимости от энергии γ -квантов, повышена на 20...50 % за счет увеличения чувствительного объема и уменьшения толщины корпуса ионизационной камеры.

Зависимость энергетического разрешения от энергии регистрируемых γ -квантов, полученная для прототипа КГД, приведена на рис. 3. Типичные γ -спектры, измеренные КГД от источников ^{137}Cs и ^{133}Ba показаны на рис. 4 и 5. Основные физико-технические характеристики прототипа КГД приведены ниже.

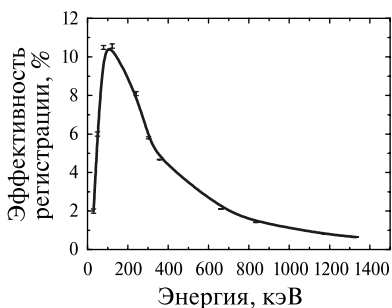


Рис. 2. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов от их энергии

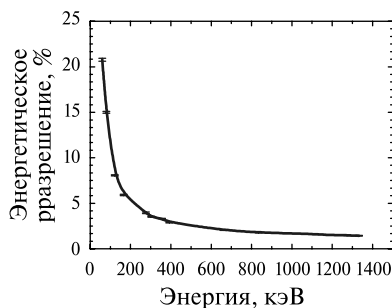


Рис. 3. Зависимость энергетического разрешения КГД от энергии γ -квантов

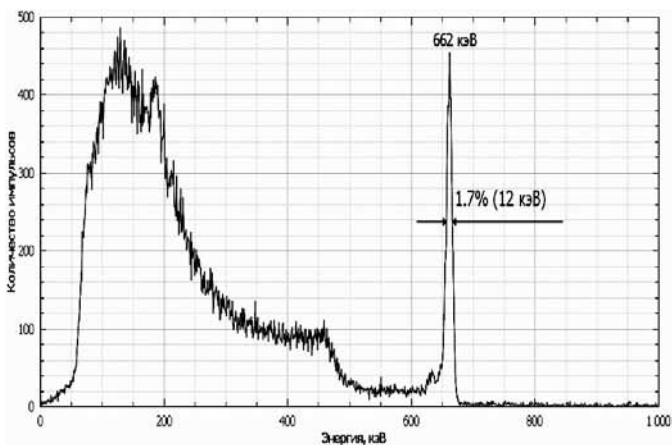


Рис. 4. Гамма-спектр γ -источника ^{137}Cs , измеренный прототипом КГД

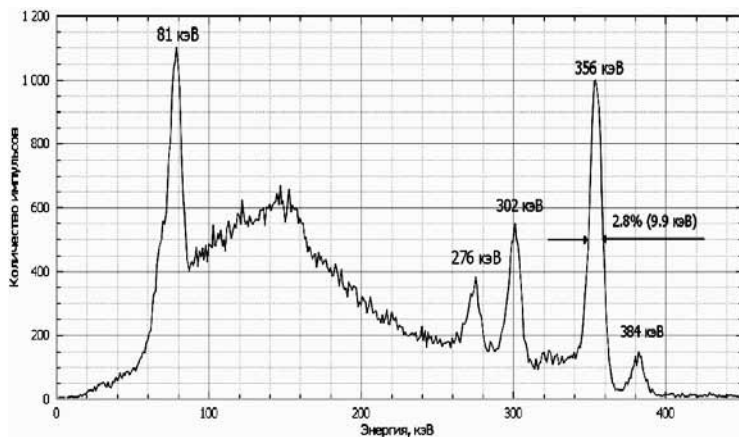


Рис. 5. Гамма-спектр γ -источника ^{133}Ba , измеренный прототипом КГД

Основные физико-технические характеристики КГД

Энергетический диапазон регистрируемых γ -квантов	. . . 0,03...5 МэВ
Энергетическое разрешение на γ -линии 662 кэВ	. . . . . 1,7 \pm 0,2 %
Плотность рабочего вещества (ксенона)	. . . . . 0,3...0,4 г/см ³
Чувствительный объем	. . . . . 2200 см ³
Масса	. . . . . 2,5 \pm 0,2 кг
Габариты	. . . . . 160 \times 160 \times 500 мм
Напряжение питания	. . . . . 24...27 В
Потребляемая мощность	. . . . . \leq15 Вт
Рабочий температурный диапазон	. . . . . 5...100 $^{\circ}\text{C}$
Гарантийный срок годности аппаратуры	. . . . . \geq10 лет
Ресурс работы	. . . . . \geq5000 ч

Планируется, что НА «Сигнал» будет работать непрерывно в двух режимах. Первый (ждущий режим) предусматривает набор γ -спектров в течение каждой секунды на протяжении одной минуты. Эти спектры будут анализироваться на предмет обнаружения γ -вспышек. Если γ -вспышка не обнаружена, то данные суммируются в единый спектр, который вместе со вспомогательной информацией записывается в промежуточную память для подготовки к передаче на Землю.

Второй режим (регистрации γ -вспышек) предусматривает также набор γ -спектров в течение одной секунды и предназначен для работы во время солнечных вспышек или космических γ -всплесков. Переход от первого режима ко второму будет осуществляться автоматически на основании анализа загрузки КГС.

Информация от антисовпадательных детекторов заряженных частиц будет анализироваться каждую секунду и в зависимости от установленного режима работы НА либо суммироваться в течение одной минуты либо запоминаться каждую секунду.

Планируется, что НА будет включена после вывода КА на околоземную орбиту и завершения всех операций по проверке функционирования его систем. Далее аппаратура должна работать практически непрерывно в течение всего полета КА. Исключением станут периоды динамических операций КА с использованием двигательной установки. В этом случае НА предварительно выключается на время проведения этих операций и включается после их завершения.

В штатном режиме работы для записи информации требуется около 20 МБ/сут при условии, что передача информации осуществляется один раз в сутки. Для управления экспериментом СИГНАЛ предполагается использование 10 радиокоманд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время разработка НА «Сигнал» находится на стадии эскизного проектирования. В качестве исходной информации для создания штатной аппаратуры будут использоваться результаты исследований лабораторных прототипов ксеноновых γ -спектрометров, которые были созданы в радиационной лаборатории Института космофизики НИЯУ МИФИ. Изготовленные в последние годы образцы обладают высоким энергетическим разрешением и высокой виброакустической стойкостью, что связано с использованием цифровой обработки сигналов, поступающих с ксенонового γ -детектора. Планируется также применить в конструкции различные композитные материалы, в результате чего масса КГД уменьшится примерно в три раза. При этом общая масса всей аппаратуры не превысит 10 кг [Ulin et al., 2010].

ЛИТЕРАТУРА

- [Elokhin et al., 2007] *Elokhin A. P., Safonko V. A., Ulin S. E., Dmitrenko V. V., Pchelintsev A. V., Parkhoma P. A.* The Use of Unmanned Dose of the Complex to Determine the Concentration Pa-Radionuclides in the Atmosphere in Terms of Radiation Accidents // Nuclear Measurement and Information Technologies. 2007. N. 3 (23). P. 42–59.
- [Ulin et al., 2004] *Ulin S. E., Dmitrenko V. V., Grachev V. M., Uteshev Z. M., Vlasik K. F., Chernysheva I. V., Dukhvalov A. G., Kotler F. G., Pushkin K. N.*

Gamma Detectors Based on High Pressure Xenon: their Development and Application // *Hard X-Ray and Gamma-Ray Detectors Physics VI. Proc. SPIE 5540*. 2004. P. 248–256.

- [Ulin et al., 2010] *Ulin S. E., Dmitrenko V. V., Grachev V. M., Vlasik K. F., Uteshev Z. M., Novikov A. S.* Prospects of Xenon Gamma-Ray Spectrometers for Environmental Monitoring // *Eco-logical systems and devices*. 2010. N. 7. P. 3–10.
- [Vlasik et al., 1998] *Vlasik K. F., Grachev V. M., Dmitrenko V. V., Ulin S. E., Uteshev Z. M., Yurkin Y. T.* The Effect of the Flow of Protons and Neutrons in the Spectrometric Characteristics of the Spectrometer on the Compression that Xenon // *Instruments and Experimental Techniques*. 1998. N. 3. P. 19–24.
- [Vlasik et al., 2004] *Vlasik K. F., Grachev V. M., Dmitrenko V. V., Druzhinina T. S., Kotler F. G., Ulin S. E., Uteshev Z. M., Muravyev-Smirnov S. S.* The Automated System Based on Xenon Gamma-Spectrometers for Monitoring of Gaseous Radioactive Emissions of a Nuclear Reactor // *Nuclear Measuring and Information Technology*. 2004. N. 2 (10). P. 45–53.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК
И КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ГЕЛИКОН-И ПРОЕКТА
ИНТЕРГЕЛИОЗОНД**

**М. В. Уланов, Р. Л. Аптекарь, С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец,
Ф. П. Олейник, В. Д. Пальшин, Д. С. Свинкин, З. Я. Соколова,
Д. Д. Фредерикс**

*Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ), 194021, Санкт-Петербург,
Политехническая, 26*

Научная аппаратура (НА) «Геликон-И» комплекса научной аппаратуры проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД предназначена для исследования с высоким временным разрешением кривых блеска, энергетических спектров и быстрой спектральной переменности вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца и космических гамма-всплесков в широком энергетическом интервале 10 кэВ – 15 МэВ. Рассматриваются основные характеристики аппаратуры и требования к космическому аппарату и его бортовым системам, необходимые для обеспечения проведения эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД комплексные исследования природы и глобальной динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности — солнечных вспышек — играют важную роль. Детальные наблюдения с высоким временным разрешением кривых блеска, энергетических спектров и спектральной переменности вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца в широкой области энергий 10 кэВ – 15 МэВ несут сведения об основных, существенных процессах трансформации электромагнитной энергии в ходе вспышек. Лаборатория экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе имеет многолетний опыт успешного исследования космического гамма-излучения в широкой области энергий 10 кэВ – 15 МэВ, в том числе гамма-излучения солнечных вспышек. Большой объем наблюдательных данных о вспышках жесткого рентгеновского излучения Солнца накоплен в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД, который продолжается непрерывно на протяжении более 17 лет в оптимальных условиях межпланетного пространства со

стационарным радиационным фоном и при отсутствии помех от радиационных поясов и затенения Землей.

В эксперименте ГЕЛИКОН на солнечной космической обсерватории «КОРОНАС-Ф» (2001–2005) на протяжении 4,5 лет непрерывных наблюдений были получены обширные данные о проявлениях вспышечной активности Солнца в области жесткого рентгеновского и гамма-излучения [Ораевский, Собельман, 2002; Мазец и др., 2009]. Зарегистрировано более 200 солнечных вспышек в триггерном режиме и более 500 событий в фоновом режиме. Получен также уникальный результат в исследовании мягких гамма-репитеров — впервые в мировой практике наблюдений космического гамма-излучения было зарегистрировано излучение начального импульса гигантского всплеска репитера SGR1806-20, отраженного от поверхности Луны [Фредерикс и др., 2007]. Это позволило впервые надежно восстановить временной профиль и определить энергетику гигантского импульса гамма-репитера, экстремальная интенсивность которого «ослепляет» спектрометрические гамма-детекторы при прямом облучении.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА ГЕЛИКОН-И

Научные задачи эксперимента ГЕЛИКОН-И связаны с комплексным изучением природы и глобальной динамики солнечных вспышек и включают в себя:

- исследования временных профилей и энергетических спектров жесткого рентгеновского и гамма-излучения Солнца в широкой области энергий 10 кэВ — 15 МэВ для задач комплексных геофизических исследований в ближайшей окрестности Солнца;
- исследования с высоким разрешением временных профилей, энергетических спектров и быстрой спектральной переменности излучения космических гамма-всплесков в широкой области энергий 10 кэВ — 15 МэВ для задач исследования их природы и механизма генерации экстремальных потоков энергии в их источниках;
- синхронные наблюдения солнечных вспышек и гамма-всплесков идентичными детекторами, находящимися в разных точках космического пространства, для задач высокоточной локализации источников всплесков триангуляционным методом с большими базовыми расстояниями между детекторами и значительным повышением достоверности и надежности данных наблюдений о тонких деталях временных профилей и энергетических спектров всплесков и солнечных вспышек.

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ГЕЛИКОН-И

Научная аппаратура эксперимента ГЕЛИКОН-И представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, состоящий из детектора гамма-квантов и электронного блока для регистрации и предварительной обработки сигналов детектора. Детектор содержит высокотехнологичный спектрометрический сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещенный в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и выходным окном из свинцового стекла высокой прозрачности для защиты от фона космического аппарата в мягкой области спектра. Такой детектор обеспечивает низкий энергетический порог регистрации излучения от 10 кэВ, диапазон регистрации гамма-квантов до 15 МэВ с энергетическим разрешением 8,0...8,5 % на линии 660 кэВ ^{137}Cs и чувствительность обнаружения всплесков на уровне 10^{-7} эрг·см $^{-2}$. В аппаратуре имеется специальная система подавления всплесков, вызванных прохождением через детектор многозарядных ядер космических лучей. Такая система позволяет эффективно предотвращать заполнение емкости бортового запоминающего устройства бесполезной информацией и обеспечивает оптимальное использование квот запоминающего устройства в ходе выполнения летной программы эксперимента.

Программа измерений характеристик всплесков жесткого рентгеновского излучения Солнца и гамма-всплесков в эксперименте ГЕЛИКОН-И представляет собой развитие подходов и методов, использованных в эксперименте КОНУС-ВИНД, ГЕЛИКОН и КОНУС-РФ. Она характеризуется значительно большей информативностью благодаря использованию в аппаратуре современной элементной базы на основе сигнальных цифровых процессоров, прецизионных аналого-цифровых преобразователей с малым «мертвым» временем и микросхем оперативной памяти большой емкости. Предварительная программа работы аппаратуры представляется в следующем виде. В режиме «фон» в детекторе проводятся измерения интенсивности космического гамма-излучения в двенадцати энергетических интервалах в диапазоне энергий 10 кэВ – 1 МэВ с временем накопления 1 с и в десяти энергетических интервалах в диапазоне энергий 280 кэВ – 15 МэВ с временем накопления 4 с. Одновременно в режиме «фон» осуществляются детальные измерения спектров излучения в двух энергетических диапазонах 10 кэВ – 1 МэВ и 280 кэВ – 15 МэВ, которые разбиты на 112 и 154 квазилогарифмических канала соответственно. Время накопления спектров в режиме

«фон» — 1 мин. В режиме «всплеск» запись временных историй и спектров по программе «фон» не прерывается, но на интервале ~4 мин дублируется их записью с существенно более высоким временным разрешением: для временных историй — от 1 до 128 мс, для спектров — от 100 мс до 1 с. Используемое разрешение автоматически адаптируется к текущей интенсивности всплеска. Также фиксируется запись предыстории всплеска, выполненная с максимальным временным разрешением на интервале 3 с до команды «всплеск». Прорабатывается возможность записи информации об энергии каждого зарегистрированного фотона в режиме TTE (time-tagged events).

ХАРАКТЕРИСТИКИ НА «ГЕЛИКОН-И» И ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ УСТАНОВКЕ В СОСТАВЕ КА «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД»

Научная аппаратура «Геликон-И» состоит из двух блоков: детекторного блока «Геликон-И-Д» и блока электроники «Геликон-И-Э». Детекторный блок «Геликон-И-Д» имеет диаметр 180 мм, длину 380 мм и массу $10,5 \pm 0,5$ кг. Блок электроники «Геликон-И-Э» — габариты $244 \times 208 \times 104$ мм, масса составляет $4,5 \pm 0,3$ кг.

Аппаратура «Геликон-И» должна быть установлена в тени защитного экрана КА.

Ось Z поля зрения детекторного блока ориентирована в анти-солнечном направлении. Необходима проработка возможности размещения детекторного блока «Геликон-И-Д» на специальной раскрывающейся (выдвижной) штанге, которая позволила бы регистрировать солнечное рентгеновское излучение по команде с Земли в соответствии с температурным режимом детекторного блока.

Блок электроники не требует размещения в гермоотсеке.

Потребляемая НА «Геликон-И» мощность составляет: среднесуточная 10 Вт, пиковая 15 Вт (при номинальном напряжении питания). Энерговыделение в детекторном блоке не превышает 1,5 Вт.

Детекторный блок «Геликон-И-Д» имеет поле зрения 2π стерадиан, в пределах которого не должны располагаться затеняющие элементы КА и НА. В НА «Геликон-И» отсутствуют открывающиеся крышки. Программа работы НА не требует сканирования Солнца.

Оптимальным температурным режимом для детекторного блока является диапазон $10...25$ °С. Допустимый температурный режим охватывает диапазон $5...45$ °С. Недопустимо с точки зрения сохранения работоспособности детекторного блока его пребы-

вание при температурах ниже 0 градусов Цельсия. В этом случае возможно необратимое нарушение оптического контакта между кристаллом и оптическим выходным окном детектора из свинцового стекла высокой прозрачности. Оптический контакт осуществляется с помощью смазки из чистых сортов силикона, который при температурах ниже 0 °С теряет свою прозрачность. Это требует анализа температурного режима блока, установки на его посадочных местах специальных нагревателей для автоматического поддержания необходимого температурного режима и использования чехлов из ЭВТИ. При этом необходимо предусматривать размещение вокруг контейнера скинцилляционного кристалла детекторного блока ЭВТИ облегченного типа.

Научная аппаратура «Геликон» должна быть постоянно включена в дежурном режиме «фон». Переход в режим «всплеск» регистрации характеристик солнечных вспышек и гамма-всплесков производится автоматически. Такая циклограмма работы сохраняется на всех этапах полета КА «Интергелиозонд», включая перелет по трассе Земля – Венера, Венера – Солнце – Венера и на этапе квазикоротационных наблюдений.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ КА И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ГЕЛИКОН-И

Для управления НА «Геликон-И» требуется четыре релейных команды для включения и выключения НА (с дублированием) и эпизодическая подача (один раз в несколько дней) цифровых команд (УКМ), используемых для поддержания и изменения в случае необходимости внутренних параметров НА (коэффициента усиления линейного спектрометрического тракта, временного разрешения, порогов срабатывания триггерных ячеек всплесков и др.). В НА необходимо обеспечить подачу кода текущего времени, используемого для синхронизации собственного таймера НА и его привязки к московскому времени с точностью ~1 мс.

Научная и служебная ТМ-информация НА «Геликон-И» накапливается в оперативных запоминающих устройствах (ОЗУ) аппаратуры. Каждые 5...10 мин (подлежит уточнению) НА формирует телеметрические кадры и выводит их в ЗУ телеметрической системы КА (ССНИ). Суточный объем информации НА «Геликон-И», принимаемой от НА и передаваемой на Землю, — до 75 МБ. Информация с приемного пункта по сети Интернет должна без заметных временных задержек транслироваться в ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка научной аппаратуры «Геликон-И» на борту КА «Интергелиозонд» позволит организовать длительные многолетние наблюдения всплесков жесткого рентгеновского излучения Солнца и космических гамма-всплесков в широком энергетическом диапазоне 10 кэВ – 15 МэВ на удаленной от Земли орбите в оптимальных условиях межпланетного пространства.

Наблюдения с орбиты КА «Интергелиозонд» совместно с экспериментами КОНУС-УФ, КОНУС-М и КОНУС-ФГ обеспечат функционирование отечественной триангуляционной сети высокоточной локализации источников всплесков, детальную регистрацию временных профилей и энергетических спектров событий. Результаты этих исследований станут существенным вкладом в современные всеволновые исследования активности Солнца и космических гамма-всплесков как источников экстремального взрывного выделения электромагнитной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [Ораевский, Собельман, 2002] *Ораевский В. Н., Собельман И. И.* Комплексные исследования активности Солнца на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28. № 6. С. 457–467.
- [Мазец и др., 2009] *Мазец Е. П., Аптекарь Р. Л., Голенецкий С. В., Ильинский В. Н., Пальшин В. Д., Соколова З. Я., Фредерикс Д. Д., Уланов М. В.* Исследования солнечных вспышек и космических гамма-всплесков в эксперименте ГЕЛИКОН // Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 401–412.
- [Фредерикс и др., 2007] *Фредерикс Д. Д., Голенецкий С. В., Пальшин В. Д., Аптекарь Р. Л., Ильинский В. Н., Олейник Ф. П., Мазец Е. П., Клайн Т. Л.* Гигантская вспышка в SGR1806-20 и ее комптоновское отражение от Луны // Письма в Астрон. журн. 2007. Т. 33. № 1. С. 3–21.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И ПЕРЕНОСА В БЛИЖНЕЙ И ДАЛЬНОЙ
ГЕЛИОСФЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ ВБЛИЗИ
СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ, А ТАКЖЕ СПЕКТРОВ
И ПОЛЯРИЗАЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СОПРОВОЖДАЮЩЕГО СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ**

**А. М. Амелюшкин, В. В. Богомолов, Н. Н. Веденькин, В. И. Галкин,
А. Ф. Июдин, О. В. Морозов, М. И. Панасюк, С. И. Свертилов,
И. В. Яшин**

*Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобельцына Московского
государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ),
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы., 1, стр. 2*

В статье обсуждаются проблемы получения не искаженной информации об источниках солнечных энергичных частиц (СЭЧ), процессах их (до)-ускорения и переноса в гелиосфере. Констатируется важность проведения измерений спектров и питч-угловых распределений СЭЧ во внутренней гелиосфере. Обсуждается роль измерений нейтрального излучения, нейтронов и гамма-квантов от Солнца в получении информации о спектрах, временных профилях потоков первичных СЭЧ, а также о процессах их образования. В статье подчеркивается необходимость регистрации потоков нейтронов с энергиями порядка единиц и десятков МэВ, как от солнечных вспышек, так и от корональных выбросов, а также кривой блеска солнечной вспышки в гамма-излучении. В статье предлагаются варианты решения научных задач проекта Интергелиозонд в части регистрации нейтральной и заряженной компоненты СЭЧ, в том числе и путем создания научной аппаратуры адекватной по своим параметрам решаемым научным проблемам.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительное продвижение в понимании солнечно-земных связей в течение последних 40 лет наблюдений солнечной активности, значительное число фундаментальных проблем физики Солнца и гелиосферы остаются неисследованными.

Возможности лучше понять эти проблемы ограничены преобладанием до сего времени экспериментов, которые выполняют измерения параметров гелиосферы только в двухмерном пространстве, т. е. в плоскости эклиптики, и, как правило, на расстояниях в 1 а. е. или больших от Солнца. Исключение составляют исследования, выполненные на аппаратах «Гелиос-1» (1974–1986) и «Гелиос-2» (1976–1980), которые проводились на расстояниях от 1 а. е. до 0,3 а. е. от Солнца, а также АМС «Венера-11, -12, -13,

-14», измерявших жесткое рентгеновское излучение и потоки энергичных протонов и электронов на трассе полета между Землей и Венерой, а, главным образом, космический аппарат (КА) «Улисс», выполнивший в течение 1990–2008 гг. три пролета над ранее не доступными полярными областями Солнца. Из результатов этих экспериментов стало ясно, что характеристики солнечного ветра, а также распределения солнечных энергичных частиц (СЭЧ) во времени, по энергии или заряду на расстояниях 1 а. е. от Солнца существенно размыты по сравнению с аналогичными характеристиками, измеренными вблизи Солнца [Wibberenz, Cane, 2006; Heber et al., 2008; Malandraki et al., 2009; Balogh et al., 2008]. Чтобы добиться заметного прогресса в понимании нерешенных проблем солнечно-земных связей и процессов генерации солнечного ветра, полей, волн и энергичных частиц, **необходимо выполнить измерения основных характеристик солнечного ветра, полей и СЭЧ как можно ближе к источнику, т. е. к Солнцу.** Для получения полной картины требуется выполнение ряда условий при проведении экспериментов:

- измерения должны быть выполнены в нескольких пространственно разделенных точках трехмерной гелиосферы (рис. 1), включая наблюдения вне плоскости эклиптики, что по-

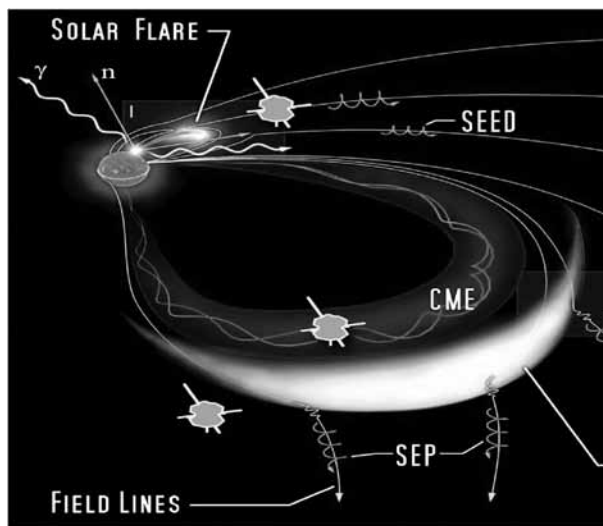


Рис. 1. Исследование процессов, происходящих на Солнце, под различным углом наблюдения, в том числе под небольшим наклоном к плоскости эклиптики

зволит уверенно разделять пространственные и временные вариации регистрируемых характеристик;

- необходимо знать направление магнитной силовой линии (ММП — минимального магнитного поля) в точке измерения и ее связь с поверхностью Солнца;

- исследования должны сопровождаться синхронными картографическими (коронаграф или широкоугольная камера) и спектральными измерениями плазмы района источника возмущения на поверхности Солнца, данными анализатора частиц плазмы и солнечного ветра, магнитометров и детекторов частиц высокой энергии.

