

~ 200 пк, т.е. по всей толще диска Галактики. Объекты массой ~ 0,01 M_{\odot} можно будет наблюдать на удалении до 50 пк.

Список литературы

1. Kumar S S *Astrophys. J.* **137** 1121 (1963)
2. Salpeter E E *Astrophys. J.* **134** 669 (1961)
3. Chabrier G, Baraffe I *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **38** 337 (2000)
4. Jones H R A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **267** 413 (1994)
5. Geballe T R et al. *Astrophys. J. Lett.* **467** L101 (1996)
6. Allard F "Model atmospheres for M-dwarfs", PhD Thesis (Heidelberg: Ruprecht-Karls Univ., 1990)
7. Miller S et al., in *Molecules in the Stellar Environment: Proc. of IAU Colloq. N 146, Copenhagen, Denmark, May 24–29, 1993* (Lecture Notes in Physics, Vol. 428, Ed. U G Jørgensen) (Berlin: Springer-Verlag, 1994)
8. Patridge H, Schwenke D W *J. Chem. Phys.* (1997)
9. Allard F et al. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 137 (1997)
10. Rebolo R, Martin E L, Magazzu A *Astrophys. J. Lett.* **389** L83 (1992)
11. Pavlenko Y V et al. *Astron. Astrophys.* **303** 807 (1995)
12. Basri G, Marcy G W, Graham J R *Astrophys. J.* **458** 600 (1996)
13. Nakajima T et al. *Nature* **378** 463 (1995)
14. Martin E L et al. *Astron. Astrophys. Lett.* **327** L29 (1997)
15. Kirkpatrick J D et al. *Astrophys. J.* **519** 802 (1999)
16. Kenworthy M et al. *Astrophys. J. Lett.* **554** L67 (2001)

Дополнительные обзорные материалы

1. Basri G "Observations of Brown dwarfs" *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **38** 485 (2000)
2. *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets: Proc. of a Workshop, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 17–21 March 1997* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 134, Eds R Rebolo, E L Martin, M R Zapatero Osorio) (San Francisco, Calif.: ASP, 1998)
3. *From Giant Planets to Cool Stars: Proc. of a Workshop, Northern Arizona Univ., Flagstaff, AZ, USA, 8–11 June 1999* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 212, Eds C A Griffith, M S Marley) (San Francisco, Calif.: ASP, 2000)

PACS number: 96.60. – j

Комплексные исследования Солнца со спутника КОРОНАС-Ф. Новые результаты

В.Н. Ораевский, И.И. Собельман,
И.А. Житник, В.Д. Кузнецов

1. Программа КОРОНАС и проект КОРОНАС-Ф

В настоящем докладе представлены результаты комплексных наблюдений солнечной активности на спутнике КОРОНАС-Ф.

Международная программа КОРОНАС (Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности солнца), в рамках которой осуществлен запуск околоземной космической солнечной обсерватории КОРОНАС-Ф предназначена для исследований Солнца на разных фазах 11-летнего солнечного цикла. Предыдущий спутник КОРОНАС-И (запущен в 1994 г.) наблюдал Солнце вблизи минимума его активности. КОРОНАС-Ф будет изучать солнечную активность вблизи максимума текущего 23-го цикла. 31 июля 2001 г. спутник КОРОНАС-Ф выведен на орбиту со следующими параметрами: наклонение орбиты — 82,49°, минимальное удаление от поверхности Земли — 500,9 км, максимальное удаление от поверхности Земли — 548,5 км, период обращения 94,859 мин. Такая орбита обеспечивает регу-

лярно повторяющиеся периоды непрерывных наблюдений за Солнцем длительностью приблизительно 20 сут, что особенно важно для задач гелиосейсмологии и патрулирования солнечных вспышек. Фактически реализованная стабилизация ориентации космического аппарата оказалась в 3–5 раз лучше запланированной (несколько угловых секунд за секунду), что позволяет достичь высокого пространственного разрешения наблюдений Солнца.

2. Научные задачи проекта КОРОНАС-Ф

Основными научными задачами проекта КОРОНАС-Ф являются наблюдения глобальных колебаний Солнца и изучение сейсмологии его недр и внутреннего строения, комплексные исследования мощных динамических процессов активного Солнца (активные области, вспышки, выбросы плазмы) в широком диапазоне длин волн от оптики до гамма-излучения, изучение солнечных космических лучей, ускоренных во время активных явлений на Солнце, условий их выхода, распространения в межпланетном магнитном поле и воздействия на магнитосферу Земли.