Исходя из этих требований, идеальным было бы использование по крайней мере одного-двух КА вблизи Солнца, в разных плоскостях относительно эклиптики, и одного, или более на расстояниях порядка 1 а.е. от Солнца, т.е. околоземных аппаратов. Применительно к СЭЧ, наблюдения солнечных выбросов с двух пространственно разнесенных КА и из внеэклиптического положения (см. рис. 1) позволит наиболее точно определять направление их распространения по отношению к линии Солнце — Земля и их гелиоширотную и гелиодолготную протяженность, что необходимо для более точного предсказания начала взаимодействия

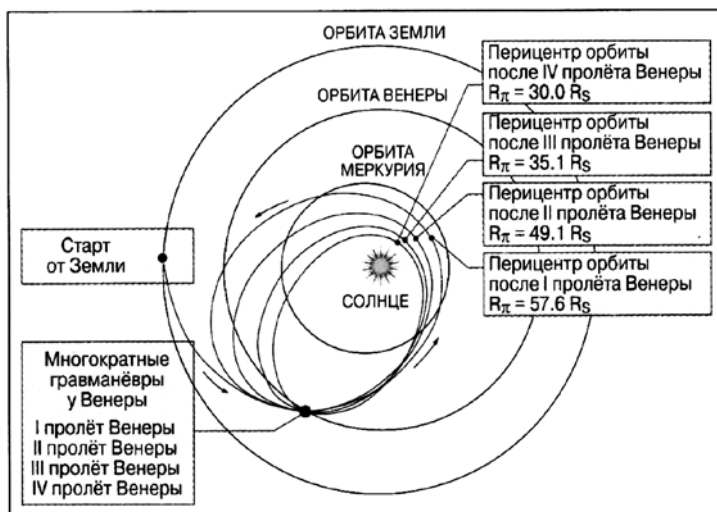


Рис. 2. Вариант баллистики КА «Интергелиозонд» на подлетах к Солнцу (см. также Интернет-страницу <http://www.izmiran.ru/projects/space/INP/ballistics>)

выбросов с магнитосферой Земли и в то же время для установления пространственно-временной картины распространения энергичных частиц, ускоряемых процессами на Солнце. Также это позволит расширить исследования истинной переменности светимости Солнца. Предлагаемая баллистика КА «Интенгелиозонд» (рис. 2) даст возможность решать большую часть указанных задач.

1. ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Солнечные энергичные частицы могут ускоряться в нескольких зонах на Солнце: во взрывающихся арках, местах пересоединения магнитного поля и на ударных волнах, которые распространяются из короны во внутреннюю гелиосферу. Большие вспышки на Солнце могут создать радиационно-опасную ситуацию на Земле и орбитах, близких к Земле, или быть результатом ускорения частиц во многих из указанных зон. В то же время не исключена задержка выхода ускоренных частиц в космическое пространство по отношению к процессу ускорения СЭЧ, поскольку частицы могут быть захвачены на закрытых магнитных петлях и многократно рассеиваться на турбулентностях, сопровождающих фронт ударной волны. На траектории к Земле СЭЧ дополнительно рассеиваются турбулентностями гелиосферного происхождения. Ко времени прихода СЭЧ на орбиту Земли их характеристики, полученные на Солнце, могут быть совершенно изменены процессами промежуточного ускорения, переноса и диффузии вдоль и поперек межпланетного магнитного поля. Таким образом, первичные характеристики полученные в месте ускорения частиц оказываются утерянными. **Только вблизи источника частиц существует шанс получить не искаженную информацию о первичных процессах ускорения СЭЧ и их выхода в космическое пространство из короны Солнца.**

Роль нейтрального излучения в исследовании вспышек Солнца

При изучении солнечной активности особенно полезной оказывается информация о потоках нейтрального излучения, т. е. жесткого рентгеновского излучения, γ -излучения и нейтронов, так как их распространение в гелиосфере не зависит от ориентации межпланетного магнитного поля. Время регистрации этого нейтрального излучения на орбите Земли, или в другой точке пространства

в гелиосфере, относительно просто связано со временем их генерации, т. е. с моментом образования СЭЧ, ускоренных в солнечной короне.

Дополнительно, процессы образования нейтрального излучения, в том числе излучения в γ -линиях, зависят от спектров, генерируемых во вспышках СЭЧ. Это позволяет, решая обратную задачу, по измерениям спектров и временных характеристик нейтронов и γ -излучения как в континууме, так и в γ -линиях, восстановить спектры первичных солнечных энергичных частиц, а также состав и плотность плазмы, в которой было генерировано нейтральное излучение.

Вариации во времени потоков и спектров нейтронов (рис. 3 и 4) несут информацию о спектрах ускоренных частиц, во взаимодействиях которых с веществом (ядрами) солнечной короны собственно и образуются нейтроны [Hua et al., 2002; Share et al., 2011]. С некоторой задержкой на термализацию потоки нейтронов могут проследиваться по кривой блеска в γ -линиях с энергиями 2,23 и 0,511 МэВ [Morrison, 1958; Lingenfelter, Ramaty, 1967; Share et al., 1982]. Регистрация солнечных нейтронов на расстояниях в 1 а.е. от Солнца уже способствовала углублению нашего представления о процессах, происходящих в короне Солнца [Chupp et al., 1982, 1987]. Некоторое осложнение с ограничениями на энергию регистрируемых у Земли нейтронов из-за их распада на пути от места образования до места регистрации можно

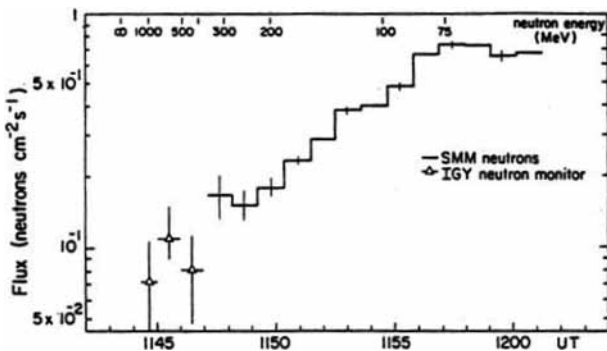


Рис. 3. Поток солнечных нейтронов вблизи Земли, т. е. на 1 а.е. от Солнца, в зависимости от времени задержки по отношению к вспышечному γ -излучению с началом в ~11:43 UT. Энергия регистрируемых нейтронов в зависимости от времени задержки их прихода к КА, при условии импульсной инъекции нейтронов на Солнце в момент времени 11:43:26 минус 500 с, показана на верхней шкале [Chupp, Ryan, 2009].

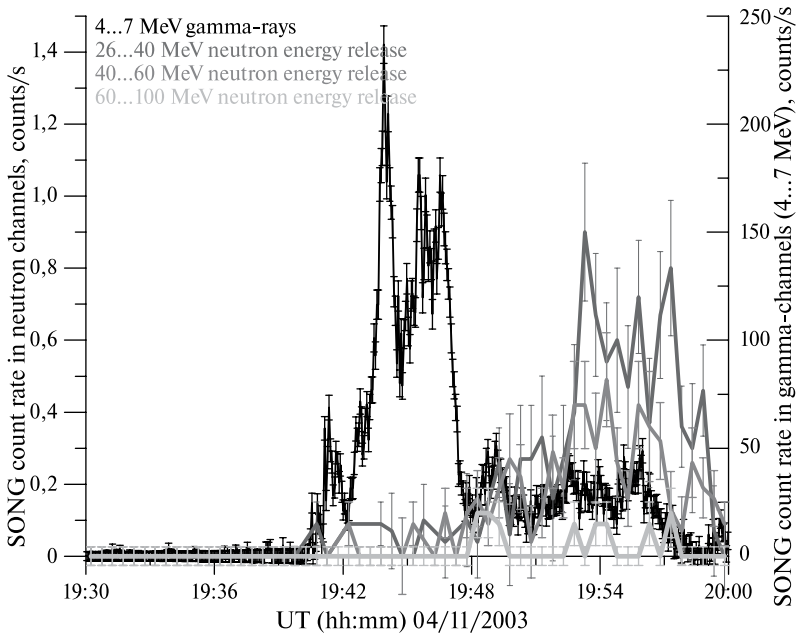


Рис. 4. Результаты измерения солнечных нейтронов прибором СОНГ (КОРОНАС-Ф) во время солнечной вспышки 4 ноября 2003 г. [Кузнецов и др., 2006]

превратить в преимущество. Если при этом использовать информацию получаемую из одновременно регистрируемых спектров γ -континуума, а также об интенсивности запаздывающих γ -линий на энергиях 2,23 и 0,511 МэВ, в сравнении с кривыми блеска в других γ -линиях, спонтанно испускаемых возбужденными ядрами, образуемыми в процессах взаимодействия СЭЧ и нейтронов с ядрами вещества солнечной короны или веществом массивного солнечного выброса сопровождающего многие энергичные вспышки на Солнце (см. рис. 4, [Lingenfelter, Ramaty, 1967]).

Таким образом, информация об энергичном нейтральном излучении солнечных вспышек — нейтронах и γ -квантах — необходима для создания адекватных моделей ускорения заряженных частиц до релятивистских энергий во вспышках. Именно нейтральное излучение несет не искаженную влиянием магнитных полей информацию об ускорительных процессах, происходящих непосредственно в солнечной атмосфере [Chupp, 1988; Ramaty, Mandzhavidze, 1994]).

2. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

2.1. История изучения нейтрального излучения от Солнца

Солнечные нейтроны были зарегистрированы впервые во время солнечной вспышки 21 июня 1980 г. прибором GRS, установленном на ИСЗ SMM [Chupp et al., 1982]. До измерений потоков солнечных нейтронов на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» (см. рис. 4) было не более пяти случаев несомненной прямой регистрации нейтронов солнечных вспышек [Кузнецов и др., 2006] (см. рис. 3 и 5).

Все сказанное показывает ценность новых экспериментальных данных как о рентгеновском и γ -излучении, так и о нейтронах солнечных вспышек. Особенно интересны наблюдения потоков нейтронов вблизи Солнца, где в измеримых количествах присутствуют вспыхечные нейтроны малых энергий, распадающиеся на пути от Солнца к Земле. Базируясь на накопленном опыте и результатах выполненных экспериментов по регистрации нейтрального излучения в проектах НЕГА, НЕГА-1, СОНГ

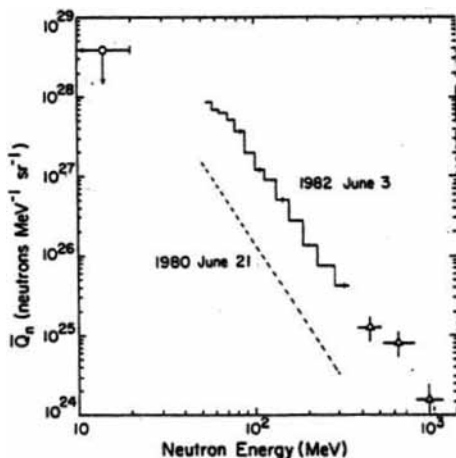


Рис. 5. Спектр излучения нейтронов на Солнце для вспышки 3 июня 1982 г. от области S09E72 (сплошная ломаная линия). Для сравнения прерывистой линией дан результат оценки спектра нейтронов на Солнце для вспышки, в которой нейтроны были впервые зарегистрированы прибором GRS на борту SMM для вспышки 21 июня 1980 г. Верхний предел для малых энергий нейтронов базируется на оценке с использованием потока в γ -линии 2,23 МэВ. Три точки с ошибками показывают результаты измерений нейтронного монитора на Jungfraujoch после пересчета на спектр излученный на Солнце [Panasyuk et al., 2000]

и других [Богомолов и др., 1995; 2000; Kudryavtsev et al., 1998; Рубинштейн и др., 2002] необходимым условием научного успеха любой миссии, нацеленной на улучшение понимания процессов, происходящих на Солнце, и их влияния на солнечно-земные связи, считается возможность иметь на борту КА аппаратуру, способную регистрировать нейтроны и γ -излучение от Солнца.

Измерение характеристик энергичных заряженных частиц — неотъемлемая часть эксперимента по изучению солнечной активности. Без оперативных данных об энергичных частицах невозможно изучение пространственной и временной связи локальных характеристик солнечного ветра, **энергичных частиц** и магнитных полей в гелиосфере с их источниками на Солнце и корональными структурами.

Для понимания механизмов ускорения и переноса энергичных заряженных частиц, образованных в солнечной вспышке, также очень важны наблюдения вблизи Солнца, где в измеримых количествах присутствуют вспыхечные протоны относительно небольших, субрелятивистских энергий, имеющих спектральное распределение, которое неизбежно должно трансформироваться на пути от Солнца к Земле. Наблюдения потоков протонов и ионов малых энергий на небольших гелиоцентрических расстояниях важны для проверки гипотезы о безвспыхечном ускорении ионов на Солнце [Веселовский и др., 1996] и уточнения природы так называемых «электронных» и «протонных» вспыхек [Lin, 1974]. Ранее предполагалось, что вспыхки «электронного» типа ассоциированы главным образом с импульсными, короткими во времени вспыхками с сильным обогащением тяжелыми ионами, в том числе и ионами ^3He , по отношению к ионам ^4He . «Протонные» вспыхки ассоциировались с более длительными солнечными процессами [Cane et al., 1986]. В этих вспыхках частицы ускорялись на ударной волне, в то время как в коротких, импульсных вспыхках ускорение предположительно происходит в резонансном, импульсивном процессе, характерном для вспыхечной плазмы. Некоторые из явлений, предположительно характерных только для импульсивных «электронных» вспыхек, были зарегистрированы также и в медленных, «протонных» вспыхках в ходе более чувствительных экспериментов, проведенных в 23-м солнечном цикле [Desai et al., 2007]. Обогащение железом по отношению к кислороду, как и обогащение ^3He по отношению к ^4He , происходило также и в медленных, «протонных» вспыхках. Некоторые из подобных вспыхек удалось наблюдать одновременно на нескольких аппаратах, находящихся на разном расстоянии от Солнца. Солнечные вспыхки 21 марта 1976 г. и 15 января 1979 г. наблюдались приборами на аппаратах Helios-A, Helios-B и IMP 8,

а вспышка 28 мая 1980 г. — приборами на Helios-A и IMP 8 [Wibberenz, Cane, 2006]. Это позволило установить ряд интересных закономерностей в распространении частиц высоких энергий в межпланетном пространстве [Wibberenz, Cane, 2006]. Для того чтобы проверить эти закономерности и получить наиболее полную информацию, необходимы одновременные измерения потоков ионов, нейтронов, электронов, а также рентгеновских и γ -квантов.

2.2. Ожидаемые потоки нейтронов и γ -квантов от вспышек на Солнце

Потоки γ -квантов и нейтронов от солнечных вспышек можно оценить по данным околоземных экспериментов, регистрировавших солнечные нейтроны и γ -кванты в экспериментах, выполненных в прошлом. Такие эксперименты проводились на борту орбитальной обсерватории «КОРОНАС-Ф» (эксперименты СОНГ и СПР-Н), а также и на АМС «Венера-11, -12, -13, -14». Временные профили, наблюдавшиеся во время солнечной вспышки 4 ноября 2003 г. в различных энергетических каналах, приведены на рис. 4 для прибора СОНГ. Рисунок 6 показывает

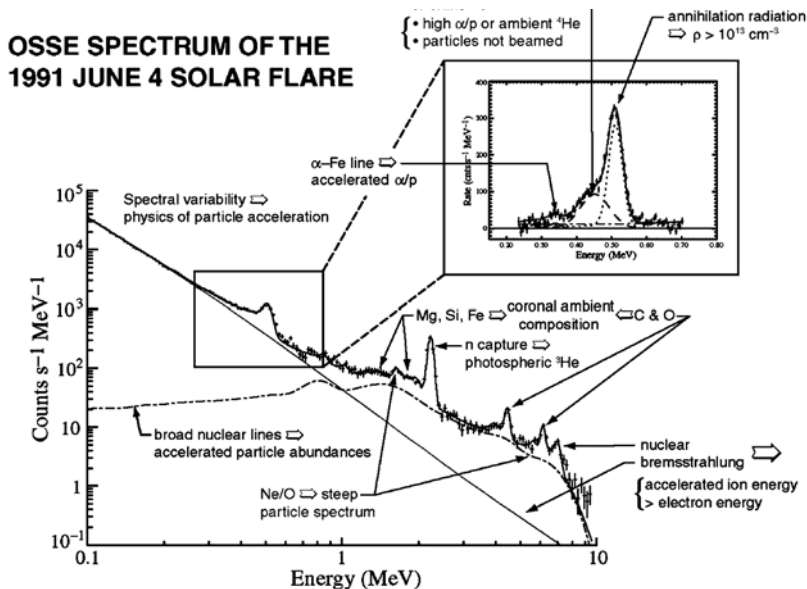


Рис. 6. Результаты измерения γ -спектра прибором OSSE (CGRO) во время солнечной вспышки 4 июня 1991 г. [Share, Murphy, 2000]

спектр рентгеновского и γ -излучения зарегистрированного прибором OSSE на борту КА CGRO. Наряду со спектрометрической информацией о солнечных вспышках представляется важным, может быть, и необходимым условием успеха эксперимента ПЭП — возможность анализировать солнечные вспышки с высоким временным и пространственным разрешением в жестком рентгеновском и γ -излучении. Эта информация очень важна, прежде всего для анализа условий образования СЭЧ и их выхода из короны Солнца.

Рисунок 7 представляет спектр нейтронов, рассчитанный для условий вспышки на Солнце и образованный в столкновениях ускоренных ионов с ядрами короны.

По мере приближения прибора к Солнцу потоки γ -квантов и нейтронов солнечного происхождения возрастают пропорционально квадрату расстояния до источника ($\sim R^2$). Вместе с тем, нейтроны, рождающиеся на Солнце, имеют время прохождения от Солнца до орбиты Земли, сравнимое с их временем жизни (~ 887 с). Поэтому большая часть нейтронов малых энергий до орбиты Земли не доходит [Богомолов и др., 2000], и их регистрация

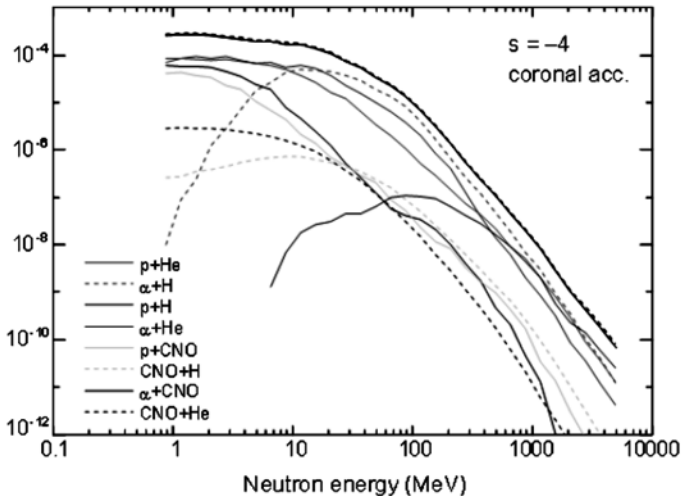


Рис. 7. Спектр нейтронов на Солнце, образовавшихся в столкновениях ускоренных ионов со степенным спектром $s = -4$ с ядрами вещества солнечной короны. Спектр нормализован на один протон с энергией >30 МэВ. Расчет для состава вещества короны с отношением $\alpha/p = 0,2$. CNO обозначает совокупность всех элементов тяжелее гелия [Share et al., 2011]

возможна только вблизи Солнца. К тому же, поскольку нейтроны имеют различные скорости, импульс нейтронов, рожденных при мгновенной инжекции, будет растянут во времени на минуты и даже часы. Это также ведет к уменьшению с расстоянием потока нейтронов, падающего на детектор в единицу времени, а значит, и к уменьшению чувствительности детектора к регистрации нейтронов. На рис. 8 представлены результаты расчетов параметров нейтронов для расстояний: $25R_s$, $100R_s$ и $214R_s$ (1 а. е.) в зависимости от их энергии. На рис. 9а показано ожидаемое время задержки прихода нейтронов относительно времени инжекции, которое можно определить по приходу γ -квантов, образовавшихся в тех же процессах, что и нейтроны. Рисунок 9б показывает форму спектра, рассчитанную для трех показателей спектра нейтронов на Солнце (1,6; 2 и 3), с учетом их дальнейшего распада. За единицу был принят флюенс нейтронов с $E_n > 1$ МэВ.

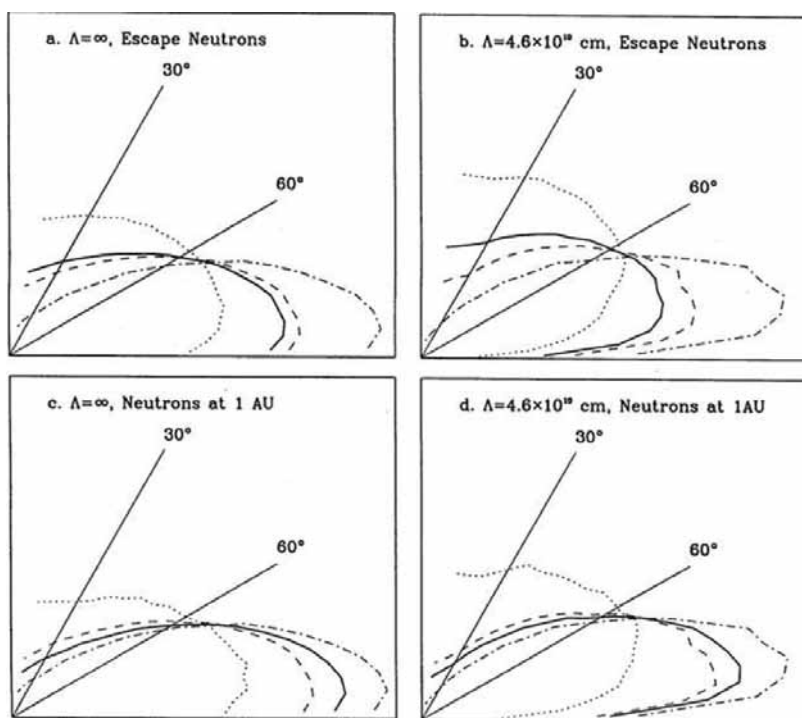


Рис. 8. Результаты расчетов для выхода нейтронов из фотосферы для случаев с питч-угловым рассеянием ионов и без рассеяния: а, б — на поверхности Солнца; с, д — на 1 а. е. [Hua et al., 2002]

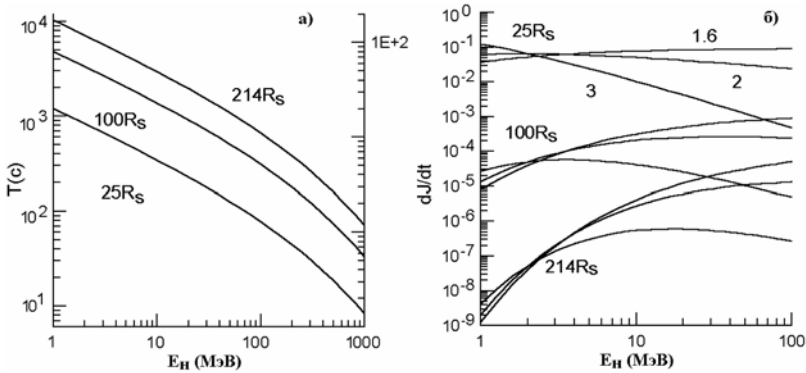


Рис. 9. Результаты расчета характеристик потока солнечных нейтронов для различных расстояний от Солнца: а) — время задержки прихода нейтронов относительно времени инжекции в зависимости от энергии; б) — форма энергетического спектра, рассчитанная для показателей спектра нейтронов на Солнце 1,6; 2 и 3, с учетом их распада [Богомолов и др., 2005]

Из рисунка видно, что если для изучения солнечных нейтронов у орбиты Земли наиболее перспективной представляется область энергий >10 МэВ, то для эксперимента вблизи Солнца возможно расширение диапазона регистрируемых энергий нейтронов в область ~ 1 МэВ. Приборы, которыми были зарегистрированы солнечные нейтроны у орбиты Земли, такие как GRS на спутнике SMM [Chupp, 1988; Panasyuk et al., 2000], использовали методы, рассчитанные на энергии в десятки мегаэлектрон-вольт (например, ядерные реакции, вызванные нейтронами). Эти приборы были довольно массивны, жесткие условия эксперимента на околосолнечной станции предполагают массу прибора порядка 10 кг. Для мониторинга солнечной активности требуется эффективно регистрировать прежде всего γ -кванты, а по возможности и нейтроны, на всей орбите АМС. Значит, необходима разработка прибора небольшой массы, регистрирующего γ -кванты и рентгеновское излучение с хорошей статистикой, при высоком энергетическом и временном разрешении, а также и нейтроны в диапазоне от сотен килоэлектронвольт до десятков мегаэлектронвольт.

Среди основных направлений предлагаемых НИИЯФ МГУ экспериментов фигурируют:

- исследование вспышек на Солнце как проявление мощного ускорителя заряженных солнечных энергичных частиц по результатам регистрации нейтрального солнечного излучения, прежде

всего рентгеновского и γ -излучения, а также регистрация нейтронов с $E_n > 1$ МэВ;

- измерение и сопоставление синхронных и запаздывающих вариаций спектральных и пич-угловых распределений энергичных частиц во время солнечных вспышек и в промежутках между ними на различных расстояниях от Солнца и различных гелиоширотах с целью углубления понимания процессов ускорения и переноса вспышечных частиц в короне Солнца и во внутренней гелиосфере;
- выяснение природы и описание глобальной динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности — солнечных вспышек и выбросов коронального вещества и их влияния на гелиосферу, ускорение СЭЧ и космическую погоду;
- выяснение того, каким образом СЭЧ достигают высоких гелиоширот.

3. РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ

Первой точкой отсчета траектории быстрого нейтрона будет первичное энерговыделение в сцинтилляционном годоскопе с величиной сигнала, пропорциональной его энергии при взаимодействии с ядром водорода или углерода, имеющихся в составе сцинтиллирующего волокна годоскопа (рис. 10). Координаты этой точки определяются волокнами, в которых было зарегистрировано энерговыделение рассеянного протона или продуктов взаимодействия нейтрона с ядром углерода.

Второе взаимодействие нейтрона с материалом калориметра дает вторую точку отсчета траектории рассеянного в первом взаимодействии нейтрона и позволяет определить энергию, выделившуюся в результате этого взаимодействия. Две точки с координатами (x_1, y_1) и энергией E_1 и для второй точки (x_2, y_2) и E_2 позволяют полностью выявить кинематику процесса поглощения первичного нейтрона в детекторе и, таким образом, энергию E_0 и направление (φ_0, θ_0) прихода первичного (солнечного) нейтрона.

В ряде случаев эти взаимодействия будут сопровождаться сигналом от взаимодействия вторичного γ -кванта с кристаллом быстрого неорганического сцинтиллятора ($\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$).