3. Комплекс научной аппаратуры и первые результаты наблюдений

В соответствии с задачами проекта комплекс научных приборов космического аппарата включает четыре основные группы: прибор для регистрации глобальных колебаний Солнца, приборы рентгеновского диапазона для построения спектральных изображений активных областей на Солнце с пространственным разрешением порядка 2–3"; приборы для измерения потоков электромагнитного излучения активных областей и вспышек; приборы для исследования солнечных корпускулярных потоков. Широкий диапазон измерений электромагнитного спектра и потоков солнечных космических частиц как нейтральных (нейтронов), так и заряженных (электронов, протонов и ядер) позволит получать наиболее полную картину физических процессов в активных областях на Солнце. Приборы спутника КОРОНАС-Ф и их основное назначение приведены в таблице 1.

Основное оперативное управление приборами комплекса научной аппаратуры (КНА) осуществляется из ЦУП КНА, расположенного в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк. Закладки команд на борт КНА выполняются ежедневно. Объем одной закладки достигает 24 Кб. Кроме управления режимами работы обеспечивается динамическое перепрограммирование в полете бортовых контроллеров приборов КНА, что позволяет настраивать их программное обеспечение для текущих наблюдений. Сбор заявок на управление через ЦУП ЦКИТ ИЗМИРАН выполняется по электронной почте за время не менее 10 мин перед сеансом управления, что обеспечивает требуемую оперативность и гибкость управления КНА.

Спектрофотометр ДИФОС. Спектрофотометр ДИФОС предназначен для измерения флуктуаций интенсивности оптического излучения Солнца с целью получения спектра собственных колебаний. Измерения интенсивности проводятся одновременно в шести оптических спектральных диапазонах: 350, 500, 650, 850, 1100 и 1500 нм с шириной полосы 10% от значения центральной частоты. По сравнению с проектом КОРОНАС-И

© В.Н. Ораевский, И.И. Собельман,
И.А. Житник, В.Д. Кузнецов 2002

Таблица 1. Приборы спутника КОРОНАС-Ф

Прибор	Назначение	Организация-разработчик прибора	Научные руководители эксперимента
Гелиосейсмология			
Спектрофотометр ДИФОС	Гелиосейсмологический мониторинг	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН)	В.Н. Ораевский
Построение монохроматических изображений с высоким угловым разрешением			
Солнечный рентгеновский телескоп СРТ-К	Исследование пространственной структуры и динамики верхней атмосферы Солнца по узкополосным XUV-изображениям	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН	И.И. Соболевман И.А. Житник
Рентгеновский спектрогелиограф РЕС-К	Диагностика горячей плазмы солнечной атмосферы по изображениям в спектральных линиях X- и XUV-диапазонов спектра	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН	И.И. Соболевман И.А. Житник
Спектрофотометр ДИОГЕНЕСС	Исследование рентгеновского излучения активных областей и вспышек на Солнце	Центр космических исследований Польской академии наук	Я. Сильвестр
Измерение потоков и поляризации электромагнитного излучения (от УФ до γ)			
Рентгеновский спектрометр РЕСИК	Исследование рентгеновского излучения Солнца с высоким спектральным разрешением	Центр космических исследований Польской академии наук	Я. Сильвестр
Солнечный спектрополяриметр СПР-Н	Исследование поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ	И.И. Соболевман И.П. Тиндо С.И. Свертилов
Вспышечный спектрометр ИРИС	Исследование вспышечной активности Солнца в рентгеновском диапазоне спектра	Физико-технический институт РАН	Г.Е. Кочаров
Гамма-спектрометр ГЕЛИКОН	Исследование вспышечной активности Солнца в рентгеновских и гамма-лучах	Физико-технический институт РАН	Е.П. Мазец
Рентгеновский спектрометр РПС	Исследование рентгеновского излучения солнечных вспышек и их предвестников	Институт космических исследований РАН Московский инженерно-физический институт	В.М. Панков Ю.Д. Котов
Амплитудно-временной спектрометр АВС	Исследование рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек	Московский инженерно-физический институт	Ю.Д. Котов
Солнечный ультрафиолетовый радиометр СУФР-Сп-К	Исследование вариаций интегрального потока ультрафиолетового излучения Солнца	Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова	Т.В. Казачевская
Ультрафиолетовый солнечный спектрофотометр ВУСС-Л	Исследование ультрафиолетового излучения Солнца вблизи резонансной линии водорода H L ₂	Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова	А.А. Нусинов
Исследования солнечных корпускулярных потоков			
Комплекс приборов для исследования солнечных космических лучей СКЛ	Исследование солнечных космических лучей	Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ	С.Н. Кузнецов
Получение и обработка научной информации			
Система сбора научной информации (ССНИ)	Управление комплексом научной аппаратуры и режимами его работы	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН)	В.Н. Ораевский А.И. Спепанов