Регистрация нейтронов при помощи экзотермической реакции ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H} + 4,78$ МэВ (сечение этой реакции 945 барн) может быть реализована в случае использования активного или пассивного элемента детектора нейтронов, содержащего большое количество изотопа ${}^6\text{Li}$. В рамках проекта рассматривалась возможность использования сборки из стекла на основе ${}^6\text{LiF}$ и

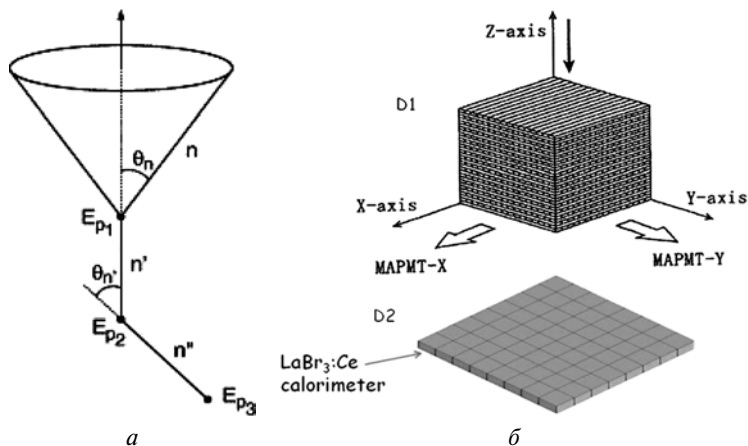


Рис. 10. Принцип регистрации быстрых нейтронов по рассеянию на ядрах водорода или другого элемента [Pinkaui, 1966]: *a* — кинематика процесса рассеяния; *б* — блок-схема телескопа НИИЯФ из двух детекторов для регистрации быстрых нейтронов

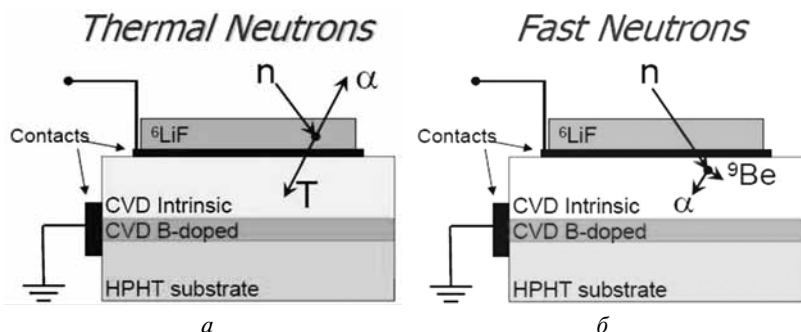


Рис. 11. Схемы регистрации тепловых (*a*) и быстрых (*б*) нейтронов сборками из стекла, содержащего ${}^6\text{LiF}$, и полупроводника на основе синтетического алмаза [Almaviva et al., 2008]

полупроводника на основе синтетического алмаза в качестве детектора нейтронов (рис. 11). Поскольку ${}^6\text{LiF}$ необходимо использовать в виде тонкого слоя с толщиной не более 5 мкм, эффективность регистрации тепловых нейтронов такой сборкой будет очень низкой, но для быстрых нейтронов метод, представленный на рис. 10, будет работать, начиная с энергий нейтронов, превышающих 5,7 МэВ пороговой энергии для реакции ${}^{12}\text{C}(n, \alpha){}^9\text{Be}$,

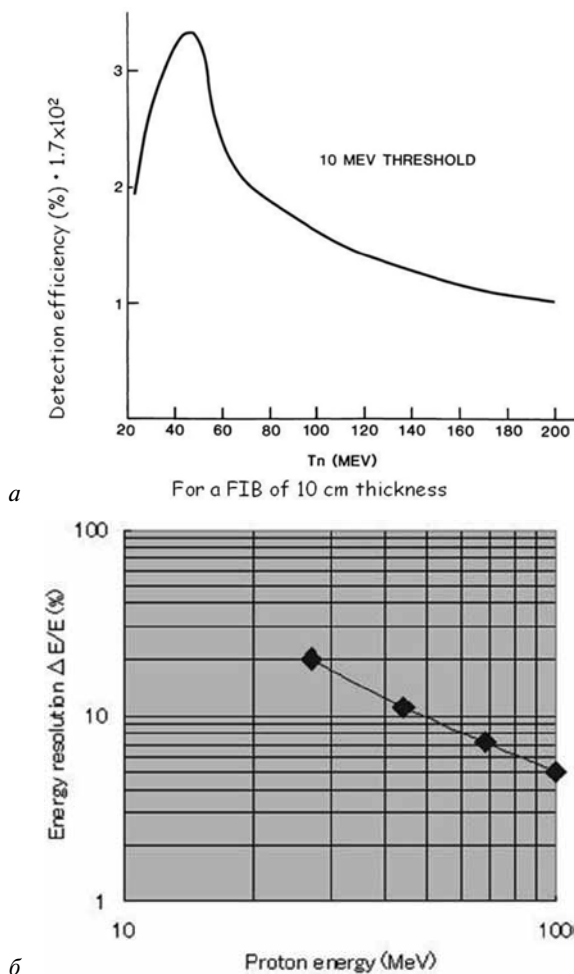


Рис. 12. Эффективность регистрации (а) и энергетическое разрешение (б) телескопа быстрых нейтронов

и, начиная с энергии нейтронов ~ 6 МэВ, для реакции $^{12}\text{C}(n, 3\alpha)$ (рис. 12).

Анализ режимов регистрации нейтронов и γ -квантов прибором «ИнтерСОНГ» показал, что вероятность регистрации γ -квантов в ПС существенно ниже чем в $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$. Заряженные частицы, пересекающие $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$, одновременно дают импульс в пластмассовом сцинтиляторе. Таким образом, запаздывающие

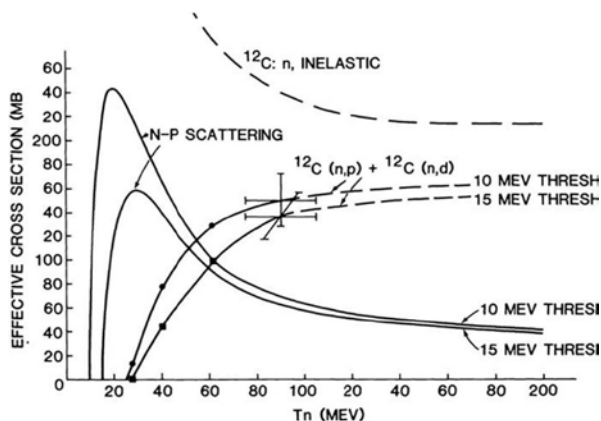
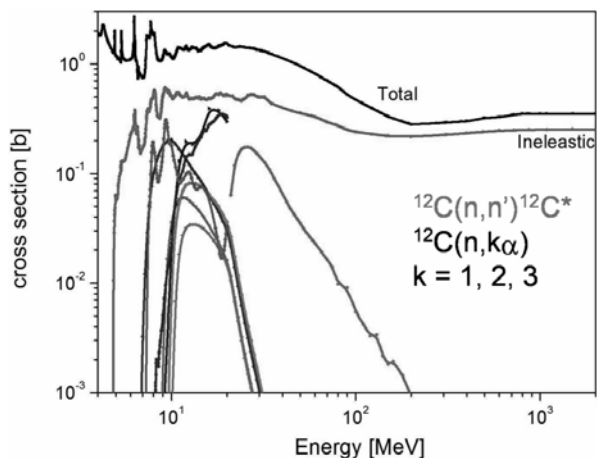


Рис. 13. Сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах материала сцинтилляционного годоскопа и алмазного детектора

совпадения сначала в ПС, а затем в $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$ могут быть обусловлены только нейтронами. Амплитуда первого импульса (импульса в ПС) дает информацию о первоначальной энергии нейтрона.

Если в ПС в качестве добавки ввести ^{10}B , то подобные двойные запаздывающие совпадения в пластмассовом сцинтилляторе будут вызываться нейтронами (реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li} + 2,8$ МэВ, сечение 3340 барн). Такой методикой можно регистрировать нейтроны с энергиями ниже 3...4 МэВ.

Этот метод близок к использованному в приборе GRS [Chupp, 1988; Panasyuk et al., 2000], а также в экспериментах НИИЯФ

с приборами НЕГА, НЕГА-1 и СОНГ [Chupp, Ryan, 2009; Богомолов и др., 1995]. Как видно из рис. 8, потоки солнечных нейтронов на орбите Земли меньше чем на расстоянии $25R_{\odot}$ приблизительно в 2000 раз даже при энергиях 100 МэВ.

В предлагаемом варианте прибора для «ИнтерСОНГ» в качестве калориметра для γ -квантов и нейтронов предполагается использовать сборки из пирамидальных кристаллов $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$. Сборки кристаллов $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$ будут со всех сторон окружены антисовпадательной защитой из пластмассового сцинтиллятора. Расположенные в самом центре сборки кристаллы могут быть выполнены на основе пластического сцинтиллятора с добавкой ^{10}B . Для просмотра сборки сцинтилляторов предполагается использовать многоанодные ФЭУ Н-8500, производимые японской фирмой Hamamatsu, или матрицы лавинных фотоумножителей. Любые сигналы от $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^+$ без сопровождения сигналов пластмассового сцинтиллятора могут быть обусловлены квантами рентгеновского или γ -излучений. С учетом возможных конфигураций и площади детекторов можно с уверенностью сказать, что на любых расстояниях от Солнца < 1 а. е. прибором «ИнтерСОНГ» можно будет проводить измерения достаточно эффективно.

В ряде космических приборов, регистрирующих нейтроны по ядерным реакциям в CsI [Chupp, Ryan, 2009; Panasyuk et al., 2000; Lingenfelter, Ramaty, 1967] для идентификации нейтронов использовалась зависимость формы импульса в CsI от средней ионизации (вторичные продукты взаимодействия нейтронов имеют большую ионизацию). Аналогичная зависимость формы импульса отмечается в ряде новых сцинтилляторов, например в $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$. В них обнаружены существенно разные времена выветки при прохождении объема сцинтиллятора релятивистскими частицами с минимальной ионизацией (в том числе и фотонов), в сравнении с энерговыделением медленными, нерелятивистскими частицами. НИИЯФ МГУ участвует в разработке технологии изготовления детекторов на основе этого нового типа сцинтиллятора.

Одно из важных требований, накладываемых на аппаратуру для околосолнечных экспериментов, в том числе на КА «Интергелиозонд», — ограничение по массе. В то же время важно обеспечить эффективность регистрации нейтрального излучения Солнца на уровне, достигаемом на расстояниях ~ 1 а. е., т. е. иметь эффективную площадь прибора ~ 50 см².

Прибор будет регистрировать потоки и спектры γ -квантов с энергией 0,03...10 МэВ и нейтроны с энергией 0,1...100 МэВ. Энергопотребление прибора вместе с электроникой — не должно превышать величину ~ 15 Вт.

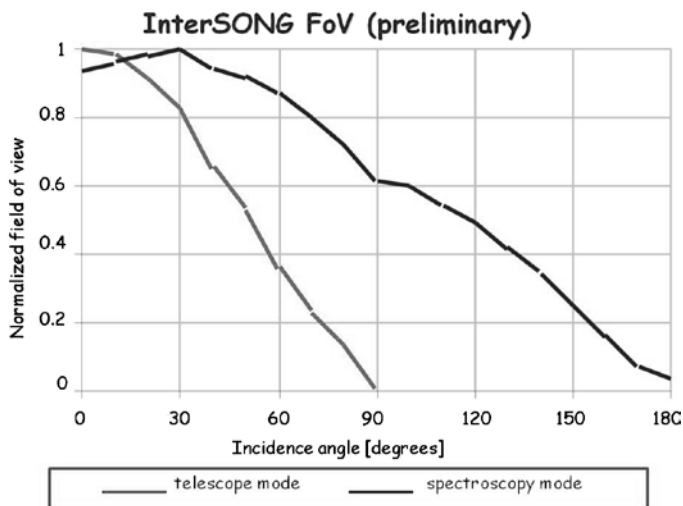


Рис. 14. Поле зрения калориметра телескопа быстрых нейтронов в режиме регистрации γ -квантов

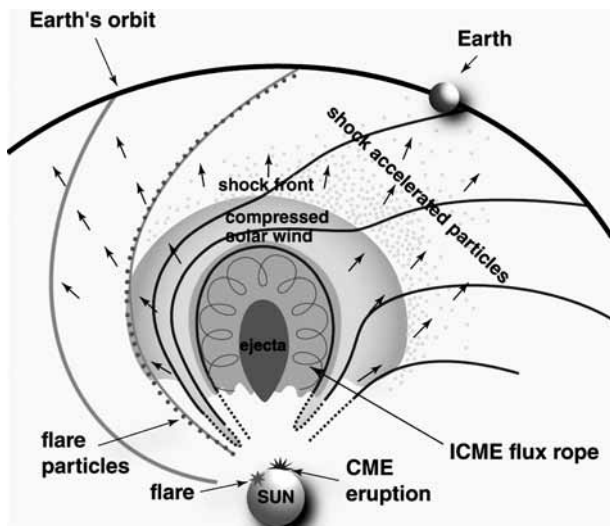


Рис. 15. Схематическое изображение распространения ударной волны от массивного выброса солнечного вещества в межпланетное пространство, показывающее деформацию магнитных силовых линий, и возможный район ускорения СКЛ на этой ударной волне

4. ОЖИДАЕМЫЕ ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ОТ ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ

Для оценки потоков частиц на расстояниях от 1 до 0,3 а. е. целесообразно было воспользоваться данными зарубежных экспериментов, проводившихся на межпланетных аппаратах вблизи Солнца. Подобные эксперименты выполнялись на КА Helios-1 и Helios-2, которые в 1975 и 1976 гг. приблизились к Солнцу, находясь внутри орбиты Меркурия. Описание и экспериментальные данные спутников Helios существуют на сайтах http://spdf.gsfc.nasa.gov/data_orbits.html и <http://www.mps.mpg.de/en/projekte/helios/#e6>. Непрерывный ряд данных, полученных в эксперименте HELIOS, простирается до 1990 г.

Спутники Helios-1 и Helios-2 разрабатывались ФРГ совместно с НАСА. Целью миссии было проведение первых измерений характеристик межпланетной среды на расстояниях от 1 а. е. вплоть до 0,3 а. е. В число задач приборов, установленных на борту АМС Helios-1 и Helios-2 входило изучение частиц космических лучей высоких энергий солнечного и внесолнечного происхождения в межпланетном пространстве (программа Cosmic Ray Experiment "Е6", руководитель Н. Kunow [Kunow et al., 1975]. В рамках этой программы проводилось измерение протонов и альфа-частиц, начиная с энергий 1,3 МэВ/нукл на расстояниях от 1 до 0,3 а. е. (рис. 16).

В составе детектора частиц с полем зрения 55° имелось пять полупроводниковых детекторов, детектор черенковского излучения на основе сапфира и сцинтилляционный детектор. Все детекторы были помещены в антисовпадательный счетчик цилиндрической формы.

Результаты измерений спектров протонов (каналы 4...13, 13...27, 27...37, 37...51 и >51 МэВ), альфа-частиц (2...4, 4...13, 13...27, 27...37, 37...48 и >48 МэВ/нукл) и электронов (0,3...0,8 и 0,8...2 МэВ), выполненных с 1 января по 18 апреля 1977 г., представляют собой усредненные данные за один час измерений (рис. 17).

Из вида графиков можно сделать выводы, что фоновые потоки частиц с энергиями более нескольких мегаэлектронвольт не очень сильно изменяются по мере приближения к Солнцу. Вместе с тем, вариации потоков, связанные со вспышками на Солнце, оказывают значительное влияние на потоки частиц, которые могут измениться при этом на несколько порядков. Чувствительность детекторных головок спектрометра энергичных частиц, ПЭП-СЭЧ, должны позволять измерять потоки заряженных частиц на всей орбите движения КА, а также определять их питч-угловое распределение (рис. 18).

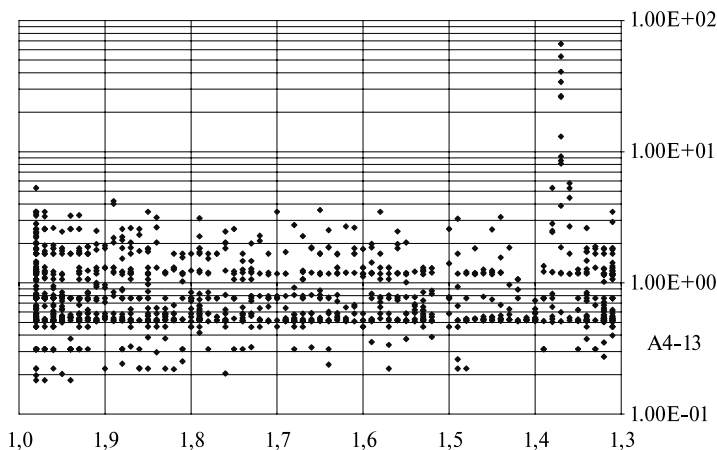


Рис. 16. Поток альфа-частиц с энергией 4...13 МэВ/нукл по данным спутника Helios-A в зависимости от расстояния от Солнца. Ось X — расстояние от Солнца (а.е.), ось Y — усредненные за 1 ч потоки альфа-частиц, частиц/($m^2 \cdot s \cdot sr \cdot MeV$)

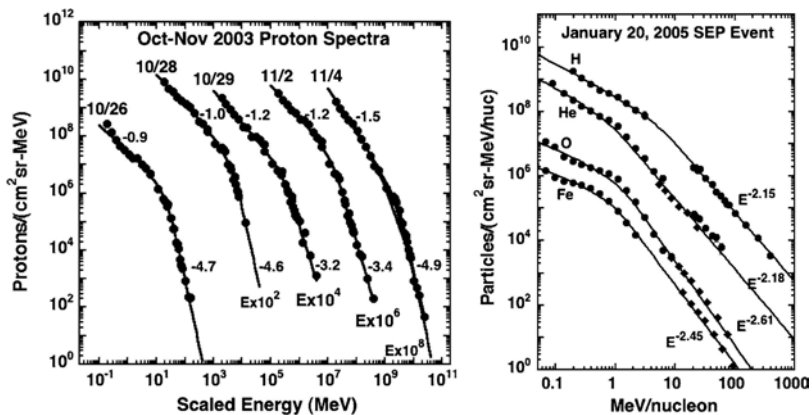


Рис. 17. Результаты измерений спектров протонов для солнечных вспышек в октябре-ноябре 2003 г., фитированных функцией с двумя степенными участками спектра (слева). Спектры протонов и ядер для солнечной вспышки 20 января 2005 г. с очень жесткими спектрами ядер в области энергий $E \geq 10$ МэВ/нукл (справа). Данные получены КА ACE, AMPX и GOES-11 [Mewaldt, 2006]

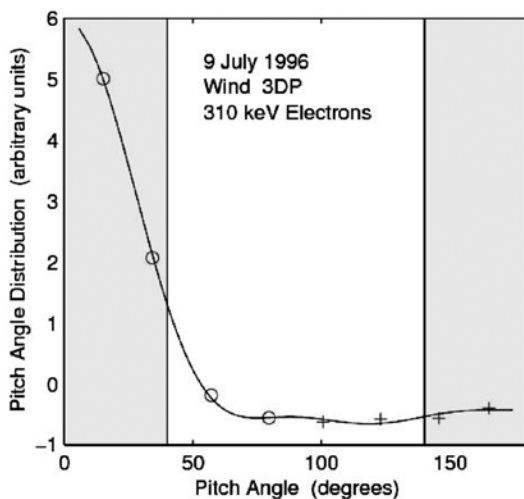


Рис. 18. Пич-угловое распределение для электронов с энергией >350 кэВ от солнечной вспышки 9 июля 1996 г. (W. Droege, private communication)

4.1. Телескоп заряженных частиц СКИ-5

Из анализа фоновых потоков заряженных частиц по данным космических аппаратов Helios-A и Helios-B [Cane et al., 1986], которые в 1975 и 1976 гг. приблизились к Солнцу, находясь внутри орбиты Меркурия, можно сделать выводы, что фоновые потоки частиц с энергиями более нескольких мегаэлектронвольт не очень сильно изменяются по мере приближения к Солнцу. Вместе с тем, вариации потоков, связанные с событиями на Солнце, оказываются весьма значительными, достигающими амплитуд изменений в несколько порядков. Расчетная чувствительность детекторов прибора СКИ-5 (спектрометра космических ионов), предлагаемого для включения в состав космического аппарата «Интергелиозонд», показывает возможность измерять потоки и спектры энергичных заряженных частиц на всей орбите движения КА.

Прибор СКИ предназначен для проведения прямых измерений в окосолнечном пространстве при наблюдениях Солнца с близких расстояний.

Для того чтобы масса прибора не превышала 5 кг, его необходимо интегрировать в конструкцию станции. Прибор должен быть установлен на ее боковой поверхности так, чтобы один из телескопов СКИ-5 мог наблюдать частицы, приходящие в его апертуру под углом не более 30° от направления на Солнце.

Спектрометр СКИ-5 измеряет потоки ионов космических лучей в диапазоне зарядов $Z = 1 \dots 26$ и энергий от единиц до десятков мегэлектронвольт на нуклон: $1 \dots 20$ МэВ/нукл для ионов ^1H и ^4He , $\sim 3 \dots 42$ МэВ/нукл для ядер группы CNO, $3,7 \dots 46$ МэВ/нукл для Ne, $6 \dots 70$ МэВ/нукл для Fe.

Предполагается, что при помощи СКИ-5 можно будет регистрировать потоки и спектры заряженных частиц, а также исследовать их анизотропию в энергетических диапазонах:

- электроны — $0,04 \dots 2,5$ МэВ, $\geq 2,5$ МэВ;
- протоны — $1,2 \dots 240$ МэВ, ≥ 240 МэВ;
- альфа-частицы с энергиями $9 \dots 100$ МэВ/нукл;
- ионы с энергиями $9 \dots 120$ МэВ/нукл.

Прибор СКИ-5 состоит из двух блоков: блока детекторов СКИ-5-Д и блока обработки и накопления информации СКИ-5-Е. В состав СКИ-5-Д входят две сборки питч-углового монитора (ПУМ-1 и ПУМ-2), состоящего из шести телескопов. Каждый телескоп образован двумя тонкими полупроводниковыми кремниевыми детекторами D1 и D2 и двумя толстыми кремниевыми детекторами D3 и D4, схема узла детекторов показана на рис. 19.

Детекторы заряженных частиц D1, D2, D3 и D4 изготовлены на основе кремния. В оптимальной конфигурации они имеют следующие размеры: D1 — круглый, площадь 100 мм^2 , толщина 50 мкм; D2 — также круглый, площадь 100 мм^2 , толщина 100 мкм, определяет телесный угол телескопа; D3 — 40×30 мм, толщина 2000 мкм; D4, который может быть общим для двух телескопов, — 45×35 мм, толщина 1000 мкм.

На основе расчетных данных об энерговыделении электронов и протонов различных энергий в детекторах D1, D2, D3 и D4 были определены параметры регистрируемых частиц, принцип выделения которых иллюстрируется (рис. 20).

Для определения изменений потоков ионов в заданном интервале энергий и выяснения природы источника их причины, в конструкцию СКИ-5 заложена возможность оценки питч-углового распределения ионов (и электронов). При этом учитывается возможность изменений потоков ионов в данной точке пространства, связанная с приходом частиц от самой вспышки на Солнце и частиц, ускоренных ударной волной, образовавшейся в гелиосфере при выбросе СМЕ. Учитывается также возможность подпитки частиц в заданном интервале энергий за счет их отражений на магнитных неоднородностях на больших расстояниях от Солнца, нежели расстояние в точке измерения. Такие неоднородности могут быть образованы как предыдущим эпизодом активности Солнца, так и собственно ударной волной.

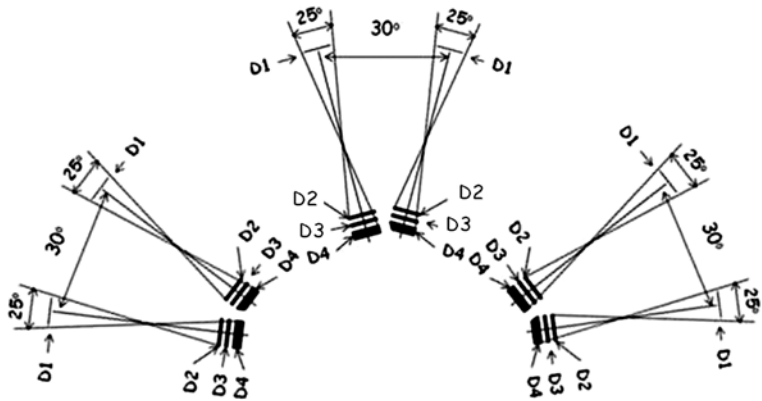


Рис. 19. Схема узла детекторов SKI-D уточняется на стадии эскизного проектирования

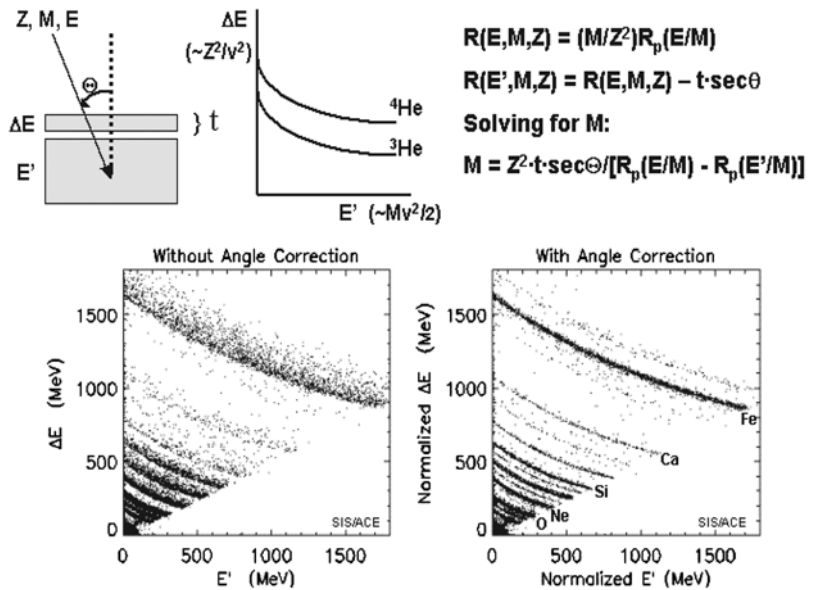


Рис. 20. Принцип отбора иона определенного типа из общего потока регистрируемых частиц СКЛ

Для определения питч-угловых распределений заряженных частиц, ускоряемых во время солнечных массивных выбросов вещества, на фронтах этих выбросов (см. рис. 18) необходимо перекрыть $\sim 180^\circ$ в угловом распределении частиц, так как фронт ударной волны может искажать обычно предполагаемую форму (спираль Паркера) магнитной силовой линии, соединяющей КА и Солнце.