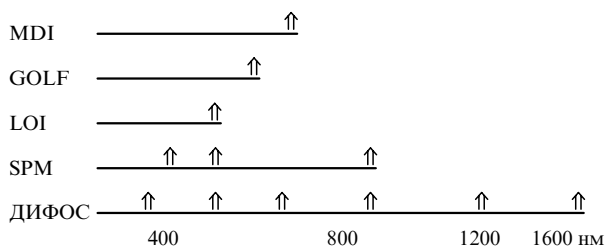


Рис. 1. Сравнение каналов спектрофотометра ДИФОС (КОРОНАС-Ф) с приборами SOHO (MDI — Michelson Doppler Imaging of Solar Oscillations, GOLF — Global Low-Degree Velocity, LOI — Luminosity Oscillation Imager, SPM — SunPhotoMeter).

осуществлена модернизация фотометра — значительное увеличение (больше, чем на порядок) чувствительности фотоприемников и расширение спектрального диапазона наблюдения почти в два раза с одновременным увеличением спектральных каналов с трех до шести. Впервые в мировой практике ведутся наблюдения глобальных колебаний Солнца в наиболее информативной линии УФ диапазона, в которой интенсивность излучения от глобальных колебаний Солнца заметно превышает интенсивность излучения в других линиях излучения. На рисунке 1 приведено сравнение каналов прибора ДИФОС с приборами SOHO [1]. Важным является наличие у прибора ДИФОС канала измерений в коротковолновом диапазоне 350 нм — в области ультрафиолета, в котором по некоторым оценкам ожидалось повышенные значения амплитуды глобальных колебаний. Не менее важно также наличие у прибора каналов измерений в широком диапазоне спектра от 350 до 1500 нм, реализующих измерения в этом диапазоне по единой методике.

На рисунке 2 показаны относительные амплитуды мод 5-минутных колебаний Солнца на длине волны 350 нм за период 28–30 ноября 2001 г. по результатам обработки данных спектрофотометра ДИФОС. Анало-

гичные спектры получены для всех других каналов. После усреднения по модам получены средние значения относительных амплитуд для каждого из шести каналов и построена их зависимость от длины волны, которая показана на рис. 3. Все точки легли на гладкую кривую, которая аппроксимируется зависимостью $\lambda^{-1.2}$. Аналогичный результат установлен для другого интервала наблюдений 30 ноября–3 декабря 2001 г. (вторая кривая на рисунке, помеченная квадратиками). Сравнение данных наземных наблюдений [2] дает хорошее совпадение. По наземным измерениям отношение амплитуд глобальных колебаний на длинах волн 500 и 680 нм составило 1,6, а для измерений прибором ДИФОС оно равно 1,54. Для другой пары длин волн 500 и 870 нм отношение амплитуд для наземных наблюдений составило 2,2, а по данным прибора ДИФОС оно равно 1,93.

Спектральные изображения полного диска Солнца в рентгеновском диапазоне 1,85–335 Å (эксперимент СПИРИТ). Комплекс аппаратуры эксперимента СПИРИТ включает многоканальный телескоп СРТ-К и спектрогелиограф РЕС-К. Основной задачей эксперимента является одновременное получение рентгеновских спектральных изображений солнечного диска и короны, соответствующих монотемпературным слоям плазмы солнечной атмосферы в широком температурном интервале $T_e = 0,05–50$ МК (1 МК = 10^6 К) с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением. Такие наблюдения Солнца являются основой для исследования трехмерной структуры и динамики солнечной атмосферы, определения физических параметров и вариаций содержания элементов в плазменных образованиях и явлениях — активных областях, корональных дырах, вспышках, выбросах корональных масс, ярких точках, протуберанцах и т.д.