Для детального рассмотрения процессов распространения СКЛ после солнечной вспышки, которая может происходить на различных гелиоширотах, было бы полезно определять питч-угловые распределения СКЛ (см. рис. 18) не только в плоскости эклиптики, но и под углом к эклиптике. Для этого предполагается установить телескопы СКИ-5 в двух плоскостях, расположенных под углом $60\dots 90^\circ$ друг к другу. Причем одна из них будет находиться по возможности в плоскости эклиптики.

4.2. Конструкция телескопа заряженных частиц СКИ-5

Как было сказано выше, прибор СКИ будет состоять из блока детекторов СКИ-Д и блока обработки и накопления информации СКИ-Е. В состав СКИ-Д кроме двух плоскостей детекторов, состоящих каждый из шести телескопов (формируются двумя тонкими полупроводниковыми кремниевыми детекторами D1 и D2 и двумя толстыми кремниевыми детекторами D3 и D4), также входят: зарядочувствительные предусилители; усилители; формирователи коротких импульсов, токовый сумматор; интегральные дискриминаторы, схемы логики, триггеры управления; устройства выборки и хранения, амплитудные анализаторы; пересчетные линейки, таймер, схемы обмена информацией с блоком СКИ-Е; источники питания детекторов и электронных схем блока СКИ-Д.

4.3. Требования к электронике прибора СКИ-5

Для работы телескопа заряженных частиц СКИ-5 требуется, чтобы при заданном напряжении питания преобразователей 27 ± 3 В и допустимых температурных условиях $\leq 50^\circ\text{C}$ выходное напряжение преобразователей, питающих полупроводниковые детекторы, составляет 400 ± 10 В. Допустимая величина пульсаций выходного напряжения не должна превышать 4 мВ. Для каждого детектора должно быть предусмотрено деление выходного напряжения преобразователя в $1\dots 80$ раз. Величина тока, потребляемого с каждого выхода, не превышает 10 мкА.

Прибор СКИ-5 должен обладать достаточным быстродействием обработки аналоговых сигналов, чтобы сигналы с разных детекторов не регистрировались как совпадающие, если интервал времени между ними превышает 0,2 мкс. Длительность сигналов, подаваемых на вход УВХ, не должна превышать 1 мкс.

В процессе работы с прибором предусматривается возможность подстройки порогов дискриминаторов, напряжений питания детекторов, коэффициентов передачи на пути прохождения импульсов от детекторов до УВХ, а также возможность подстройки (согласования) времени прохождения цифровых сигналов через схемы совпадений.

ЛИТЕРАТУРА

- [Богомолов и др., 1995] *Богомолов А. В., Кузнецов С. Н., Мягкова И. Н., Рюмин С. П.* Спектр нейтронных потоков с энергиями от 20 до 400 МэВ, измеренный на орбитальном комплексе «Салют-7» – «Космос-1686» // Космич. исслед. 1995. Т. 33. С. 248.
- [Богомолов и др., 2000] *Богомолов А. В., Дементьев А. В., Кудрявцев М. И., Мягкова И. Н., Рюмин С. П., Свертилов С. И., Соболевский Н. М.* Потоки и спектры вторичных нейтронов с энергиями >20 МэВ на орбитальной станции «Салют-7» – «Космос-1686» и ИСЗ «КОРОНАС-И». Сравнение экспериментальных данных и модельных расчетов // Космич. исслед. 2000. Т. 38. № 1. С. 31–36.
- [Богомолов и др., 2005] *Богомолов А. В., Кузнецов С. Н., Лишевский А. Э., Рубинштейн И. А., Рюмин С. П., Немченко И. Б., Соболевский Н. М., Уфимцев М. В.* Прототип спектрометра нейтронов и гамма-квантов для исследований солнечной активности на расстояниях от 0,5 а.е. до 25 солнечных радиусов // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 3. С. 24–36.
- [Веселовский и др., 1996] *Веселовский И. С., Гоцелок Ю. В., Дмитриев А. В., Кузнецов С. Н., Курт В. Г., Мягкова И. Н., Ораевский В. Н., Панасюк М. И., Подорольский А. Н., Рюмин С. П.* Безвспышечное возматание солнечных космических лучей 14–17 апреля 1994 г. // Изв. ВУЗов. Сер. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 11–12. С. 1533–1537.
- [Кузнецов и др., 2006] *Кузнецов С. Н., Курт В. Г., Мягкова И. Н., Юшков Б. Ю., Кудела К.* Гамма-излучение и нейтроны солнечных вспышек, зарегистрированные прибором СОНГ в 2001–2004 гг. // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. С. 111–120.
- [Рубинштейн и др., 2002] *Рубинштейн И. А., Рюмин С. П., Богомолов А. В.* Широкодиапазонный спектрометр нейтронов, рентгеновского и гамма-излучений // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 27–33.

- [Almaviva et al., 2008] *Almaviva S., Marinelli M., Milani E.*, et al. Thermal and Fast Neutron Detection in Chemical Vapour Deposition Single-Crystal Diamond Detectors // *J. Applied Physics*. 2008. V. 103. P. 054501.
- [Balogh et al., 2008] *Balogh A., Lanzerotti L.J., Suess S. T.* (eds. of monograph) The Heliosphere through the Solar Activity Cycle / Eds. Balogh A., Lanzerotti L.J., Suess S. T. Chichester, UK: Springer-Praxis, 2008.
- [Cane et al., 1986] *Cane H. V., McGuire R. E., von Rosenvinge T. T.* // *Astrophysical J.* 1986. V. 301. P. 448–459.
- [Chupp et al., 1982] *Chupp E. L., Forrest D. J., Ryan J. M.* et al. A Direct Observation of Solar Neutrons Following the 01:18 UT Flare on 1980 June 21 // *Astrophysical J.* 1982. V. 263. P. 95–99.
- [Chupp et al., 1987] *Chupp E. L.*, et al. Solar Neutron Emissivity During the Large Flare on 1982 June 3 // *Astrophysical J.* 1987. V. 318. P. 913–925.
- [Chupp, 1988] *Chupp E. L.* Solar Neutron Observations and their Relation to Solar Flare Acceleration Problems // *Solar Physics*. 1988. V. 118. P. 137–154.
- [Chupp, Ryan, 2009] *Chupp E. L., Ryan J. M.* // *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 9. N. 1. P. 11–40.
- [Desai et al., 2007] *Desai M. I., Mason G. M., Gold R. E.* et al. // *Space Science Reviews*. 2007. V. 130. P. 243–253.
- [Heber et al., 2008] *Heber B., Struminsky A., Zimovets I.*, et al. Observations of the December 2006 Particle Events at High Latitudes with KET aboard Ulysses // *Proc. 30ICRC*. 2008. V. 1 (SH). P. 217–220.
- [Hua et al., 2002] *Hua X.-M., Kozlovsky B., Lingenfelter R. E., Ramaty R., Stupp A.* Angular and Energy-Dependent Neutron Emission from Solar Flare Magnetic Loops // *Astrophysical J. Suppl.* 2002. V. 140. P. 563.
- [Kudryavtsev et al., 1998] *Kudryavtsev M. I., Bogomolov A. V., Bogomolov V. V., Denisov Yu. I., Svertilov S. I.* Measurements of High-Energy Neutron and Proton Fluxes on-board MIR-SPECTR Orbital Complex // *Advances in Space Research*. 1998. V. 21. P. 1785.
- [Kunow et al., 1975] *Kunow H.* et al. // *Raumfahrtforschung*. 1975. V. 19. N. 5. P. 253–257.
- [Lin, 1974] *Lin R. P.* // *Space Science Reviews*. 1974. V. 16. P. 189–256.
- [Lingenfelter, Ramaty, 1967] *Lingenfelter R. L., Ramaty R.* // *High Energy Nuclear Reactions in Astrophysics*. 1967. P. 99.
- [Malandraki et al., 2009] *Malandraki O. E., Marsden R. G., Lario D.* et al. Energetic Particle Observations and Propagation in the Three-Dimensional Heliosphere During the 2006 December Events // *Astrophysical J.* 2009. V. 704. P. 469–476.
- [Mazur et al., 2006] *Mazur J. E., Blake J. B., Slocum P. I.* et al. // *AGU Monographic Series*. 2006. V. 165 Solar eruptions and energetic particles. P. 345–352.
- [McKibben et al., 2003] *McKibben R. B., Cponnell J. J., Lopate C.* et al. Ulysses COSPIN Observations of Cosmic rays and Solar Energetic Particles from the South Pole to the North Pole of the Sun during solar maximum // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 21. P. 1217–1228.

- [Mewaldt, 2006] *Mewaldt R.A.* Solar Energetic Particle Composition, Energy Spectra, and Space Weather // *Sp. Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 303–316.
- [Morrison, 1958] *Morrison P.* // *Nuovo Cimento.* 1958. V. 7. P. 858.
- [Panasyuk et al., 2000] *Panasyuk M.I., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Dmitriev A.V., Kudryavtsev M.I., Kuzhevsky B.M., Kuznetsov S.N., Lyagushin V.I., Myagkova I.N., Nechaev O.Yu., Ryumin S.P., Svertilov S.I., Sobolevsky N.M., Yushkov B.Yu.* Background fluxes of neutrons in near-Earth space: experimental results of SINP: Препринт НИИЯФ МГУ. М.: Изд-во МГУ, 2000.
- [Pinkau, 1966] *Pinkau K.* Die Messung Solare und Atmosphärische Neutronen // *Zeitschrift Naturforschung Teil A.* 1966. V. 21. P. 2100.
- [Ramaty, Mandzhavidze, 1994] *Ramaty R., Mandzhavidze N.* Theoretical Models for High-Energy Solar Flare Emission / Eds. J. M. Ryan, W. T. Vestrand // *AIP Conf. Proc. No. 294. High Energy Solar Phenomena, New Era of Spacecraft Measurements.* N. Y.: American Institute of Physics, 1994. P. 26–44.
- [Share, Murphy, 2000] *Share G.H., Murphy R.J.* Gamma-ray spectroscopy in pre-RHESSI era // *ASPC.* 2000. V. 206. P. 377.
- [Share et al., 1982] *Share G.H., Nolan P.L., Forrest D.J.* et al. Measurements of the 2.223 MeV Neutron Capture Line in Solar Flares // *Bulletin of the American Astronomical Society.* 1982. V. 15. P. 875.
- [Share et al., 2011] *Share G.H., Murphy R.J., Tylka A.J.* et al. Physics of Solar Neutron Production: Questionable Detection of Neutrons from the 2007 December 31 Flare // *JGR.* 2011. A116. 03102.
- [Vourlidas, Ontiveros, 2009] *Vourlidas A., Ontiveros V.* A Review of Coronagraphic Observations of Shocks Driven by Coronal Mass Ejections // *Astroph. SR:0908.1996.* 2009. V. 1.
- [Wibberenz, Cane, 2006] *Wibberenz G., Cane H.V.* // *Astrophysical J.* 2006. V. 650. P. 1199–1207.
- [Zurbuchen, 2007] *Zurbuchen T.H.* A New View of the Coupling of the Sun and of the Heliosphere // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* 2007. V. 45. P. 297–338.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ГЕЛИОН ПРОЕКТА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

М. И. Веригин¹, А. П. Ремизов¹, Г. А. Котова¹, В. В. Безруких¹,
В. Трухлик², Ф. Хрушка², Г.-У. Аустер³, Л. Гуикинг³,
М. Хильхенбах⁴

¹ Учреждение российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

² Институт физики атмосферы Чешской Академии наук, Чехия, Прага

³ Институт геофизики и внеземной физики
Технического университета Брауншвейга, Германия

⁴ Институт астрономии общества Макса Планка,
Катленбург-Линдау, Германия

Для постоянных и быстрых измерений детальных энергетических и угловых спектров ионов солнечного ветра и планетного происхождения в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД предлагается установить на космический аппарат (КА) прибор «Гелион», который представляет собой электростатический анализатор сферического типа с отклоняющей дефлекторной системой, имеет небольшую массу, экономное энергопотребление и сможет надежно работать в условиях экстремальных тепловых потоков от Солнца.

Одна из основных задач проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД — изучение свойств солнечного ветра в ранее неисследованных областях вблизи Солнца и вне плоскости эклиптики. Для решения этой задачи необходимо проведение постоянных локальных наблюдений плазмы. «Гелион» представляет собой надежный прибор для быстрых измерений детальных энергетических и угловых спектров ионов солнечного ветра и планетного происхождения. Измерения с его помощью обеспечат постоянный мониторинг солнечного ветра и внесут существенный вклад в исследование:

- радиальной эволюции солнечного ветра;
- транзиентных явлений, связанных с развитием солнечной активности, таких как корональные инжекции массы и глобальные межпланетные ударные волны, распространяющиеся через всю гелиосферу;
- плазменной структуры гелиосферного токового слоя на малых гелиоцентрических расстояниях;
- взаимодействия солнечного ветра с Венерой во время пролетов вблизи этой планеты, а также уточнение механизмов формирования солнечного ветра.

Координированные дистанционные наблюдения и локальные измерения в экспериментах ГЕЛИОН, ГЕЛИОМАГ, ГЕЛИЕС и др. будут способствовать идентификации механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра.

На рис. 1 показаны возможные характеристики солнечного ветра при его измерениях. Вертикальными полосами выделена область орбиты КА, в которой прямые измерения солнечной плазмы в плоскости эклиптики никогда не проводились и могут быть впервые выполнены в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Вне

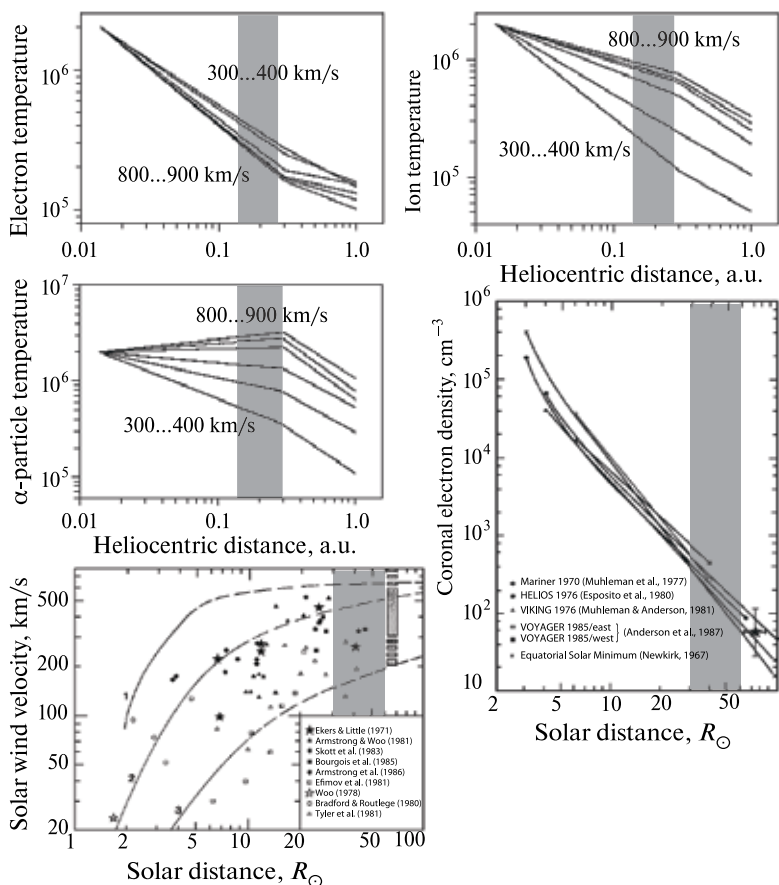


Рис. 1. Радиальные профили температуры (интерполяция между измерениями Helios-1, -2 и в солнечной короне), скорости и концентрации солнечного ветра (дистанционные измерения)

этой области вплоть до орбиты Земли прямые измерения имели место только в плоскости эклиптики более 30 лет назад на космических аппаратах Helios-1, -2. За ее пределами на гелиоцентрических расстояниях $<1,3$ а.е. прямые плазменные измерения также не проводились. Предполагается, что на расстоянии от Солнца $\sim 0,3$ а.е. солнечный ветер имеет скорость примерно такую же, как и на орбите Земли, но концентрация и температура ионов там значительно выше. Кроме того, вероятно значительное увеличение ее вариаций на малых гелиоцентрических расстояниях.

Поэтому инструмент для плазменных исследований в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД должен обеспечивать детальные измерения сложных трехмерных функций распределения в достаточно большом угле обзора ($\sim 80 \dots 100^\circ$) и широком энергетическом диапазоне (для ионов — $40 \dots 12\,000$ эВ, для электронов — $0,35 \dots 6300$ эВ), покрывающем изменения скорости и температуры ионов и электронов солнечного ветра. Прибор обязан надежно работать в условиях экстремальных тепловых потоков от Солнца.

Эксперимент ГЕЛИОН будет развитием программы ROMAP европейского проекта ROSETTA. Комплексный датчик прибора включает в себя два независимых ионных спектрометра с общей сферической отклоняющей системой и один электронный спектрометр. Макет и схема эксперимента показаны на рис. 2 и 3 соответственно. Через ионный спектрометр — внешний электростатический анализатор на рис. 3 — от входной щели до регистрирующих каналотронов, установленных на выходе, проходят

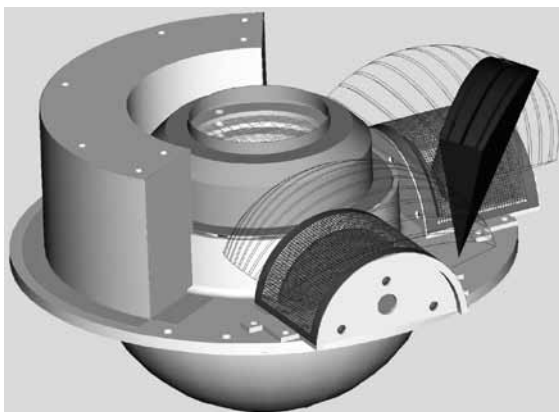


Рис. 2. Макет прибора ROMAP. Под сетками находятся входы для ионов с дефлекторными системами. Между ними вход для электронов. Приемные каналотроны находятся слева

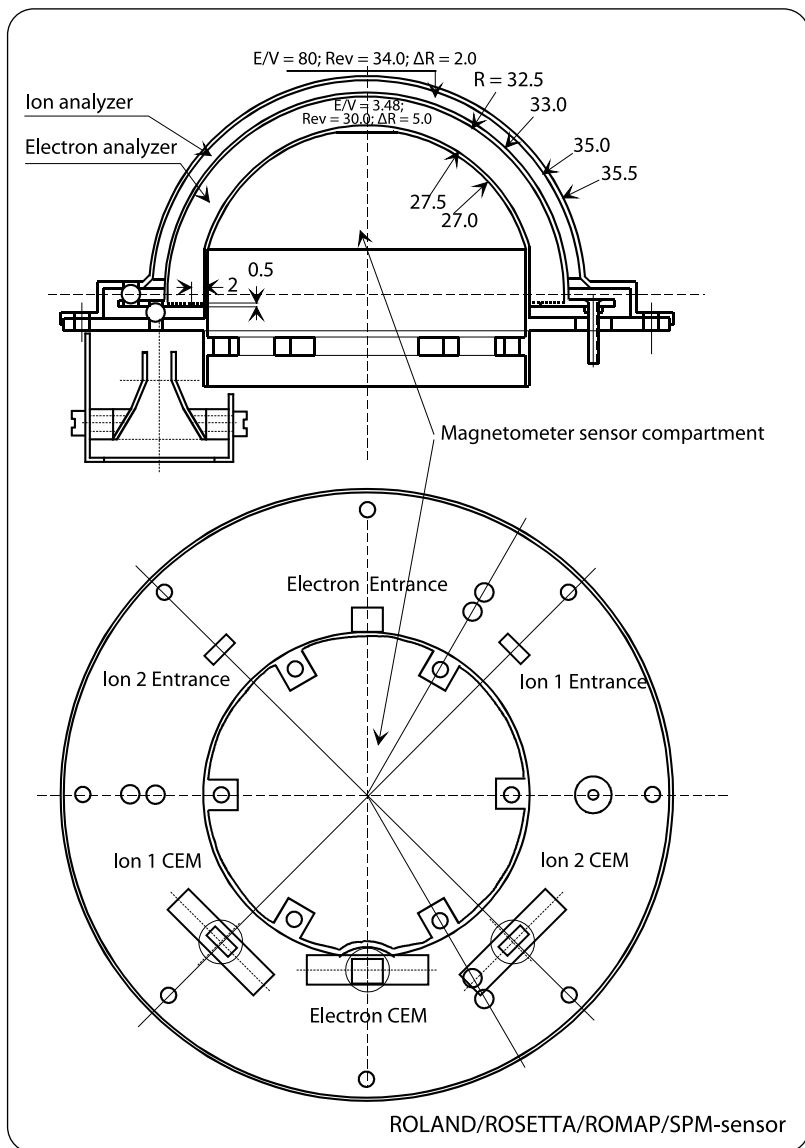


Рис. 3. Схема эксперимента ГЕЛИОН

только ионы в интервале углов и энергий, определяемых заданными напряжениями на центральном сферическом электроде и шириной зазора между электродами. Таким образом, выбираются ионы в узком диапазоне E/q (E — энергия иона; q — заряд) и узком диапазоне углов $\sim \pm 2^\circ$ в одном направлении. В другом направлении диапазон принимаемых углов достаточно большой $\sim \pm 60^\circ$ (в идеальном случае $\pm 90^\circ$, но ограничен геометрией входного отверстия и краевыми эффектами). Для прибора «Гелион» поле зрения угловой ступени — $120 \times 4^\circ$.

Перед каждым из двух ионных спектрометров установлена дефлекторная система, позволяющая отклонять угловую диаграмму каждого спектрометра в диапазоне $\pm 50^\circ$. Рисунок 4 дает представление об общем поле зрения двух энергоспектрометров. Поскольку их диаграммы направленности перпендикулярны друг другу, прибор позволяет определять угол прихода частиц. Энерге-

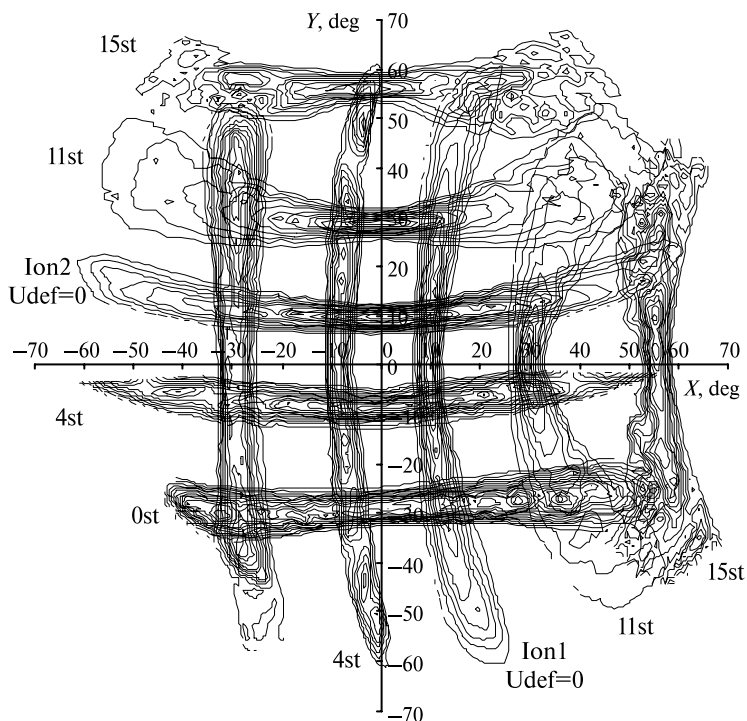


Рис. 4. Общее поле зрения двух ионных спектрометров «Гелион» при нескольких значениях дефлекторного напряжения

тический диапазон измерений для ионов составляет 40...12 000 эВ при энергетическом разрешении $\Delta E/E = 7\%$.

Через электронный спектрометр — внутренний электростатический анализатор на рис. 3 — от входной щели до регистрирующих каналотронов, установленных на выходе, проходят электроны в более широком интервале энергий: $\Delta E_e/E_e = 16\%$. Энергетический диапазон измерений спектрометра составляет 0,35...6300 эВ. Минимальное полное время измерения спектра ионов и электронов — 10 с.

На рис. 5 представлен внешний вид прибора ROMAP, прототипа используемого в эксперименте ГЕЛИОН. Прибор устанавливается на штанге для того, чтобы его поле зрения было максимально открытым. Длина штанги на космическом аппарате ROSETTA составляла 50 см. На космическом аппарате «Интергелиозонд» она выбирается так, чтобы входные отверстия спектрометров находились вне теплового экрана, а поле зрения прибора было бы максимально не затенено. При этом выходная измерительная часть (каналотроны) должна находиться под защитным тепловым экраном.

Работа датчиков прибора «Гелион» управляется отдельным блоком электроники БЭ. Основные его элементы показаны на рис. 6. Блок БЭ устанавливается на термостабилизированной платформе (СОТР) и должен нормально функционировать при температуре конструкции КА в зоне посадочных мест аппаратуры от -50 до $+50$ °С.

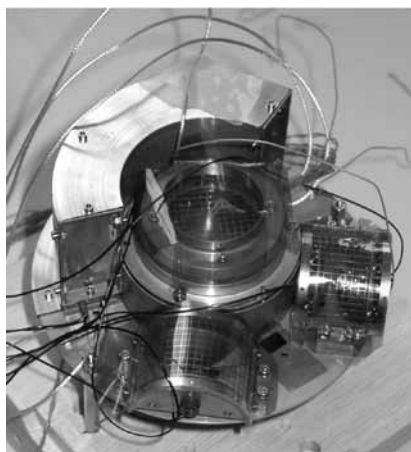


Рис. 5. Внешний вид прибора ROMAP, прототип прибора «Гелион»

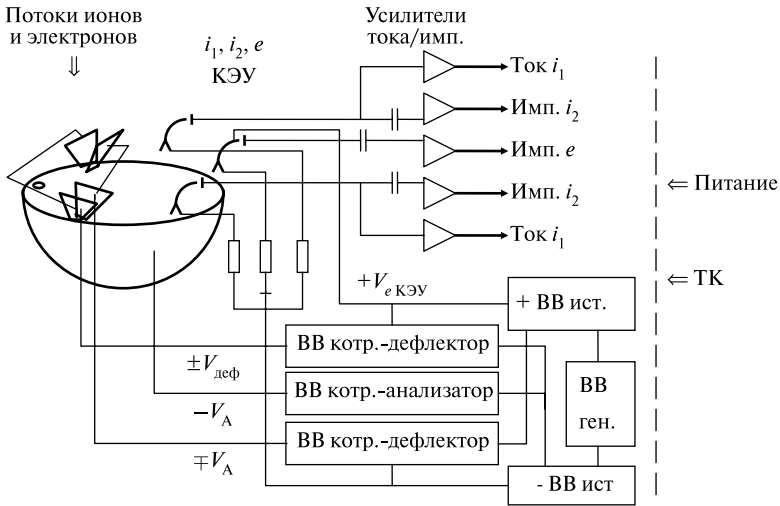


Рис. 6. Основные элементы блока электроники прибора «Гелион»

В таблице приведены основные характеристики прибора «Гелион». Вместе с блоком электроники его масса составляет ~1,5 кг. Минимальное энергопотребление — 400 мВт, максимальное — 800 мВт.

Характеристики прибора ГЕЛИОН

Характеристики	Ионы	Электроны
Входная площадь, см ²	0,06	0,17
Энергетический диапазон, эВ	40...12 000	0,35...6300
E/U	8,0	4.2
Энергетическое разрешение ($\Delta E/E$), %	7	16
Энергетические ступеньки	64/32, логарифмиче- ская шкала	64/32, логарифмиче- ская шкала
Полное поле зрения, град	120×100	15×60
Поле зрения одной угловой ступени	120×6°	
Угловые ступени	32/16, линей- ная шкала	
Геометрический фактор, см ² ·ср·кэВ	3,5·10 ⁻⁴ Е	4,3·10 ⁻³ Е
Время измерения (суммарное) / цикл	От 10 до 100 с	
Объем телеметрии (суммарный) / цикл	От 200 до 2000 байт	

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ПРОЕКТЕ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (ЭКСПЕРИМЕНТ ГЕЛИЕС)

**Р. А. Ковражкин¹, Г. А. Владимирова¹, А. Л. Глазунов¹,
Ж. -А. Сово², Ж. -Ж. Токавен²**

¹ *Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32*

² *Институт астрофизических и планетных исследований (IRAP), Франция, Тулуза*

Приводится описание эксперимента ГЕЛИЕС, предназначенного для измерения функций распределения электронов солнечного ветра и межпланетной плазмы с высоким угловым и энергетическим разрешением. Спектр электронов измеряется в диапазоне от ~ 1 эВ до 5 кэВ. Энергетическое разрешение составляет $\Delta E/E = 18\%$. В приборе используется четвертьсферический анализатор типа “top-hat”, перед которым устанавливаются электростатические дефлекторы, позволяющие собирать тепловые и сверхтепловые электроны в угловом секторе $360 \times 120^\circ$. Прибор «Гелиес» может работать в разных режимах со скоростью передачи информации 0,3...3 кбит/с; масса прибора — 3 кг, потребление — 3 Вт.

Эксперимент ГЕЛИЕС в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД предназначен для измерения функций распределения электронов солнечного ветра, плазмы межпланетной и околопланетной среды, а также продольных потоков сверхтепловых электронов.

Исследования направлены на решение следующих научных задач:

- отождествление механизмов нагрева солнечной короны и формирование солнечного ветра;
- динамика процессов в солнечном ветре и флуктуации плазмы, приводящие к преобразованию энергии частиц в волновую (альфеновские и магнитозвуковые волны);
- определение структуры токовых слоев на гелиоцентрических расстояниях среднего и малого масштабов;
- изучение корональных инжекций массы и их источников;
- изучение плазменных дискретных структур, особенно вне плоскости эклиптики, включая процессы ускорения и транспорта частиц.

Эксперимент ГЕЛИЕС направлен также на решение практической задачи, связанной с мониторингом основных параметров

солнечного ветра для целей прогноза «космической погоды». Такой мониторинг в проекте может быть подробным и долгосрочным, что повышает ценность измерений с достаточно близких расстояний от Солнца (до 60 солнечных радиусов).

Функция распределения электронов состоит из трёх компонент: тепловых частиц поверхности и сверхтепловых электронов «гало», которые регистрируются на всех питч-углах, а также сверхтепловых потоков “strahl”, наблюдаемых вдоль магнитного поля в антисолнечном направлении [Montgomery et al., 1968; Rosenbauer et al., 1977; Pilipp et al., 1987]. Регистрация пучков “strahl” в солнечном ветре будет свидетельством процессов пересоединения и выноса теплового потока от Солнца [Gosling et al., 2004]. Возможность наблюдений частиц вне области эклиптики может дать новые сведения о процессах нагрева и взрывного ускорения плазмы, а исследования пучков электронов как «трассеров» структуры и топологии межпланетного магнитного поля позволят отождествить локальные плазменные солнечные образования в полярных областях.

Прибор «Гелиес» представляет собой моноблок, состоящий из детекторной головки, электронной части и ДПУ. Интерфейс прибора включает соединения с бортовыми системами и блоком команд, а также системой сбора научной информации — ССНИ. Блок-схема детекторной части прибора представлена на рис. 1.

Электроны проходят систему дефлекторов и поступают затем на электростатический анализатор. Для того чтобы минимизировать эффекты заряда поверхности спутника и сохранять постоянное энергетическое разрешение прибора, используется подача отрицательного потенциала $-V_0$ на входную сетку дефлекторов и внешнюю пластину анализатора. Это приводит к деакселерации измеряемых электронов на величину, близкую к потенциалу космического аппарата. Дефлекторная система позволяет собирать электроны в угле $\pm 60^\circ$ по отношению к оси входа частиц в анализатор. В качестве электростатического анализатора используется четвертьсферический анализатор с дисковым полем зрения на 360° [Carlson, McFadden, 1998]. Такой анализатор был использован в спектрометрах, установленных на космических аппаратах Wind, «Интербол», Cluster, Stereo [см. Sauvaud et al., 1997; Rème et al., 2001; Sauvaud et al., 2008]. На выходе анализатора стоит кольцевой МКП-детектор шевронного типа с коэффициентом усиления $2 \cdot 10^6$, перед которым установлена сетка с потенциалом +300 В, позволяющим доускорять приходящие электроны. Эффективность детектора МКП составляет $\sim 70\%$. На дефлекторную систему подается сканирующее высокое напряжение 0...1500 В, на электростатический анализатор — напряжение 0...750 В, на

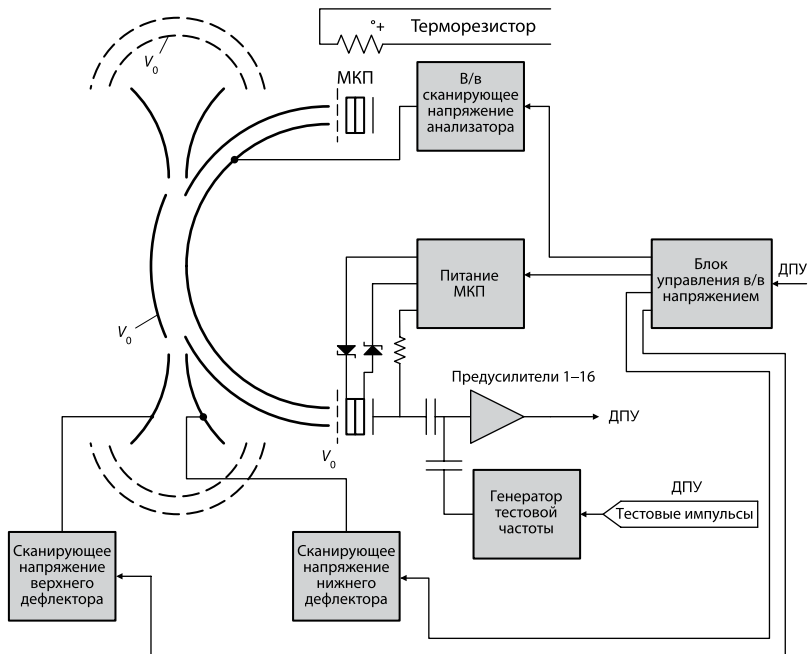


Рис. 1. Блок-схема детекторной части прибора «Гелиес»



Рис. 2. Общий вид прототипа ГЕЛИЕС

анализатор — последовательно 64 высоковольтных напряжения, распределённых по логарифмическому закону. Время снятия полного спектра электронов составляет 2 с. Дефлекторы позволяют за время нахождения анализатора на каждом энергетическом уровне последовательно получать данные в 6 угловых секторах 120° . Максимальная энергия исследуемых частиц 5 кэВ, однако получение функции распределения электронов в полном угле 120° может быть осуществлено только до энергии 2 кэВ.

На выходе МКП стоит коллекторная система, состоящая из 16 анодов. Таким образом, каждый анод собирает заряд с углового сектора, составляющего $22,5^\circ$ дискового поля зрения электростатического анализатора. Далее с анодов сигналы подаются на усилители-дискриминаторы и затем на счётчики импульсов. В приборе предусмотрена проверка и калибровка усилительного тракта от генератора тестовой частоты, подающего импульсы на вход предусилителей.

Прототип детекторной части прибора «Гелиес» использовался в проекте Stereo (детектор SWEA в составе комплекса экспериментов IMPACT [Luhmann et al., 2008]). Общий вид прототипа прибора показан на рис. 2.

Электронная часть прибора включает в себя преобразователи питания, 16 счётчиков импульсов, связанных с предусилителями, ДПУ и интерфейсы со служебными системами.

Прибор «Гелиес» может работать в нескольких режимах, отличающихся скоростью передачи информации. Она меняется от 0,3 кбит/с в «дежурном» режиме до 3 кбит/с в «особом» режиме. Режимы работы могут меняться с помощью как кодовых, так и функциональных команд.

Основные характеристики прибора

Исследуемые частицы	электроны
Диапазон измеряемых энергий	1...5000 эВ
Максимальное число энергетических уровней	64
Максимальное число угловых секторов дефлектора	6
Максимальное число анодов по $22,5^\circ$	16
Полное поле зрения	$360 \times 120^\circ$
Информативность прибора	0,3...3 кбит/с
Масса	3 кг
Потребление	3 Вт
Геометрический фактор	$8,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{эВ} / \text{эВ}$

ЛИТЕРАТУРА

- [Montgomery et al., 1968] *Montgomery M. D., Bame S. J., Hundhausen A. J.* // J. Geophysical Research. 1968. V. 73. P. 4999.
- [Rosenbauer et al., 1977] *Rosenbauer H., Schwenn R., Marsch E., Meyer B., Miggenrieder H., Montgomery M. D., Muehlaeuser K. H., Pilipp W., Voges W., Zink S. M.* // J. Geophys. 1977. V. 42. P. 561.
- [Pilipp et al., 1987] *Pilipp W. G., Miggenrieder H., Montgomery M. D., Muhlhauser K.-H., Rosenbauer H., Schwenn R.* // J. Geophysical Research. 1987. V. 92. P. 1075.
- [Gosling et al., 2004] *Gosling J. T., De Koning C. A., Skoug R. M., Steinberg J. T., McComas D. J.* // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. A05102. doi: 10.1029/2003JA010338.
- [Carlson, McFadden, 1998] *Carlson C. W., McFadden J. P.* // Measurements Techniques in Space Plasmas: Particles / Eds. Pfaff R. F., Borovsky J. E., Young D. S. Washington: AGU, 1998. P. 125–140.
- [Sauvaud et al., 1997] *Sauvaud J.-A., Koperski P., Beutier T., Barthe H., Aoustin C.* et al. // Annu. Geophys. 1997. V. 15. P. 587.
- [Rème et al., 2001] *Rème H., Aoustin C., Bosqued J. M., Dandouras I., Lavraud B.* et al. // Annu. Geophys. 2001. V. 19. P. 1303.
- [Sauvaud et al., 2008] *Sauvaud J.-A., Larson D., Aoustin C., Curtis D., Médale J.-L.* et al. // Sp. Sci. Rev. 2008. V. 136. P. 227.
- [Luhmann et al., 2008] *Luhmann J. G., Curtis D. W., Schroeder P., McCauley J., Lin R. P.* et al. // Sp. Sci. Rev. 2008. V. 136. P. 117.

ИЗУЧЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ И МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ ВБЛИЗИ СОЛНЦА В МИССИИ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (ДЕТЕКТОР ПЫЛИ ПИПИС-А)

Т. А. Шахвердян¹, О. Л. Вайсберг¹, Р. Срама²

¹ *Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32*

² *Институт ядерной физики общества Макса Планка, Германия*

Цель эксперимента — изучение пыли в Солнечной системе: химического состава, массы, зарядов частиц вблизи Солнца и их пространственного распределения. Прибор представляет собой пылевой телескоп, состоящий из измерителя траектории частиц и масс-анализатора.

ВВЕДЕНИЕ

Пыль в Солнечной системе включает в себя две компоненты — межзвездную и межпланетную.

Галактическая межзвездная пыль состоит из твердой фазы того материала, из которого образуются звезды и планетные системы. Частицы межзвездной пыли зарождаются в холодных атмосферах больших звезд или при взрывах новых и сверхновых. Ультрафиолетовое излучение, межзвёздные ударные волны и взаимные соударения уничтожают частицы в межзвездной среде. В плотных молекулярных облаках, вследствие процессов аккреции тяжелых элементов на существующие частицы и коагуляции нескольких, образуются большие частицы.

Поток межзвездной пыли в Солнечной системе был открыт космическим аппаратом (КА) «Улисс» в 1992 г. [Grün et al., 1993]. Траектория полета аппарата и направления движения частиц межзвездной пыли показаны на рис. 1. Направление прихода межзвёздной пыли примерно совпадает с направлением прихода He^0 [Landgraf et al., 2000] (рис. 2).

Межпланетная пыль образуется в результате соударения космических тел (особенно в поясе астероидов) и процессов сублимации вещества комет по мере их приближения к Солнцу. Изучение межпланетной пыли — одна из важных задач понимания эволюции Солнечной системы.

На пыль в нашей планетной системе действуют гравитация Солнца, давление солнечного излучения, сила Лоренца, вызванная движением солнечного ветра с вмороженным в него магнитным

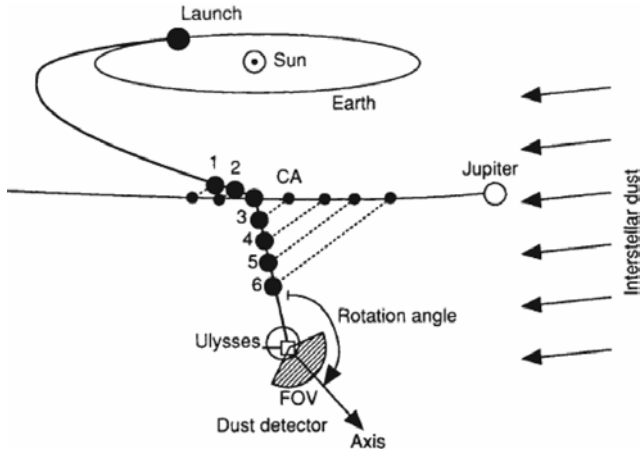


Рис. 1. Траектория полета КА «Улисс» и направление движения частиц межзвездной пыли [Grün et al., 1993]

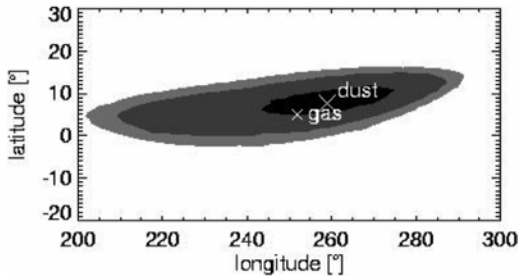


Рис. 2. Направление движения межзвездной пыли и He⁰ [Landgraf et al., 2000]

полем. Значительный вклад дает также эффект Пойнтинга–Робертсона [Robertson, 1937; Poynting, 1904].

Отличить межзвездную частицу от межпланетной можно достаточно точным определением вектора ее скорости.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение и сравнение межзвездной и межпланетной пыли — очень интересная задача, важная для лучшего понимания образования Солнечной системы и ее взаимодействия с нашей Галактикой.

Пылевые датчики устанавливаются на многих космических аппаратах. Последние данные о космической пыли на близком расстоянии от Солнца получены на КА Helios-1 [Schmidt, Gruen, 1980]. Массовое разрешение плазменного анализатора, измерявшего плазму от удара пылинок, составило $M/\Delta M = 5...10$, а диапазон масс — 16...75 а. е. м. [Dietzel et al., 1973]. Helios-1 долетел примерно до 0,3 а. е. от Солнца и зарегистрировал 235 частиц [Divine, 1993].

Учитывая, что КА «Интергелиозонд» будет приближаться на такое же расстояние и выходить за пределы плоскости эклиптики, мы намерены определить:

- характеристики отдельных частиц (массу, скорость, заряд, состав);
- пространственное распределение частиц пыли вблизи Солнца и вне плоскости эклиптики;
- вклад в динамику частиц в солнечной системе от комет, астероидов и межзвездной пыли;
- разнообразие по составу разных популяций частиц.

Так как «Интергелиозонд» будет находиться на близком расстоянии от Солнца намного дольше, чем Helios-1 и со времени работы его датчика пыли разработана более совершенная аппаратура измерения параметров пылинок, приборы ПИПЛС-А могут дать новую научно значимую информацию.

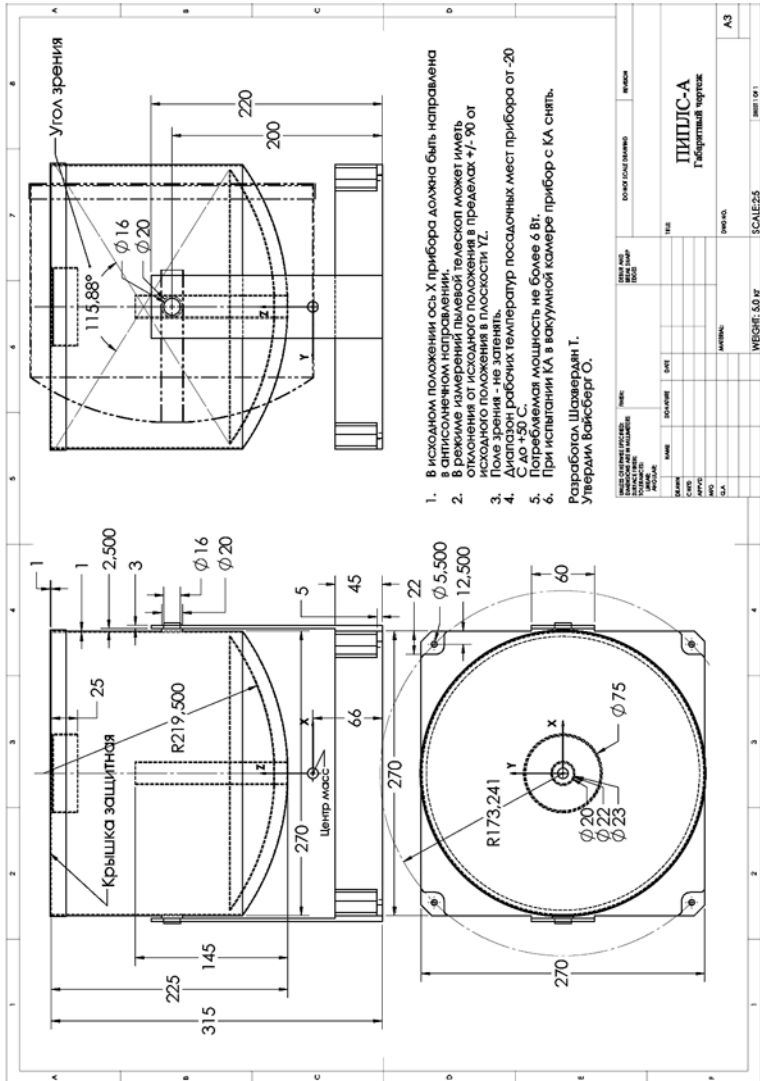
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИБОРА ПИПЛС-Б

Рассматриваются два варианта конструкции ПИПЛС-Б.

Проект первого варианта полностью разработан в ИКИ РАН (рис. 3). Прибор представляет собой времяпролетный масс-анализатор ионов. Обсуждается возможность добавления его измерителем направления прихода частицы.

Второй вариант прибора предполагает сотрудничество в его создании с Институтом ядерной физики общества Макса Планка (Max-Planck-Institut für Kernphysik, МРІК, Germany), который имеет достаточно большой опыт подобных разработок. Предлагаемая ими конструкция состоит из измерителя направления прихода пылинки и масс-анализатора.

Вектор скорости падающей частицы будет определяться в приборе по измерениям координат и времени ее прохождения через два последовательно расположенных сенсора положения. Каждый из сенсоров состоит из двух плоскостей с параллельными



проводами, которые в разных плоскостях перпендикулярны друг другу. Проходя через два сенсора положения, заряженная частица индуцирует в ближайших проводах заряды. Измеряя эти заряды и промежутки по времени между их появлением, можно определить вектор скорости частицы [Srama et al., 2005] (рис. 4).

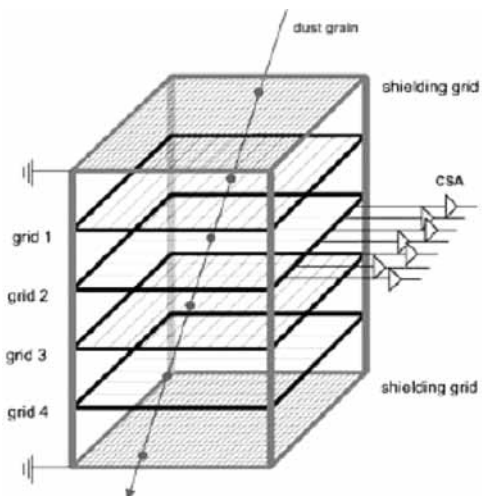


Рис. 4. Измеритель вектора скорости [Srama et al., 2005]

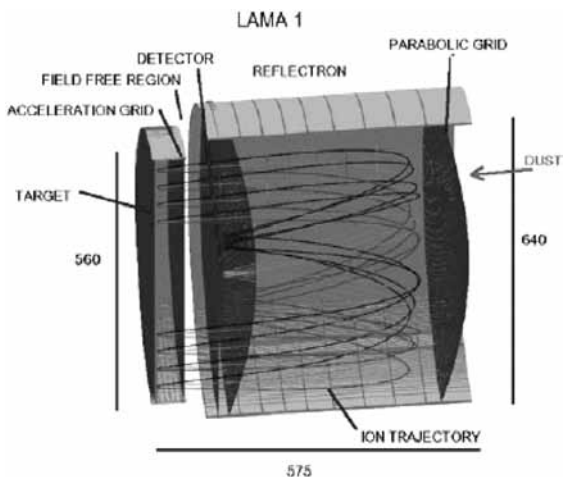


Рис. 5. Времяпролетный масс-анализатор ионов [Srama et al., 2005]

После измерителя вектора скорости частица попадает в масс-анализатор, где соударяется с мишенью и испаряется, образуя плазменное облако. Химический состав частицы определяется с помощью времяпролетного масс-анализатора ионов [Sgama et al., 2005] (рис. 5).

Варианты приборов имеют ряд отличий:

- первый имеет платформу для поворота всего датчика в угловом интервале от -90 до $+90^\circ$;
- различные конфигурации электрических полей в масс-анализаторах;
- второй, в отличие от первого, создан и многократно испытан.

Технические характеристики прибора, разработанного в МРІК

Измеряемые параметры.	Масса, скорость, заряд, поток, состав
Диапазон масс	$10^{-16} \dots 10^{-6}$ г
Диапазон скоростей	5...100 км/с
Погрешность измерения вектора скорости . . .	10° , 10 %
Массовое разрешение спектрометра	$M/\Delta M > 100$
Поток	$10^{-6} \dots 10$ с $^{-1}$
Чувствительная площадь	110 см 2
Поле зрения	45° (половина угла конуса)
Масса	1,8 кг
Мощность	9,8 Вт
Поток данных	1 кбит/с

На данный момент идет обсуждение сотрудничества с МРІК. Вариантов сотрудничества несколько:

- Германия разрабатывает и изготавливает какую-то часть российского прибора;
- прибор создается полностью в России, а Германия предоставляет только концепцию прибора;
- Германия участвует в научном планировании и анализе/моделировании данных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор ПИПЛС-А предназначен для измерения параметров пылинок (массы, скорости, заряда, потока, состава) с целью выяснения пространственного распределения частиц пыли вблизи Солнца и вне плоскости эклиптики; вклада в динамику частиц в Солнечной системе со стороны комет, астероидов и межзвездной пыли; разнообразия по составу разных популяций частиц.

В настоящее время ведется работа над собственной концепцией прибора, а также обсуждаются варианты сотрудничества в его создании с Институтом ядерной физики общества Макса Планка (МРИК).

ЛИТЕРАТУРА

- [Grün et al., 1993] *Grün E.* et al. Discovery of Jovian Dust Streams and Interstellar Grains by the Ulysses Spacecraft // *Nature*. 1993. V. 362. N. 6419. P. 428–430.
- [Landgraf et al., 2000] *Landgraf M., Baggaley W.J., Grün E., Krüger H., Linkert G.* Aspects of the Mass Distribution of Interstellar Dust Grains in the Solar System from in Situ Measurements // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. N. 5. P. 10343–10352.
- [Robertson, 1937] *Robertson H.* Dynamical Effects of Radiation in the Solar System // *Monthly Notices of the Royal Astronomical*. 1937.
- [Poynting, 1904] *Poynting J.* Radiation in the Solar System: its Effect on Temperature and its Pressure on Small Bodies // *Transactions of the Royal Society of*. 1904.
- [Schmidt, Gruen, 1980] *Schmidt K., Gruen E.* Orbital Elements of Micrometeoroids Detected by the HELIOS 1 Space Probe in the Inner Solar System // *Solid Particles in the Solar System*. 1980. V. 90. P. 321–324.
- [Dietzel et al., 1973] *Dietzel H., Eichhorn G., Fechtig H., Grün E., Hoffmann H.-J., Kissel J.* The HEOS 2 and HELIOS Micrometeoroid Experiments // *J. Physics E: Scientific Instruments*. 1973. V. 6. N. 3. P. 209–217.
- [Divine, 1993] *Divine N.* Five Populations of Interplanetary Meteoroids // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. N. 9. P. 17029–17048.
- [Srama et al., 2005] *Srama R.* et al. Development of an Advanced Dust Telescope // *Earth, Moon, and Planets*. 2005. V. 95. N. 1–4. P. 211–220.

**ИЗУЧЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО
СОСТОЯНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
В МИССИИ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД
(АНАЛИЗАТОР ИОНОВ ПИПЛС-Б)**

**О. Л. Вайсберг, Г. В. Койнаш, П. П. Моисеев, В. В. Летуновский,
А. К. Тоньшев, С. Н. Подколзин, А. Ю. Шестаков, Р. Н. Журавлев,
Т. А. Шахвердян**

*Учреждение Российской академии наук Институт космических
исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, Москва,
Профсоюзная, 84/32*

Представлен панорамный энерго-масс-анализатор ПИПЛС-Б для изучения ионизационного состояния солнечного ветра. За основу взята электронно-оптическая схема прибора ДИ-АРИЕС. Планируется модификация оптической схемы для выполнения поставленных научных задач в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД.

ВВЕДЕНИЕ

Цель эксперимента — изучение ионизационного состояния солнечного ветра. Известно, что его распределение происходит в короне вблизи Солнца, что позволяет определить электронную температуру в ней. Подобные измерения дают возможность связать наблюдаемые потоки солнечного ветра с его источниками на основе моделей ускорения и распространения с использованием наблюдений солнечного ветра и оптических изображений Солнца и короны.

Для проведения этих исследований предлагается прибор ПИПЛС-Б, представляющий собой дальнейшее развитие разработанного для проекта ФОБОС-ГРУНТ панорамного энерго-масс-анализатора ДИ. Прибор будет модифицирован для решения задач измерений солнечного ветра в части угла зрения, диапазона энергии, массового разрешения и ионного состава.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения относительного содержания и ионизационного состояния малых составляющих солнечного ветра (O, Si, Fe и др.) — важный источник решения таких задач, как локализация областей в солнечной короне наблюдаемых потоков солнечного ветра [Geiss и др., 1995] Состав тяжелых ионов и параметры плазмы

определяются источниками в солнечной короне. Эти данные, а также функции распределения ионов по скоростям позволяют исследовать механизмы ускорения солнечного ветра. Пример измерения ионного и ионизационного состава солнечного ветра с временным разрешением порядка нескольких часов [Galvin et al., 1992] показан на рис. 1.

Измерения ионизационного состояния солнечного ветра дают возможность определять и электронную температуру T_e солнечной короны.

Задачи эксперимента с прибором ПИПЛС-Б:

- измерение массового состава солнечного ветра;
- изучение его источников и механизмов нагрева ионных компонентов;
- измерение электронной температуры короны.

Для решения этих задач необходимо измерять состав солнечного ветра и распределение по скоростям протонов, He^{2+} , O^{6+} , O^{5+} , O^{4+} , ионов Fe^1 с временным разрешением от нескольких часов до долей часа.

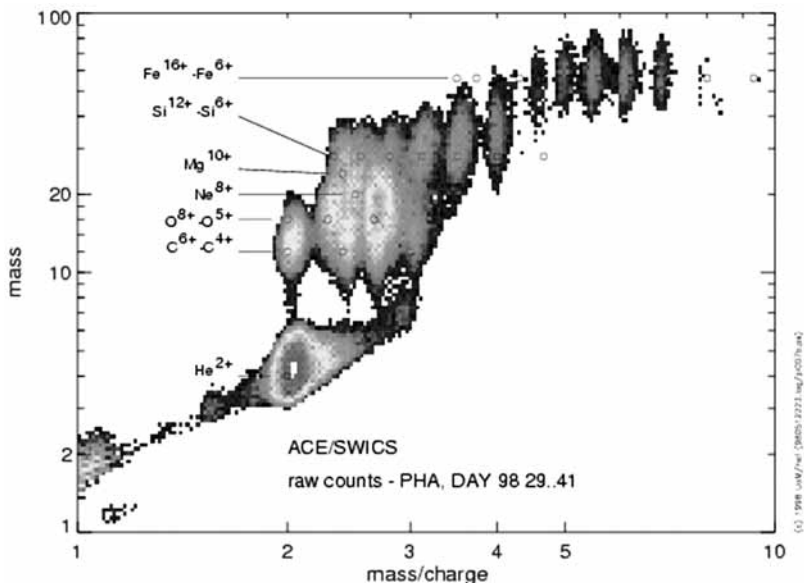


Рис. 1 Пример распределения ионов солнечного ветра по шкале масс и массы к заряду (ACE SWICS)

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИБОРА ПИПЛС-Б

В рамках научной программы проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД планируется модифицировать схему прибора ДИ, использованную в проектах ФОБОС-ГРУНТ [Вайсберг и др., 2010], ЛУНА-РЕСУРС и ЛУНА-ГЛОБ. Эта схема основана на концепции широкоугольного электростатического зеркала [Вайсберг и др., 2005], которое позволяет преобразовывать распределение в широком полярном угле $\sim 90^\circ$ в удобное для анализа распределение по полярному углу $\sim 10^\circ$. Дополненная времяпролетной схемой, она дает возможность проводить измерение состава и функции распределения по скоростям ионов потока одновременно в широком угле зрения $\sim 2\pi$. Для исследования только состава солнечного ветра прибору ПИПЛС-Б не требуется такого большого поля зрения. Достаточно проводить измерения в телесном угле $\sim 0,5 \dots 1,0\pi$. Оптическая схема прибора ДИ-АРИЕС представлена на рис. 2.

Электронная оптика прибора ДИ-АРИЕС с датчиком МКП в разрезе показана на рис. 3.

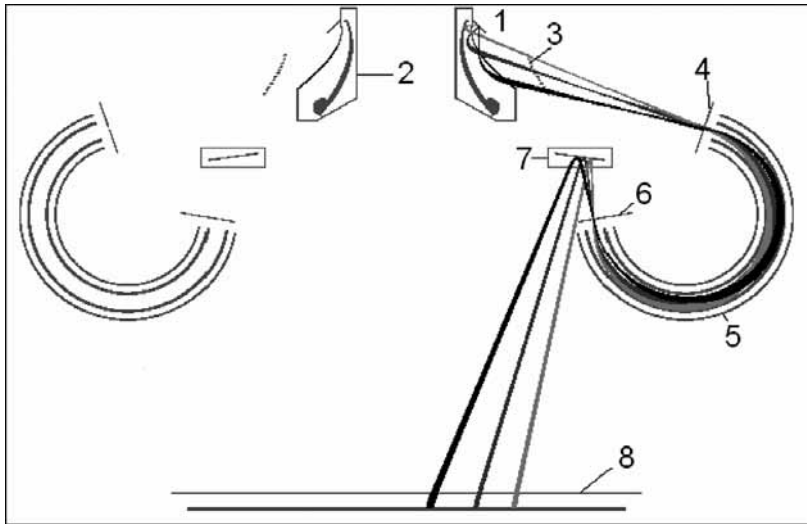


Рис. 2. Электронно-оптическая схема прибора ДИ:

1 — входное окно; 2 — изображающее зеркало; 3 — гейт; 4 — входное окно торового анализатора; 5 — торовый анализатор; 6 — выходная диафрагма торового анализатора; 7 — вторичное зеркало; 8 — МКП-детектор

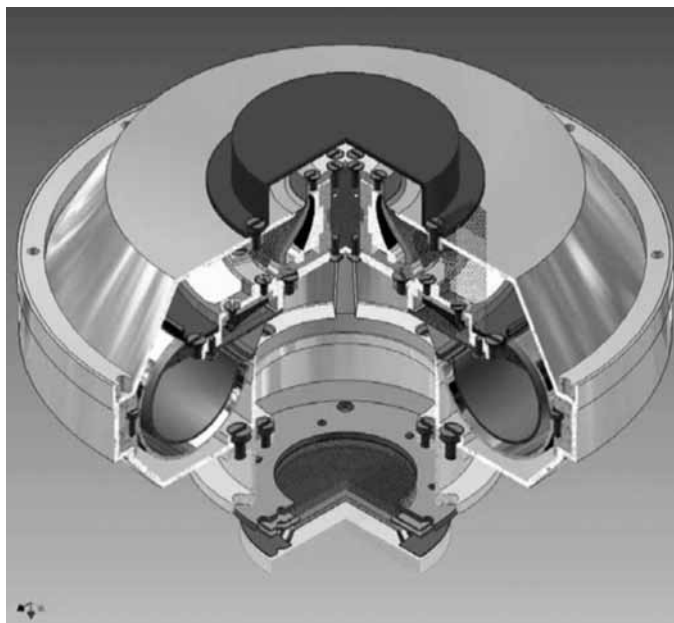


Рис. 3. Конструкция прибора ДИ

Технические характеристики прибора ПИПЛС-Б

Угол зрения	~0,5л ср
Массовое разрешение (М/ΔМ)	> 10
Определение ионизационного состояния: . . .	He ⁺¹ ... He ⁺² O ⁺⁵ ... O ⁺⁸ Si ⁺⁶ ... Si ⁺¹² Fe ⁺⁶ ... Fe ⁺²⁰
Энергетический диапазон.	0,1...10 кэВ/ч
Энергетическое разрешение.	8 %
Временное разрешение	<1 ч
Угловое разрешение.	5°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор ПИПЛС-Б предназначен для измерения ионного состава солнечного ветра с целью исследования источников солнечного ветра в солнечной короне в рамках научной программы проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Данные об ионном составе и соотношении ионизационного состояния ионов тяжелых элементов в солнечном

ветре позволят определить зависимость между переносом энергии от Солнца и солнечным ветром; провести прямые измерения продуктов солнечных вспышек в результате корональных выбросов масс и откроют фундаментальные процессы, посредством которых межпланетные ударные волны ускоряют ионы.

ЛИТЕРАТУРА

- [Вайсберг и др., 2005] *Вайсберг О.Л., Аванов Л.А., Лейбов А.В.* и др., Панорамный плазменный спектрометр — камера всего неба для заряженных частиц // Космич. исслед. 2005. Т. 43. № 5. С. 390–394.
- [Вайсберг и др., 2010] *Вайсберг О.Л., Койнаш Г.В., Моисеев П.П., Аванов Л.А., Смирнов В.Н., Летуновский В.В., Мягких В.Д., Тоньшев А.К., Лейбов А.В., Скальский А.А., Березанский Д.П., Горн Л.С., Коновалов А.А.* Панорамный энерго-масс-спектрометр ионов для проекта ФОБОС-ГРУНТ // Астрон. вест. 2010. Т. 44. № 5. С. 485–497.
- [Galvin et al., 1992] *Galvin A. B., Ipavich F. M., Gloeckler G., von Steiger R., Wiken B.* Silicon and Oxygen Charge State Distributions and Relative Abundances in the Solar Wind Measured by SWICS on ULYSSES // Solar Wind Seven: Proc. 3rd COSPAR Colloquium. Goslar, Germany / Eds. Marsch E., Schwenn R. 1992. P. 337–340.
- [Geiss et al., 1995] *Geiss J., Gloeckler G., von Steiger R.* Origin of the Solar Wind from Composition Data // Space Sci. Rev. 1995. V. 72. N. 49.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ИМВЭ

А. А. Скальский¹, Г. Н. Застенкер¹, Н. Л. Бородкова¹,
К. В. Ануфрейчик¹, И. А. Добровольский¹, С. И. Климов¹,
А. А. Петрукович¹, Н. Е. Рыбьева¹, В. В. Храпченков¹,
З. Немечек², Я. Шафранкова², Л. Прех²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, Москва, 117997,
Профсоюзная, 84/32

² Карлов Университет, Прага, Чешская республика

Основные задачи интегрированного магнитно-волнового эксперимента ИМВЭ — систематическое изучение пространственно-временной динамики мелкомасштабных и среднемасштабных структур межпланетной среды в ходе длительного полета космического аппарата (КА) «Интергелиозонд» от Земли в сторону Солнца, сравнительный анализ особенностей этих структур в зависимости от гелиошироты; исследование турбулентности межпланетной среды в области высоких частот, включая измерение флуктуаций различных параметров в мало изученном диапазоне 0,1...30 Гц; оценка таких аспектов флуктуаций как частотный спектр, перемежаемость, перераспределение энергии по спектру колебаний.

Для проведения исследований разработан приборный комплекс ИМВЭ, включающий в себя датчик низкочастотного магнитного поля (ДНМП-И), датчики высокочастотного магнитного поля (ДВМП-И), датчики потока ионов (БМСВ-И) и модуль электроники. Эксперимент предназначен для измерения параметров межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра: магнитных полей и волн в диапазоне частот до 1 МГц; энергетических спектров потока ионов в диапазоне 0,2...4,0 кэВ; величины и направления переносной скорости потока протонов; температуры протонов и плотности плазмы, а также, при определенных условиях в солнечном ветре, содержания и параметров потока ионов гелия. Предполагается, что временное разрешение этих измерений составит от 0,5 до 1,5 с для энергетического спектра потока ионов, величин переносной скорости, ионной температуры и плотности плазмы и 30 мс для вектора магнитного поля, величины и двух углов прихода потока ионов.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, протекающие в плазме солнечной короны и солнечного ветра (СВ), играют одну из основных ролей в передаче энергии Солнца к Земле. Из-за бесстолкновительного характера плазмы

короны трансформация и диссипация потоков энергии осуществляются не за счет соударений между частицами, а в результате взаимодействия частиц с электромагнитными полями. Это обуславливает необходимость проведения надежных и по возможности полных измерений флуктуаций плазмы, магнитного и электрического полей в широком диапазоне частот.

1. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА ИМВЭ

Научные задачи, которые предполагается решать с помощью эксперимента ИМВЭ, можно разделить на несколько групп.

К первой относится изучение пространственно-временной динамики мелкомасштабных и среднемасштабных структур в межпланетной среде.

Проблема динамики этих структур представляется весьма важной, так как они непосредственно влияют на космическую погоду. Структура потока плазмы солнечного ветра в основном определяется условиями его истечения из солнечной короны. Считается, что большая их часть рождается в короне Солнца при генерации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). Какая-то часть может создаваться процессами в самой межпланетной среде при движении от Солнца. Однако эти процессы изучены недостаточно.

Свойства солнечного ветра меняются в зависимости от расстояния от Солнца, гелиодолготы и гелиошироты. Некоторые пространственные вариации могут быть следствием расширения СВ. Другие представляют собой результаты динамических процессов при расширении, третьи отражают изменения, связанные с его источником. Наблюдения пространственных и временных вариаций структур магнитного поля и плазмы, в зависимости от гелиошироты и гелиоцентрического расстояния на всех этапах полета КА «Интергелиозонд», позволяют исследовать малоизученные до сих пор свойства солнечного ветра и помогут найти ответ на ряд глобальных вопросов в механизмах переноса энергии СВ.

Для решения поставленной задачи важно сопоставление одновременных систематических наблюдений параметров межпланетной среды в точках, достаточно далеко отстоящих друг от друга. Однако несмотря на довольно большое число работавших в гелиосфере КА до сих пор получено слишком мало результатов такого сопоставления. Это связано, главным образом, с недостаточно хорошим временным разрешением проводившихся

измерений. Необходимые данные могут быть получены в ходе измерений СВ и ММП с помощью однотипных приборов, обладающих высоким временным разрешением и работающих одновременно вблизи Земли (проекты СПЕКТР-Р, ЛУНА-ГЛОБ), на трассе Земля – Венера (проект ВЕНЕРА-Д) и около Солнца (проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД). Можно утверждать, что, будучи проведенными, такие измерения внесут существенный вклад в решение проблемы.

Одно из важных свойств солнечного ветра — наличие в нем очень резких границ, обрамляющих структуры плотности СВ среднего и малого масштабов, которые встречаются довольно часто и имеют протяженность всего лишь в десятки и даже единицы гирорадиусов протонов. Эти резкие изменения плотности активно воздействуют на магнитосферу Земли. Изучение свойств и места таких явлений в общей картине СВ, особенностей параметров плазмы и магнитного поля на границах этих структур, ориентации их в пространстве представляются важными научными задачами эксперимента ИМВЭ.

К другим структурам в солнечном ветре, имеющим резкие границы, относятся ударные волны, тангенциальные и вращательные разрывы. Диссипация энергии СВ на разрывах происходит через генерацию колебаний плазмы, поэтому для исследования таких объектов необходимы измерения волновой формы колебаний и значений потока плазмы в диапазоне частот до 100 Гц. Измерения флуктуаций полного потока плазмы, по сути, единственный способ получения каких-либо характеристик заряженных частиц плазмы с требуемым временным разрешением.

Другая, не менее важная, группа задач связана с исследованием турбулентности межпланетной среды в области высоких частот.

Получение параметров плазмы с высоким разрешением, как в предлагаемом эксперименте, в сочетании с таким же быстрым измерением параметров межпланетного магнитного поля позволит на более высоком уровне экспериментально исследовать проблемы турбулентности межпланетной среды в очень мало изученном в части флуктуаций плазмы диапазоне частот 0,1...30 Гц. При этом предполагается исследовать такие аспекты этих флуктуаций как частотный спектр, перемежаемость, перераспределение энергии по спектру колебаний и т. п.

И, наконец, мониторингирование вектора межпланетного магнитного поля и основных параметров плазмы солнечного ветра (величины и направления переносной скорости, ионной температуры и плотности) для прогнозирования космической погоды — одна из приоритетных научных задач эксперимента ИМВЭ.

2. ПРИБОРНЫЙ СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Эксперимент ИМВЭ включает следующие датчики и блоки.

Датчик низкочастотного магнитного поля (ДНМП-И). Датчик представляет собой трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, предназначенный для измерения квазипостоянного магнитного поля в частотном диапазоне до 100 Гц и многократно применявшийся в предыдущих космических экспериментах.

Датчики высокочастотного магнитного поля (ДВМП-И). Предполагается установка нескольких (желательно трех) однокомпонентных индукционных датчиков. Аналогичные датчики хорошо отработаны в космических экспериментах. Данный вариант отличается расширенным и сдвинутым в область высоких частот диапазоном измерений.

Датчики потока ионов (БМСВ-И). Каждый из шести датчиков представляет собой цилиндр Фарадея. Датчики позволяют измерять энергетический спектр потока ионов в диапазоне 0,2...5,0 кэВ, величину и направление переносной скорости ионов, ионную температуру и плотность плазмы с временным разрешением от 0,03 до 1,5 с. Для определения направления на Солнце в состав БМСВ-И входит прибор ДСС (датчик направления на Солнце).

Модуль электроники (БЭ ИМВЭ) включает блоки:

- интерфейсов (измерителей) к датчикам эксперимента;
- аналоговой электроники с набором усилителей и полосовых фильтров, предназначенных для подготовки сигналов к оцифровке;
- аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) для оцифровки параметров, передающихся непосредственно в телеметрию;
- спектрального анализа для вычисления частотных спектров в диапазоне частот, не передающихся в телеметрию в волновой форме;
- электроники для цифровой обработки данных и форматирования телеметрических кадров;
- источника вторичного питания для выдачи необходимых сигналов на датчики.

В табл. 1 и 2 приведены диапазоны частот измерений различными датчиками и предварительные технические характеристики блоков, входящих в состав ИМВЭ.

Таблица 1

Измерительные характеристики датчиков

Датчики	Чувствительность измерений	Частотный диапазон
ДНМП-И	0,01 нТ	0...100 Гц
ДВМП-И	10^{-6} нТ/Гц ^{1/2}	0,1...100 кГц
БМСВ-И	$1 \cdot 10^{10}$ см ⁻² с ⁻¹	0...100 Гц

Таблица 2

Предварительные технические характеристики блоков

Блоки	Количество	Масса, г	Габариты, мм	Мощность, Вт
ДНМП-И	1	<100	Ш30×47	—
ДВМП-И	2...3	~400	300×10×10	—
БМСВ-И	1	3000	400×400×100	4
ДСС-И	1	200	100×2×5	0,2
БЭ ИМВЭ	1	3000	200×100×100	7,8
Итого		Не более 7000		Не более 12

2.1. Датчики ДНМП-И

Среди различных типов магнитометров, используемых для измерения постоянного и низкочастотного магнитных полей, феррозондовые магнитометры (ФЗМ) оказываются наиболее пригодными для получения хороших результатов при относительно низкой стоимости. Они используются практически в каждом космическом аппарате либо для ориентации, либо для научных целей.

Принцип работы феррозондового магнитометра заключается в следующем. При отсутствии внешнего магнитного поля переменный магнитный поток в сердечнике, задаваемый обмоткой возбуждения, распределен относительно сигнальной обмотки симметрично. Поэтому суммарный переменный магнитный поток, пронизывающий сигнальную обмотку, равен нулю и в ней ЭДС не наводится. Отметим, что под воздействием поля возбуждения сердечник доводится до глубокого насыщения дважды за период возбуждения.

При воздействии внешнего постоянного магнитного поля происходит намагничивание сердечника, причем намагничиваются, главным образом, его части, продольные по отношению к измеряемому полю. Внешнее магнитное поле вносит асимметрию в распределение суммарного магнитного потока, увеличивая в каждый полупериод возбуждения поток в одном направлении



Рис. 1. Прототип датчика ДНМП-И — датчик ДНМП прибора ММФФ (проект СПЕКТР-Р)



Рис. 2. Прототип датчика ДВМП-И — датчик ДВМП прибора ММФФ (проект СПЕКТР-Р)

и уменьшая его в противоположном направлении. Такой характер распределения магнитного потока сохраняется и по отношению к каждому поперечному сечению сигнальной обмотки. Это вызывает появление четных гармоник в магнитном потоке, понижающем измерительную обмотку, в которой наводятся ЭДС тех же гармоник. Амплитуды их ЭДС пропорциональны проекции внешнего измеряемого поля на ось сигнальной обмотки.

На рис. 1 показан прототип феррозондового магнитометра ДНМП, установленного на КА «Спектр-Р».

2.2. Датчики ДВМП-И

Каждый из трех датчиков ДВМП-И представляет собой однокомпонентный индукционный магнитометр для измерения вариаций магнитного поля. Датчик состоит из магнитного сердечника, измерительной обмотки (ИО) и обмотки обратной связи (ООС), размещенных на сердечнике. Корпус датчика выполнен из диэлектрического материала с электростатическим экраном. На рис. 2 представлен прототип индукционного магнитометра датчик ДВМП, установленного на КА «Спектр-Р».

Сердечник индукционного магнитометра выполнен из пермаллового аморфного сплава, прошедшего специальную термообработку и сформированного в виде полого цилиндра.

На каркасе сердечника равномерно намотана однорядная обмотка ООС и закреплены вертикальные перегородки, которые совместно с сердечником образуют секционированный каркас ИО. В секциях уложены измерительные витки этой обмотки.

2.3. ДАТЧИКИ ПОТОКА ИОНОВ БМСВ-И

Принцип действия прибора БМСВ-И основан на сравнении одновременных измерений потока ионов плазмы, выполненных с помощью набора датчиков — малогабаритных интегральных цилиндров Фарадея. В состав прибора будут входить 6 таких датчиков, отличающихся различной ориентацией относительно вектора потока плазмы и различной величиной запирающего ионы положительного напряжения на их управляющих сетках.

Прототип БМСВ-И — прибор БМСВ, разработанный для измерений солнечного ветра и плазмы в магнитосфере Земли в проекте СПЕКТР-Р. Внешний вид прототипа (основного блока) приведен на рис. 3. БМСВ выполнен в виде моноблока, на верхней крышке которого находятся шесть датчиков, а в корпусе размещены узлы электроники: высокочувствительные широкодиапазонные усилители постоянного тока УПТ, высокоточные АЦП, генераторы постоянных и пилообразных управляющих напряжений, узел расшифровки числовых управляющих команд, узел формирования выходного кадра, дублированные источники питания.

При необходимости основной блок прибора БМСВ-И может быть дополнен собственным малогабаритным цифровым датчиком направления на Солнце (ДСС-И), выполненным в виде отдельного небольшого блока. Преимуществами прибора БМСВ-И считаются возможность абсолютных измерений потоков плазмы,



Рис. 3. Основной блок прототипа прибора БМСВ

их рекордно высокое временное разрешение и высокая степень надежности, определяемая резервированием всех узлов электроники, а также большое время жизни.

Датчики потока ионов БМСВ-И измеряют следующие физические параметры:

- энергетическое распределение потока ионов — в пределах 0,2...5,0 кэВ;
- полный поток ионов плазмы — в пределах от $5 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (см. пример на рис. 4 и 5);
- два угла прихода потока ионов в пределах от нуля до $\pm 40^\circ$ от оси прибора;
- переносная скорость потока плазмы в пределах от 200 до 850 км/с;
- ионная (изотропная) температура в пределах от 1 до 100 эВ;
- плотность плазмы в пределах от 0,1 до 200 част/см³.

Следует отметить, что хотя прибор БМСВ-И не является масс-спектрометром, предполагается с его помощью проводить измерения скорости, температуры и концентрации ионов гелия в составе солнечного ветра. Из интегрального энергетического

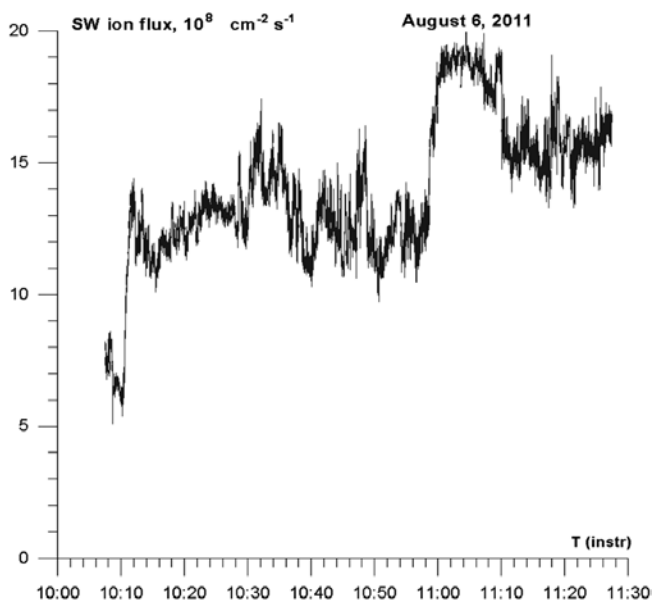


Рис. 4. Поток ионов солнечного ветра, зарегистрированный 6 августа 2011 г. прибором БМСВ

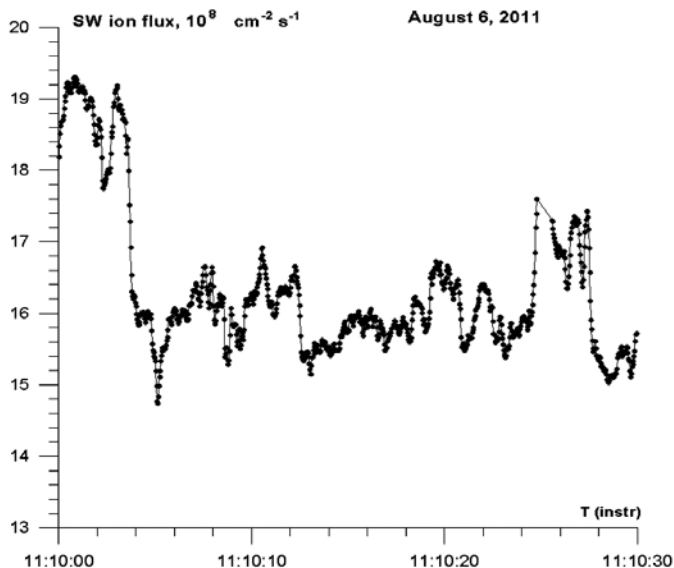


Рис. 5. Вариации потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные прибором БМСВ с высоким временным разрешением

спектра потока ионов пик ионов гелия возможно удастся выделить при определенных условиях в солнечном ветре: низкой скорости и температуре протонов солнечного ветра.

2.4. МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОНИКИ БЭ ИМВЭ

Модуль электроники состоит из пяти блоков: феррозондового магнитометра, индукционных датчиков, процессора, блоков управления и питания.

В состав блока управления входят:

- тактовый генератор;
- программируемая логическая интегральная микросхема (ПЛИС);
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- набор входных и выходных интерфейсов (интерфейсы RS-422/485).

Для формирования сигналов управления микросхемами ОЗУ и интерфейсов используется ПЛИС, установленная в блоке управления.

В состав блока питания входят:

- источник вторичного электропитания;
- фильтр и схема ограничения пускового тока;
- ключи и реле для коммутации электропитания на блоки датчиков;
- источники вторичного электропитания для блоков датчиков.

В состав блока процессора входят:

- процессор;
- АЦП;
- набор интерфейсов к блоку питания и блоку управления.

Включение БЭ ИМВЭ осуществляется подачей на модуль питания 28 В через фильтр и схему ограничения пускового тока. Модуль питания сразу запрашивает блоки управления и процессора. Блок управления подает команду в коммутатор питания на выдачу напряжения в один или несколько блоков датчиков.

Блок феррозондового магнитометра и блок индукционных датчиков обеспечивают работу датчиков ДНМП и ДВМП.

БЭ ИМВЭ выполнен в виде моноблока. Входящие в него блоки представляют собой платы, каждая из которых имеет соответствующие соединения с блочными разъемами, установленными на передней стенке моноблока. Соединение между платами осуществляется жгутами. На рис. 6 представлен прототип модуля электроники ИМВЭ — БЭ прибора ММФФ, установленного на КА «Спектр-Р».



Рис. 6. Прототип блока электроники БЭ ИМВЭ — блок БЭ ММФФ (проект СПЕКТР-Р)

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА ИМВЭ, ЦИКЛОГРАММА РАБОТЫ

Прибор имеет два независимых выхода на систему сбора научной информации. В аналоговую ТМС космического аппарата поступает 15 сигналов в диапазоне 0...6 В от БЭ ИМВЭ. Адреса команд и цифровых массивов БМСВ-И и БЭ ИМВЭ должны быть разными.

Прибор ИМВЭ имеет несколько режимов работы (табл. 3):

- стандартный режим (**С**) — измерения оптимального набора параметров по ходу полета, в наиболее интересные моменты, с записью в бортовую память и/или в режиме непосредственной передачи;
- быстрый режим (**Б**) — кратковременные включения с записью в бортовую память;
- медленный режим (**М**) — работа в условиях ограниченных ресурсов телеметрии для обеспечения непрерывных (мониторинговых) измерений.

Таблица 3

Примерные характеристики режимов

Режим	Параметры		
	Опрос волновой формы, Гц	Опрос спектров, Гц	Информативность режимов, кбит/с
С	30	1	5...8
Б	300	1	100
М	1	0,01	0,2...0,5

В режиме непосредственной передачи должен использоваться режим **С**.

Эксперименту не требуется оперативного управления, но необходима подача наборов команд в сеансах связи. Набор команд по смене режима может включать в себя около 100 командных слов. Возможно применение макрокоманд.

Эксперименту требуется привязка по времени с точностью до 1 мс.

Датчики ДВМП-И и ДНМП-И могут работать непрерывно после запуска на всех этапах миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Датчики потока плазмы БМСВ-И включаются через 2...3 недели после запуска и также могут работать непрерывно.

4. РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКОВ И БЛОКОВ ЭКСПЕРИМЕНТА, ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОВому РЕЖИМУ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Датчик низкочастотного магнитного поля ДНМП-И должен устанавливаться на штанге в тени и как можно дальше от КА (не менее 5 м).

Датчики высокочастотного магнитного поля ДВМП-И устанавливаются также на штанге в тени. Оси датчиков должны быть взаимно перпендикулярны.

Исходя из поставленных задач предполагается размещение датчиков потока плазмы БМСВ-И на внешней поверхности КА «Интергелиозонд» под тепловым экраном. При этом необходимо обеспечить ориентацию прибора его главной осью на Солнце с точностью не хуже $\pm 10^\circ$. Входное отверстие солнечного датчика ДСС должно быть освещено Солнцем.

Блок электроники БЭ ИМВЭ размещается под тепловым экраном и не имеет особых требований к размещению, за исключением минимизации длины кабелей, требований ЭМС и пр.

Эксперимент не предъявляет особых требований к ориентации КА. Необходимы установка датчиков с точностью $0,3^\circ$, знание их ориентации на борту с точностью $0,1^\circ$ и знание ориентации КА с точностью не менее $0,3^\circ$. Особых требований к знанию положения КА нет.

Для гарантированной калибровки магнитометра необходимо рассмотреть возможность временной закрутки КА, например, на трассе перелета к рабочей орбите.

5. ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТА ИМВЭ

Научный приборный комплекс для эксперимента ИМВЭ будет разрабатываться на базе существующих прототипов и изготавливаться совместно четырьмя коллективами:

- Львовским Центром ИКИ НАНУ/НКАУ, Украина (разработка и изготовление датчиков ДВМП-И);
- ИКИ РАН (разработка и изготовление датчика ДНМП-И, разработка модифицированных датчиков БМСВ-И и их изготовление совместно с СКБ ИКИ, Таруса, Калужская обл.; изготовление КИА, проведение квалификационных и приемо-сдаточных испытаний, а также физической калибровки всех датчиков);
- Математико- физическим факультетом Карлова Университета (кафедра физики плазмы и поверхности), Прага, Чешская

Республика (модификация узлов электроники, их настройка, сборка блока БМСВ-И, программно-технологические испытания блока БМСВ-И);

- Институтом физики атмосферы Чешской АН (доработка конструкции датчика ДСС, его изготовление и калибровка).

Головная организация в подготовке и проведении эксперимента — ИКИ РАН. Список организаций, участвующих в создании эксперимента ИМВЭ, представлен в табл. 4.

Таблица 4

Кооперация при изготовлении прибора ИМВЭ

Блок (датчик)	Изготовитель	Страна
ДВМП-И	Львовский Центр ИКИ НАНУ/НКАУ	Украина
ДНМП-И	ИКИ РАН	Россия
БЭ ИМВЭ	ИКИ РАН	Россия
БМСВ-И*	Математико-физический факультет Карлова Университета, Прага	Чешская Республика
ДСС-И	Институт физики атмосферы Чешской АН	Чешская Республика

* Цилиндры Фарадея для датчика БМСВ-И разрабатывает и изготавливает ИКИ РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прототипы датчиков ДНМП-И, ДВМП-И, БМСВ-И установлены на КА «Спектр-Р», запущенном на высокоапогейную орбиту 18 июля 2011 г. В настоящее время все датчики включены и проводят измерения параметров ММП и плазмы СВ. Пример быстрых и больших вариаций потока ионов солнечного ветра с временным разрешением 30 мс по данным прибора БМСВ приведен на рис. 4 (для интервала 1,5 ч) и на рис. 5 (для интервала 30 с).

МАГНИТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ГЕЛИОМАГ В ПРОЕКТЕ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

В. А. Стяжкин¹, Г. У. Аустер², В. Магнец³

¹ *Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк*

² *Институт геофизики и внеземной физики Технического университета, Германия, Брауншвейг*

³ *Институт космических исследований Академии наук Австрии*

Магнитные измерения в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД предлагается выполнять магнитометром «Гелиомаг». Основные научные задачи — исследование межпланетного магнитного поля с близких расстояний в окрестности Солнца. Магнитометр «Гелиомаг» — трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, состоящий из блока электроники и двух датчиков. Прибор измеряет магнитное поле в диапазоне ± 1000 нТ с чувствительностью 0,1 нТ и скоростью измерения от 0,5 до 64 векторов в секунду. Для уменьшения влияния теплового излучения Солнца на метрологические характеристики прибора разрабатываются меры его защиты. Датчики размещаются на выносной штанге в тени космического аппарата и покрываются собственным теплозащитным экраном. Электронный блок размещается на корпусе КА под общей теплоизоляцией.

ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

Векторные измерения магнитного поля с близких расстояний от Солнца с высокой точностью и высоким временным разрешением.

РЕШАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Измерения магнитного поля в комплексе с измерениями плазмы, энергичных частиц и волн в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД на близких от Солнца расстояниях проводятся с целью исследования:

- гелиосферного магнитного поля и его возмущений;
- природы и динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности — солнечных вспышек и выбросов (ударные волны, магнитные облака) и их влияния на гелиосферу и космическую погоду;
- механизма нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра;
- магнитных полей в приполярных областях.
- магнитосферы планеты и ее взаимодействие с солнечным ветром при пролетах вблизи Венеры.

ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА И КООПЕРАЦИЯ

Прототипом векторного феррозондового магнитометра «Гелиомаг» стал магнитометр MPO/MAG, который разрабатывается для проекта ESA VeriColombo. Изготовление и весь комплекс испытаний планируются в рамках кооперации: ИЗМИРАН, Институт геофизики и внеземной физики Технического университета в Брауншвейге (Германия) и Институт космических исследований Академии наук Австрии.

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА

При отсутствии внешнего магнитного поля переменный магнитный поток в сердечнике, задаваемый обмоткой возбуждения, распределен относительно сигнальной обмотки симметрично и нечетно. Поэтому суммарный переменный магнитный поток, пронизывающий сигнальную обмотку, равен нулю и ЭДС в ней не наводится. При воздействии внешнего магнитного поля происходит намагничивание сердечника, причем намагничиваются, главным образом, части сердечника, продольные по отношению к измеряемому полю. Внешнее магнитное поле вносит асимметрию в распределение суммарного магнитного потока: увеличивая в каждый полупериод возбуждения поток в одном направлении и уменьшая его в противоположном направлении. Такой характер распределения магнитного потока сохраняется и по отношению к каждому поперечному сечению сигнальной обмотки. Это вызывает появление четных гармоник в магнитном потоке, пронизывающем измерительную обмотку, в которой наводятся ЭДС тех же гармоник. Амплитуды ЭДС пропорциональны проекции внешнего поля на ось сигнальной обмотки, а фазы изменяются на 180° при изменении знака проекции. Отметим, что под действием поля возбуждения сердечник доводится до глубокого насыщения дважды за период возбуждения.

СОСТАВ МАГНИТОМЕТРА

Магнитометр «Гелиомаг» состоит из двух идентичных датчиков Д1 и Д2 (рис. 1) и электронного блока БЭ (рис. 2).

Датчики магнитометра — это чувствительные элементы прибора, преобразующие индукцию окружающего магнитного поля в электрический сигнал, соответствующий измеряемому полю. Электронный блок преобразует этот сигнал в цифровой вид и передает его в бортовую телеметрию.

Основные технические характеристики

Диапазон измерения	± 1000 нТ
Разрешение	2 рТ
Уровень шума	10 рТ / Гц ^{1/2}
Чувствительность	0,1 нТ
Стабильность	<1 нТ/год; <3 нТ/100 °С
Энергопотребление	2 Вт
Масса датчика Д1 с экраном	224 г
Масса датчика Д2 с экраном	224 г
Масса блока электроники БЭ	1057 г
Масса соединительного кабеля	~70 г/м (в зависимости от его длины)
Размеры датчиков	Ø53×91 мм
Размер электронного блока	162×121×96,6 мм
Размер теплового экрана	82,4×82,4×122,7 мм
Масса теплового экрана	49 г
Размер интерфейсной титановой пластины	81×81×4 мм
Масса прибора (полная) без кабеля	1505 г

ДАННЫЕ ПО ИНФОРМАТИВНОСТИ

Прибор исследует магнитное поле со скоростью 128 измерений в секунду. Данные измерений осредняются и передаются в бортовую телеметрию. Время осреднения может меняться и будет задаваться командой в зависимости от научной задачи на данном участке траектории КА.

Предполагается, что магнитометр будет работать на всей траектории полета:

- на трассе перелета от Земли до Солнца в стандартном режиме — 16 векторов в секунду с информативностью ~880 бит/с;
- в наиболее интересных областях на минимальных расстояниях до Солнца прибор будет переключаться в быстрый режим с частотой измерений 64 вектора в секунду и информативностью ~3,5 кбит/с;
- для проверки чувствительности датчиков прибор может переключаться в режим калибровки на небольшое время ~5 мин с информативностью ~110 бит/с.

Информативность прибора будет уточняться в процессе его создания и испытания.

Измеренные компоненты магнитного поля должны быть привязаны к бортовому времени с точностью не хуже 1 мс.

ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Энергопотребление и тепловыделение магнитометра зависят от режима работы и будут уточняться по мере его разработки.

Энергопотребление в стандартном режиме ~5 Вт.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

Для нормального функционирования магнитометра на расстоянии до $60 R_{\odot}$ от Солнца предлагается блок электроники магнитометра установить на корпусе космического аппарата под теплозащитным экраном и ЭВТИ. Оба датчика размещаются на штанге в тени экрана и корпуса КА.

Тепловой режим электронного блока обеспечивается через механический интерфейс с корпусом КА и обшивкой ЭВТИ. Тепловой режим датчиков — через механический интерфейс с выносной штангой. Механический интерфейс на чертеже (см. рис. 1) изображен в виде цилиндра меньшего размера. Интерфейс изготовлен из материала, который не позволяет потоку тепла от штанги передаваться к датчику. Для защиты от Солнца на датчик надевается теплозащитный экран (рис. 3а, б).

Масса датчика с тепловым экраном и титановой пластиной ~330 г.

Электронный блок нормально функционирует в диапазоне температур от -20 до $+50$ °С.

Рабочий диапазон температур для датчиков от -100 до $+80$ °С.

ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВКЕ МАГНИТОМЕТРА НА КА

Оба датчика устанавливаются на выносной штанге в направлении от Солнца в тени экрана на максимально возможном удалении от корпуса космического аппарата: датчик Д1 на конце штанги, Д2 — на расстоянии ~1 м от Д1.

На рис. 1 в верхней части блока под цилиндрическим корпусом $\varnothing 53$ мм расположен магниточувствительный элемент — датчик. Нижняя часть (цилиндр меньшего размера) — это механический интерфейс.

Внизу интерфейса имеется посадочное место в виде четырех приливов с внутренними отверстиями (расстояние между ними 40×40 мм). Через эти приливы с помощью болтов М3 блок крепится к выносной штанге. Блок датчика (см. рис. 3а, б) устанавливается на титановой пластине, которая служит частью выносной штанги.

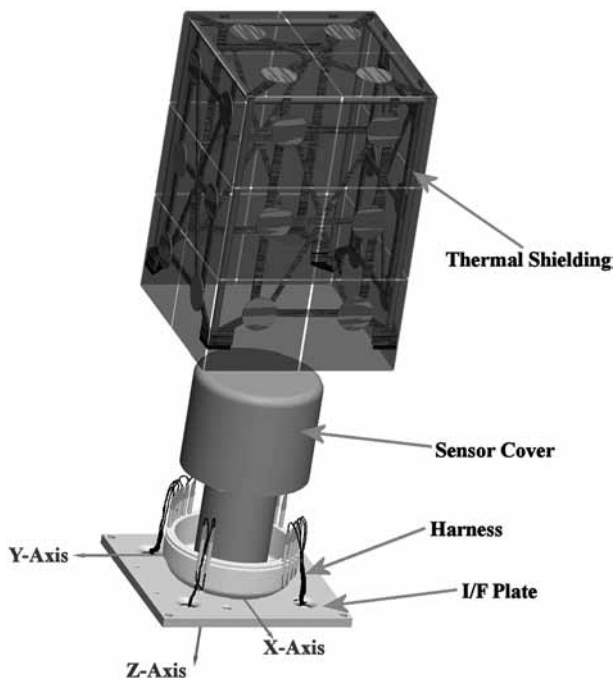


Рис. 36. Блок датчиков с тепловым экраном магнитометра «Гелиомаг»

Выносная штанга вместе с пластиной разрабатывается и изготавливается создателем космического аппарата.

Выносная штанга и все элементы крепежа должны изготавливаться из немагнитного материала. Поэтому пластину предлагается сделать из титана.

На пластине должны быть: четыре отверстия для крепления блока датчиков, четыре отверстия для проводов от датчика к электронному блоку, четыре отверстия по углам для крепления теплового покрытия и два отверстия для регулировочных шпилек.

Каждый датчик имеет систему координат, направления осей указаны стрелками.

При установке датчиков на выносной штанге необходимо, чтобы их оси были параллельны строительным осям космического аппарата с точностью не хуже $0,5^\circ$.

Наименования осей могут быть разными.

Чтобы получить вектор магнитного поля в абсолютном пространстве необходимо знать ориентацию датчика в этом про-

странстве. Система ориентации космического аппарата должна иметь точность не хуже $0,5^\circ$. Для магнитометра не обязательно поддерживать ориентацию осей КА на какие-то астрономические объекты, но необходимо знать направляющие косинусы на эти объекты.

Блок электроники размещается на корпусе аппарата с произвольной ориентацией.

Поля зрения: датчик магнитометра всенаправленный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД магнитометр «Гелиомаг», с вышеприведенными техническими характеристиками, вполне удовлетворяет требованиям на приборы, измерения с которых помогут решить поставленные научные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

Glassmeier K.-H., Auster H.-U. et al. The Fluxgate Magnetometer of the BepiColombo Mercury Planetary Orbiter // *Planetary and Space Science*. 2010. V. 58. P. 287–299.

РАДИОИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЕКТЕ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (ЭКСПЕРИМЕНТ РСД)

**В. В. Фомичев¹, Г. П. Чернов¹, И. С. Прутенский¹,
В. Д. Кузнецов¹, Х. Роткель², М. Моравский²**

¹ *Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, 142190, Московская обл., Троицк*

² *Центр космических исследований Польской академии наук (ЦКИ ПАН), Польша, Варшава*

Изложены основные задачи эксперимента РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР (РСД), состояние вопроса и результаты предыдущих экспериментов по радиоизмерениям, выполненных на космических аппаратах (КА). Перечислены актуальные задачи нового эксперимента. Дано краткое описание технических характеристик планируемого радиоспектрометра.

ВВЕДЕНИЕ

Основные научные задачи, стоящие перед всеми солнечными экспериментами на космических аппаратах, связаны прежде всего с исследованиями Солнца как звезды, с использованием средств, недоступных при наземных наблюдениях. Цель любых наблюдений радиоизлучения Солнца — определение параметров плазмы солнечной короны и механизмов генерации, что способствует продвижению вперед в важной проблеме прогнозирования солнечной активности и ее геофизических проявлений.

В рамках этих проблем средствами радиоастрономии могут быть выполнены исследования:

- радиоизлучений на волнах декаметрового, гектометрового и километрового диапазонов и, как следствие, физических процессов в солнечной короне и межпланетном пространстве;
- межпланетного магнитного поля путем определения траекторий агентов всплесков III типа;
- распространения возмущений от солнечных вспышек типа ударных волн (по всплескам II типа) и геоэффективных корональных выбросов массы (КВМ, по радиовсплескам IV типа);
- структуры короны и механизмов генерации радиовсплесков по наблюдениям с различных направлений;
- свойств солнечного ветра с целью решения проблемы его происхождения, а также проверка теоретических представлений о взаимодействии потоков ускоренных частиц и возмущений с плазмой.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДЫДУЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первый успешный низкочастотный спутниковый эксперимент осуществлен в 1963 г. (Alouette 1). С тех пор проведены десятки других исследований и получен богатый материал о радиовсплесках II + IV и III типов, которые стали основными объектами изучения.

Одной из самых совершенных прошлых миссий можно считать КА ISEE-3, запущенный в августе 1978 г. Это был спутник на круговой орбите на удалении $\sim 240R_E$ (земных радиусов), т.е. вне магнитосферы Земли, где отсутствуют земные помехи и земное километровое радиоизлучение. Двухдипольная антенна (90-метровый диполь в плоскости вращения КА и 15-метровый вдоль оси вращения) давала возможность определять азимут и высоту источника радиоизлучения. Приемник имел 24 канала на частотах от 30 кГц до 2 МГц, позволяющих регистрировать источники III типа на расстояниях от $\sim 10R_\odot$ до 1 а.е. Был обнаружен новый тип быстрых всплесков SA (shock accelerated), связанных с радиовсплесками II типа. Было показано, что SA-всплески — продолжение в длинноволновом диапазоне елочной структуры всплесков II типа и вызываются быстрыми электронами, ускоренными в ударном фронте [Kahler et al., 1989].

Одновременно на ISEE-3 регистрировались энергичные электроны и электростатические волны в источнике III типа. Была проверена классическая теория излучения всплесков III типа, в подтверждение прежних экспериментов на КА Imp-6 и Helios-2. Обнаружена тесная связь излучения III типа и потока электронов с энергией 3...50 кэВ с положительным наклоном функции распределения частиц по скоростям.

Впервые обнаружена тонкая временная структура плазменных колебаний, после чего проведена серия теоретических работ, допускающих сильную турбулентность в источнике и коллапс солитонов. Однако для подтверждения такой структуры нужны наблюдения с временным разрешением $\ll 0,1$ с.

Была установлена тесная связь межпланетных всплесков II типа с ударными волнами в межпланетном пространстве; связь ударной волны с поршнем в переднем крае KBM, наблюдаемого в белом свете.

Стереоскопические наблюдения с КА Helios и RAЕ-2 дали возможность построения трехмерной картины распространения агентов III типа. Триангуляция между Helios-2 и ISEE-3 давала дополнительную информацию для однозначного определения положения радиоисточника на каждой частоте. Была построена

трехмерная траектория агента, пересекающая эклиптику на расстоянии 0,5 а.е. Таким образом, была обнаружена компонента межпланетного магнитного поля, перпендикулярная плоскости эклиптики [Fitzenreiter et al., 1977]. Также обнаружено, что излучение межпланетных всплесков III типа идет на второй гармонике плазменной частоты, хотя на более высоких частотах (в короне) — на первой гармонике.

Первая попытка измерения поляризации во всплесках III типа была предпринята на КА «Интеркосмос-Коперник-500» в 1973 г. На радиоспектрографе в достаточно широком частотном диапазоне 0,44...5,96 МГц зарегистрировано несколько всплесков III типа с неожиданно высокой степенью круговой поляризации (50...60 % на частоте 2,3 МГц). Наблюдения были неудачными, так как записи содержали много помех из-за низкой орбиты спутника (в апогее 1551 км), и спектрограф в большей мере стал ионосферным прибором. Степень поляризации определялась по ионосферной отсечке последовательных частот за счет того, что обыкновенная волна обрезается на более низкой частоте, чем необыкновенная.

Запуски отечественных КА для наблюдения межпланетных солнечных радиовсплесков начались в 1963 г. (табл. 1). Почти на всех аппаратах приемники имели несколько фиксированных частотных каналов.

Таблица 1

Запуски отечественных КА для наблюдения межпланетных радиовсплесков

КА	Год	Частоты каналов
«Электрон-4»	1963	1,1 и 2,3 МГц
«Зонд-3»	1965	0,02; 0,21 и 2,0 МГц
АМС «Венера 2»	1965	30, 200, 985 кГц
«Луна-11 и -12»	1966	30, 200, 985 кГц
«Прогноз-1 и -2»	1972	4 канала между 80 и 755 кГц
«Интеркосмос-Коперник-500»	1973	Спектр в четырех поддиапазонах: 0,44...5,96 МГц
«Прогноз-8 и -9»	1980 и 1983	10 каналов 150 и 2350 кГц
«КОРОНАС-И»	1994	спектр 0,30...30 МГц

Низкая орбита КА «КОРОНАС- И» и короткий срок работы прибора СОРС не позволили получить существенные результаты. Солнечные всплески трудно было выделить на фоне сильных земных помех [Фомичев и др., 1997].

В 1971 г. был осуществлен оригинальный французский эксперимент СТЕРЕО-1 на советском КА «Марс-3» в метровом диапазоне волн (169 МГц). Одновременные наземные наблюдения позволили определить направленность радиоизлучения. Диаграмма излучения всплесков I типа по половинному уровню оказалась в среднем $<25^\circ$, а для всплесков III типа $\sim 60^\circ$. Был сделан важный вывод о слабой роли рассеяния радиоизлучения на корональных неоднородностях [Steinberg et al., 1974; Hoang et al., 1977].

В 1973 г. эксперимент типа СТЕРЕО продолжен на КА «Марс-7» уже на двух частотах: 30 и 60 МГц. Были обнаружены сильные вариации интенсивности с временными масштабами от 1 с до 1 мин, которые, вероятно, связаны с ионосферными неоднородностями [Steinberg, Poquerusse, 1978].

Таковы краткие итоги первого этапа исследований межпланетных солнечных радиовсплесков. Новая эра открылась с началом миссий ULYSSES и WIND/WAVES.

Анализ одновременных наблюдений радиовсплесков, плазменных волн и частиц, выполненных на КА Ulysses, показал, что межпланетная среда содержит каналы распространения (открытые магнитные трубки), исходящие от Солнца далеко за 1 а.е. Они присутствуют и внутри КВМ. Эти каналы обеспечивают распространение пучков электронов и протонов без рассеяния [Stone et al., 1992]. Огромный список работ по результатам ULYSSES приведен на сайте: http://ulysses-ops.jpl.esa.int/ulysses/archive/urap_refs.html/.

Исследования по программе WIND/WAVES выполняются с декабря 1994 г. Динамические спектры строятся в двух диапазонах: НЧ, RAD1, 20...1,040 кГц и ВЧ, RAD2, 1,075...13,825 МГц. Временное разрешение ограничивалось одним сканом каждые 16 с в диапазоне 1...14 МГц и усреднением значений каждую 1 мин [Bougeret et al., 1995].

На этом этапе появилась возможность комплексного анализа вспышечных явлений в других диапазонах (в ультрафиолетовых линиях КА SOHO/EIT, затем TRACE, рентгеновских данных с КА Yohkoh; RHESSI и после 2005 г. Hinode).

Эти новые наблюдения позволили прежде всего уточнить модель электронной концентрации в межпланетном пространстве [Leblanc et al., 1998]:

$$Ne = 3.3 \cdot 10^5 r^{-2} + 4.1 \cdot 10^6 r^{-4} + 8.0 \cdot 10^7 r^{-6}, \text{ где } r \text{ — в единицах } R_\odot.$$

В нескольких событиях удалось наблюдать радиоизлучение от КВМ непосредственно в источнике. Было обнаружено, что излучение II типа исходит из области перед ударным фронтом, вызванным КВМ [Reiner et al., 1998; Hoang et al., 1998].

О многочисленных результатах продолжающегося эксперимента WIND/WAVES можно судить по списку из сотен работ, приведенном на сайте <http://www-lep.gsfc.nasa.gov/waves/publications.html>, а также из обзора [Pick, Vilmer, 2008].

После запуска КА Stereo 25 октября 2006 г. появилась возможность анализа источников радиовсплесков с двух аппаратов: А (Ahead) и В (Behind), расходящихся вдоль орбиты Земли и строящих динамические спектры, аналогичные КА Wind/Waves [Kaiser, 2005; Bougeret et al., 2008].

2. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР

Важной задачей эксперимента РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР станет регистрация, мониторинг и исследование механизмов генерации электромагнитного излучения Солнца в радиочастотном диапазоне 30 кГц – 300 МГц. Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД даст уникальную возможность исследовать радиоизлучение на различных расстояниях от Солнца вплоть до орбиты Земли из положений КА вне плоскости эклиптики (а в некоторых случаях непосредственно в области генерации), что позволит существенно продвинуться в понимании природы активных процессов в солнечной короне Солнца и в межпланетной среде.

Приведем некоторые актуальные проблемы исследований солнечных радиовсплесков различных типов.

2.1. Радиовсплески II типа

Радиовсплески II типа связывают с распространением ударных волн в солнечной короне и межпланетном пространстве. Невыясненным остаются происхождение ударных волн и связь радиовсплесков II типа со вспышками и корональными выбросами массы (КВМ). Радиовсплески могут наблюдаться как в отсутствие КВМ, так и в тесной связи с ними, причем источник радиоизлучения может располагаться внутри тела КВМ, а иногда перед его передним фронтом. Это дает основание предполагать существование разных ударных волн. Одни генерируются во время взрывной фазы вспышки (нагрев и испарение плазмы), другие (поршневые) возбуждаются перед передним фронтом КВМ.

Для решения этого вопроса важным представляется определение расположения ударного фронта относительно выброса. В настоящее время положение КВМ определяется в плоскости

неба, в то время как ударный фронт движется к Земле почти перпендикулярно к этой плоскости. Наблюдение источников радиовсплесков II типа из точки вне плоскости эклиптики может решить эту проблему.

Скорость распространения ударных волн в настоящее время определяют по скорости частотного дрейфа радиовсплесков II типа. Используются определенные модели распределения электронной плотности с высотой в солнечной короне, которые не всегда применимы для конкретного случая. В эксперименте РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР измерения скорости ударной волны могут быть выполнены непосредственно вне зависимости от моделей электронной плотности.

Для решения вопроса, связаны ли множественные радиовсплески II типа, когда в одном событии наблюдаются несколько радиовсплесков, с генерацией разных ударных волн в одном и том же месте и их распространением по одной и той же траектории, или ударные волны генерируются в разных местах активной области, необходимы позиционные наблюдения источников этих радиовсплесков.

Не ясен вопрос, с какими участками фронта ударной волны (там, где она квазиперпендикулярна или квазипараллельна) связаны источники радиовсплесков II типа. Для этого интересно проследить расположение источников радиовсплесков относительно искривленного фронта ударной волны, а именно, располагаются они в носовой части фронта или ее фланговых частях.

Позиционные наблюдения необходимы и для выяснения причин замедления источников корональных радиовсплесков II типа: является ли уменьшение частотного дрейфа следствием реального торможения ударных волн (например, при превышении числом Маха критического значения, когда ударная волна становится турбулентной и затухание резко увеличивается) или это следствие распространения ударной волны вдоль искривленной траектории или изменения распределения электронной плотности вдоль нее?

Требуется разрешения вопрос происхождения тонкой структуры радиовсплесков II типа: связано ли расщепление с одним источником или с разными частями фронта ударной волны; генерируется ли елочная структура, когда ударный фронт пересекает структуры с открытыми силовыми линиями магнитного поля? В этом случае источник радиовсплесков II типа должен двигаться вдоль поверхности Солнца, т. е. с малым частотным дрейфом.

Важен вопрос и о соотношении корональных и межпланетных ударных волн: являются ли они независимыми или межпланетная ударная волна — это продолжение корональной ударной волны?

Тогда оценки параметров корональных ударных волн можно переносить на межпланетные ударные волны.

Наконец, связано ли различие спектральных свойств как корональных, так и межпланетных радиовсплесков II типа (широкополосные, плавные, узкополосные, перемежающиеся) с разными типами ударных волн? Возможно, это следствие взаимодействия ударных волн с разными структурами типа плотных волокон, стримеров или коротирующихся областей взаимодействия в солнечном ветре.

2.2. РАДИОВСПЛЕСКИ IV ТИПА

Радиовсплески IV типа тесно связаны с КВМ, но многие детали этой связи остаются неизвестными.

Минимальная частота, до которой удалось проследить непрерывное радиоизлучение IV типа, в настоящее время составила 7,5 МГц. Это соответствует расположению источника на расстоянии $\sim 3R_{\odot}$ в рамках плазменной гипотезы и распределения электронной плотности в межпланетном пространстве [Leblanc et al., 1998]. Прямые измерения локации источника отсутствуют, нет данных о его расположении относительно КВМ (внутри тела КВМ или на переднем фронте).

Не известна форма радиоисточника (облако или петля). Отсюда трудно сделать вывод о возможной функции распределения энергичных частиц (пучок, конусное распределение или изотропное с провалом по скорости) и оценить вклад в наблюдаемое радиоизлучение плазменного и магнитотормозного механизмов излучения.

Не ясна роль ударных волн как ускорителей частиц в происхождении радиовсплесков IV типа.

Не решен до конца вопрос и об относительном вкладе в радиоизлучение плазменного и магнитотормозного механизмов излучения.

2.3. РАДИОВСПЛЕСКИ III ТИПА

Теория радиовсплесков III типа наиболее разработана среди всех других типов радиоизлучения. Общепринята плазменная теория, в рамках которой радиовсплески III типа генерируются в солнечной короне и межпланетном пространстве потоками ускоренных электронов на плазменной частоте и ее второй гармонике. Такая определенность с механизмом генерации дает возможность по

наблюдениям источников радиовсплесков III типа на разных частотах с точки вне плоскости эклиптики определить траекторию движения потоков электронов, что равносильно форме силовых линий межпланетного магнитного поля. По крутизне спирали магнитного поля можно оценить скорость солнечного ветра. Одновременно расположение источников радиоизлучения дает прямой способ определения электронной плотности в межпланетном пространстве. Пример такого восстановления силовых линий магнитного поля в межпланетном пространстве приведен в работе [Fitzenreiter et al., 1978].

Общим для всех рассмотренных типов радиовсплесков остается вопрос о тонкой структуре радиоизлучения, генерируемого в межпланетном пространстве. Несмотря на совершенство и многоплановость КА Wind/Waves и Stereo, они имеют низкое временное разрешение (8 с) и ограниченный частотный диапазон. Для надежного сопоставления спектров ИЗМИРАН и Wind/Waves RAD2 временное разрешение последнего должно быть увеличено примерно в 15 раз. Так, например, для исследования тонкой структуры типа зевры в радиоизлучении КВМ в межпланетном пространстве необходимо получать динамические спектры с разрешением $\sim 0,1 \dots 0,2$ с.

Другой общий вопрос — о направленности излучения в радиовсплесках и их тонкой структуре. Приведенные ниже примеры одновременных динамических спектров, полученных по данным КА Stereo A и Stereo B, показывают, насколько важен учет направленности излучения при анализе наблюдений.

Наконец, необходимо отметить, что в рамках проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД представляется возможность осуществления одновременных измерений на приборе «Радиоспектрометр» и *in-situ* измерений параметров плазмы в источниках. Благодаря выбранной баллистической траектории КА, последний может пересекаться с КВМ, ударной волной или потоком энергичных частиц в межпланетном пространстве.

Наблюдения плотности плазмы и магнитного поля внутри КВМ позволяют измерить неоднородности плазмы за передним краем КВМ. До сих пор его структура наблюдалась только в белом свете на коронографах. В ряде событий регистрировались ударные волны, догоняющие КВМ и проходящие через его тело. При этом наблюдалась уникальная тонкая структура в виде жгутов радиоволокон на динамических спектрах [Chernov et al., 2006; Чернов, 2008]. Измерения внутри КВМ помогут прояснить происходящие плазменные процессы ускорения быстрых частиц в ударном фронте, их захват между передним краем КВМ и ударным фронтом.

Для комплексного анализа явлений необходимы также одно-временные наземные наблюдения динамических спектров на радиоспектрографах ИЗМИРАН 25...270 МГц, обсерватории Потсдам 45...800 МГц (Германия), ARTEMIS-IV 25...800 МГц (Греция), «Нансэ» DSP-поляриметре 20...70 МГц и радиогелиографах «Нансэ» в метровом диапазоне и FASR (Frequency Agile Solar Radiotelescope, USA), где планируется получать, кроме спектров, изображения радиоисточников с высоким пространственным разрешением в широком диапазоне частот 50 МГц – 24 ГГц.

3. РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР (РСД)

Исходя из перечисленных выше проблем ясно, что частотный диапазон «Радиоспектрометра» должен быть достаточно широким. Высокочастотная граница (300 МГц) даст возможность исследования корональных радиовсплесков, а низкочастотная граница обеспечит наблюдения радиовсплесков, генерируемых в гелиосфере. Для планируемой траектории КА в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД удаление КА от Солнца составит $\sim 60 R_{\odot}$, т. е. низкочастотная граница частотного диапазона должна быть $\sim 20...40$ кГц. Для решения перечисленных выше задач предлагается установить на борт солнечный радиоспектрометр (РСД) с диапазоном частот 20 кГц – 300 МГц.

Радиоспектрометр позволит исследовать не только параметры тепловой плазмы и радиоизлучения Солнца, но и магнитного поля путем регистрации плазменных резонансов разного типа (гирорезонансов и диффузных резонансов типа Q и D). Причем, в случае регистрации расщепления D-резонансов, точность определения величины магнитного поля будет выше точности магнитометра. Таким образом, прибор может быть использован для регистрации модуля магнитного поля вдоль траектории полета аппарата.

Прибор **RSD** (радиоспектрометр–детектор **РСД**) представляет собой электронный модуль, предназначенный для измерения трех электрических компонент радиочастотных излучений в диапазоне от 20 кГц до 300 МГц. В табл. 2 приведены характеристики высокочастотного блока радиоспектрометра (20 кГц – 300 МГц).

Прибор будет выдавать последовательность динамических спектров электрических полей, три оси для электрической составляющей вдоль орбиты. После включения РСД автоматически проводит внутреннюю процедуру автотеста и формирует первый служебный ТМ-блок, затем стартует измерительный цикл. Не требуется никаких команд от оператора или наземной стан-

ции. Рабочим режимом по умолчанию предполагается режим «Спектр» (уточняется). Измерительные данные (набор спектров для одного шага) запоминаются во внутренней памяти, где они формируются в пакеты и затем посылаются на ТМ-систему.

Таблица 2

Основные характеристики высокочастотного блока прибора

Общие	
Масса, кг	2,2±0,3
Мощность, Вт	8,0 ^{+20%} _{-30%} — полностью работающий ~ 1,5 ^{+25%} _{-50%} — в режиме ожидания (сброс ТМ)
Напряжение (В)	28,0±4
Размер (мм)	192×150×140 (уточняется)
Функциональные	
Количество каналов	3 для компонент электрического поля
Диапазон частот	20 кГц – 300 МГц (электрическая составляющая)
Спектральное разрешение	~30 кГц (20 кГц – 100 МГц) ~100 кГц (100 кГц – 300 МГц)
Динамический диапазон, дБ	80 (уточняется)
Рабочие	
Дискретные команды	Нет
Интерфейс ТМ/ТС	RS-485 — скорость до 1 Мбит/с
Поток ТС	2–3 команды/сеанс (орбиту)
Длина пакета ТС	8 байт (уточняется)
Поток ТМ	~2...4 кбит/с
Длина пакета ТМ	256 байт (уточняется)
Внутренний буфер памяти	2 МБ (минимум ~10 мин измерения без сброса ТМ)

Планируются несколько режимов работы (уточняется):

- OFF — подача напряжения питания полностью выключена, процессоры сами производят начальную загрузку, после чего питание снова включается;
- STANDBY — режим экономии питания, производятся только служебные пакеты (НК) и/или сбрасываются на ТМ занесенные в буфер научные данные;

- SPECTRUM LO — полностью рабочий режим — 20 кГц – 300 МГц;
- MONITORING — режим экономии потока данных, выдается ограниченный объем телеметрической информации (с помощью выбора спектра и сжатия данных);
- CALIBRATION — внутренняя калибровка прибора (приемников).

Внутренний блок контроля РСД базируется на 32-битном микропроцессоре, который запускает параллельные сервисные программы для проведения всех задач по контролю и обработке данных.

Внутреннее математическое обеспечение будет состоять из следующих компонентов:

- сбор данных — измерение спектральных данных составляющих электрического поля и запоминание событий в буфере событий;

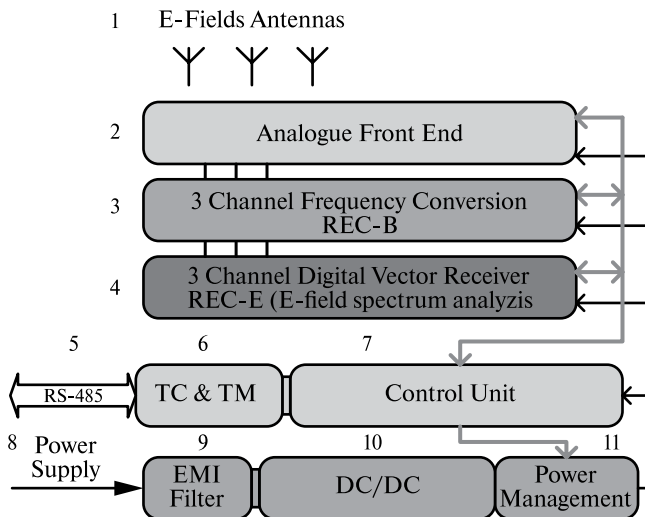


Рис. 1. Функциональная блок-схема прибора:

1 — антенны электрического поля; 2 — конец аналогового фронта; 3 — трехканальный преобразователь частоты REC-B; 4 — трехканальный цифровой векторный приемник REC-E (анализ спектра электрического поля); 5 — интерфейс RS-485; 6 — телеметрические команды и телеметрическая информация; 7 — блок управления; 8 — блок электропитания; 9 — фильтр электромагнитных помех; 10 — преобразователь постоянный ток/постоянный ток; 11 — блок управления режимом питания

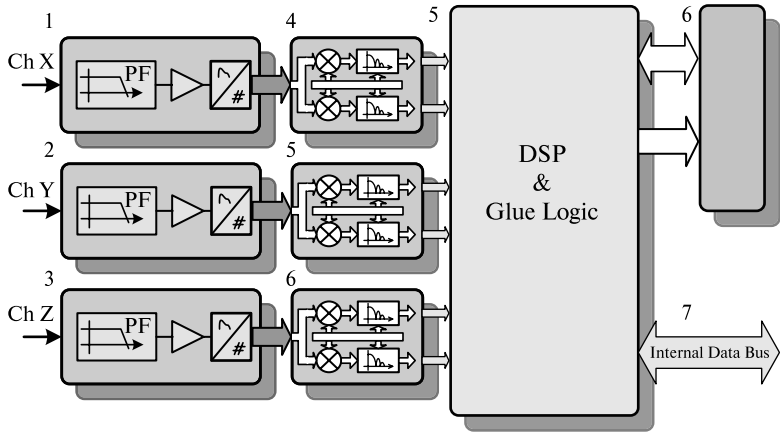


Рис. 2. Функциональная блок-схема векторного приемника:

1 — канал X; 2 — канал Y; 3 — канал Z; 4 — фильтр нижних частот; 5 — цифровая обработка сигнала и связующие логические схемы; 6 — буферная память; 7 — внутренняя шина данных.

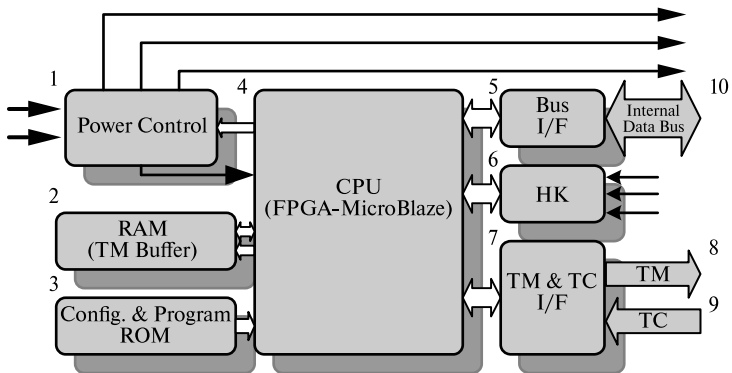


Рис. 3. Функциональная блок-схема блока управления:

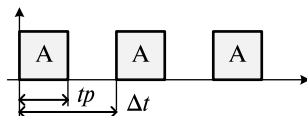
1 — блок контроля мощности; 2 — ОЗУ (буфер ТМ); 3 — ПЗУ конфигурации и программы; 4 — центральный процессор (программируемая пользователем БИС FPGA — MicroBlaze); 5 — шина интерфейса; 6 — служебные данные; 7 — интерфейс телеметрической информации и телеметрических команд; 8 — телеметрия; 9 — телеметрическая команда; 10 — внутренняя шина данных

- синхронизация измерительных процессов цифрового приемника и запись меток времени;
- форматирование данных и сжатие, формирование и хранение ТМ-пакетов во внутреннем ТМ буфере;
- служебный мониторинг — получение служебных данных (напряжение и температура контрольной точки), подготовка служебных пакетов;
- обработка ТМ — посылка форматированных ТМ-пакетов на подсистему ТМ;
- обработка ТС — приемка пакетов ТС (команд), оценка содержания и их выполнение или отклонение;
- контроль состояния прибора — выполнение команд изменения состояния и поддержание таблиц состояний прибора;
- управление потреблением мощности прибора.

Концепция прибора и предварительные сборочные чертежи представлены на рис. 1–3.

ОСНОВНОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

SPECTRUM (спектр):



Диапазон частот Δf : 20 кГц – 300 МГц

Частотное разрешение δf ~100 кГц

Время сбора t_p 10...80 мс

Период измерения Δt 1,0 с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый эксперимент РАДИОСПЕКТРОМЕТР-ДЕТЕКТОР в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД направлен на решение проблем, важных как для солнечной, так и солнечно-земной физики. В значительной степени это связано с выбранной траекторией полета КА, позволяющей наблюдать Солнце как с видимой с Земли стороны, так и с обратной, а также — из точки вне эклиптики все явления в плоскости эклиптики. Предполагаемый широкий частотный диапазон (20 кГц – 300 МГц) позволит проследить радиоизлучение всех возмущений (корональные выбросы массы,

ударные волны, потоки ускоренных частиц), распространяющихся от Солнца до орбиты Земли (и далее), взаимосвязь этих возмущений, исследовать свойства межпланетных радиовсплесков, их тонкую структуру, уточнить механизмы генерации, получить информацию о распределении параметров плазмы в межпланетной среде (магнитное поле, плотность, скорость солнечного ветра). Полученные данные позволят разработать и усовершенствовать методики прогнозирования солнечной активности и ее геофизических последствий.

ЛИТЕРАТУРА

- [Чернов, 2008] *Чернов Г.П.* Необычные полосы в излучении и поглощении в солнечных радиовсплесках: жгуты волокон в метровом диапазоне волн // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. № 7. С. 536–550.
- [Bougeret et al., 1995] *Bougeret J.-L., Kaiser M.L., Kellogg P.J.* et al. WAVES: The Radio and Plasma Wave Investigation on the WIND Spacecraft // *Space Science Rev.* 1995. V. 71. P. 5.
- [Bougeret et al., 2008] *Bougeret J.L.* et al. S/WAVES: The Radio and Plasma Wave Investigation on the STEREO Mission // *Space Science Rev.* 2008. V. 136. P. 487–528.
- [Chernov et al., 2007] *Chernov G.P., Kaiser M.L., Bougeret J.-L., Fomichev V.V., Gorgusta R.V.* Fine Structure of Solar Radio Bursts Observed at Decametric and Hectometric Waves // *Solar Physics.* 2007. V. 241. P. 145–169.
- [Fitzenreiter et al., 1977] *Fitzenreiter R.J., Faiberg J.* et al. // *Solar Physics.* 1977. V. 52. P. 477–484.
- [Fomichev et al., 1994] *Fomichev V.V., Oraevsky V.N., Pulnits S.A., Pruten-sky I.S.* et al. The SORS experiment in the CORONAS-I project: some results // *Solar Physics.* 1994. V. 171. P. 221–224.
- [Hoang et al., 1998] *Hoang S., Maksimovic M., Bougeret J.-L., Reiner M.J.* et al. Wind-Ulysses Simultaneous Observations of Radio Emissions Associated with the 6 January 1997 Coronal Mass Ejection // *Geophysical Research Letters.* 1998. V. 25. P. 2497.
- [Kahler et al., 1989] *Kahler S.W., Cliver E.V.W., Cane H.V.* Shock-Associated Kilometric Radio Emission and Solar Metric Type II Bursts // *Solar Physics.* 1989. V. 120. P. 393–405.
- [Kaiser, 2005] *Kaiser M.L.* The STEREO Mission: an Overview // *Advances in Space Research.* 2005. V. 36. P. 1483–1488.
- [Leblanc et al., 1998] *Leblanc Y., Dulk G.A., Bougeret J.-L.*: Tracing the Electron Density from the Corona to 1 au // *Solar Physics.* 1998. V. 183. P. 165.
- [Pick et al., 2006] *Pick M.* et al. MultiWavelength Observations of CMEs and Associated Phenomena // *Space Science Reviews.* 2006. V. 123. P. 341.

- [Pick, Vilmer, 2008] *Pick M., Vilmer N.* Sixty-Five Years of Solar Radioastronomy: Flares, Coronal Mass Ejections and Sun-Earth Connection // *Astronomy and Astrophysics Rev.* 2008. V. 16. P. 1–153.
- [Pintér, Grigorieva] *Pintér S., Grigorieva V. P.* The Low-Frequency Radio Emission Observed by Prognoz-8 During Solar Noise Storms (May 17–24, 1981) // *Inst. Theor. Astrophys., Blindern-Oslo, Rep.* 1983. N. 57. P. 107–113.
- [Reiner et al., 1998] *Reiner M. J., Kaiser M. L., Fainberg J., Stone R. G.* A New Method for Studying Remote Type II Radio Emissions from Coronal Mass Ejection-Driven Shocks // *J. Geophysical Research.* 1998. V. 103. P. 29651.
- [Reiner et al., 2006] *Reiner M. J., Fainberg J., Kaiser M. L., Bougeret J.-L.* A New Solar Radio Emission Component at Hectometric Wavelengths // *Solar Phys.* 2006. V. 234. P. 301.
- [Steinberg et al., 1974] *Steinberg J. L., Caroubalos C., Bougeret J.-L.* // *Astron. Astrophys.* 1974. V. 37. P. 109–115.
- [Steinberg, Poquerusse, 1978] *Steinberg J. L., Poquerusse M.* // *Astron. Astrophys.* 1978. V. 65. P. L23–L26.
- [Stone et al., 1992] *Stone R. G., Bougeret J. L., Caldwell J., Canu P., De Conchy Y., Cornilleau-Wehrlin N., Desch M. D., Fainberg J., Goetz K.* et al. The Unified Radio and Plasma Wave Investigation // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1992. V. 92. N. 2. P. 291.
- [Wenzel et al., 1992.] *Wenzel K.-P., Marsden R. G., Page D. E., Smith E. J.* The Ulysses Mission // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1992. V. 92. P. 207.