В приборах СРТ-К и РЕС-К была использована многослойная фокусирующая оптика, системы тонкопленочных и пористых спектральных фильтров и приемники на основе открытых микроканальных пластин и

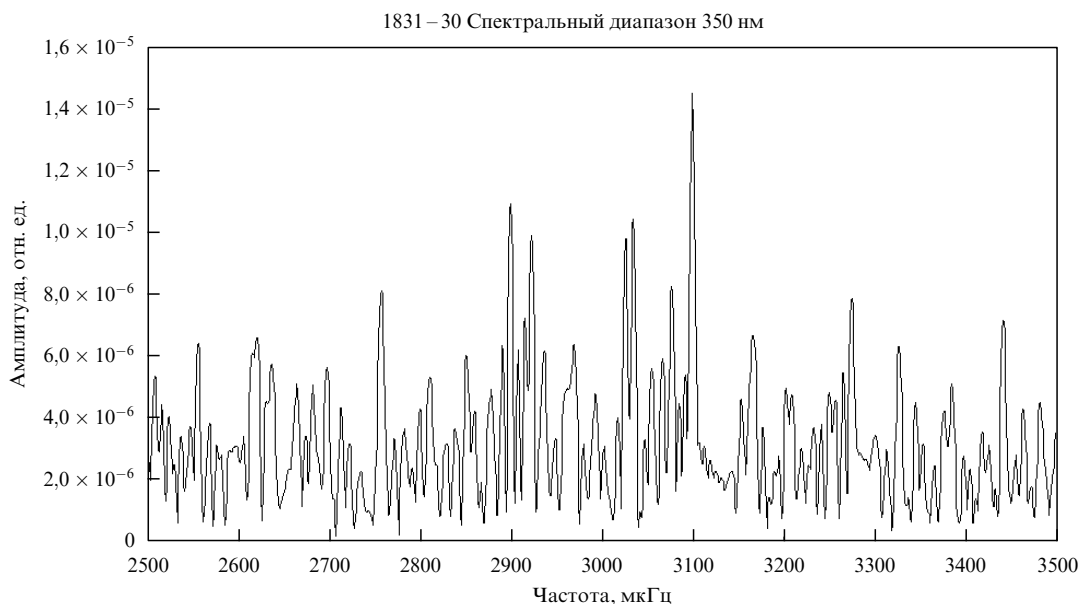


Рис. 2. Относительные амплитуды мод 5-минутных колебаний Солнца на длине волны 350 нм по результатам обработки данных спектрофотометра ДИФОС.

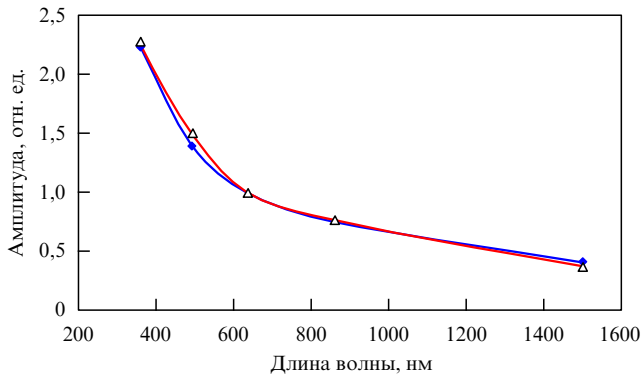


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды собственных колебаний Солнца от длины волны наблюдения.

охлаждаемых ПЗС-матриц. Важной особенностью комплекса приборов является возможность одновременного получения изображений всего Солнца в нескольких спектральных каналах. (Подробное описание и схемы приборов см. в работе [3].) Основные характеристики измерительных каналов приведены в таблице 2. Узкополосные каналы, центрированные на длинах волн 171, 175, 195, 284 и 304 Å, относятся к телескопу СРТ-К; остальные каналы — к спектрогелиографу РЕС-К. Канал MgXII дает монохроматические изображения в линии 8,42 Å с угловым разрешением $6'' \times 6''$. Спектрогелиограммы в областях длин волн 177–207 Å и 285–335 Å дают одновременные спектры плазменных структур в солнечной атмосфере с пространственным, спектральным и временным разрешением, соответственно, $5'' \times 100''$ и $8'' \times 160''$, 0,02 и 0,04 Å и до 2 с.

За первые 6 месяцев наблюдений зарегистрировано более 40 тыс рентгеновских изображений и спектрогелиограмм в диапазоне длин волн 8,4–335 Å с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением. Ежедневно регистрируется более 200 изображений Солнца. На рисунке 4 в качестве примера приведены изображения Солнца в каналах рентгеновского телескопа, соответствующих температурным слоям в интервале 0,05–2 МК (см. табл. 2). На изображениях видны локальные и крупномасштабные плазменные образования, разнообразная структура магнитных полей, а также область вспышки. На рисунке 5 представлено монохро-

Таблица 2. Основные характеристики измерительных каналов приборов СРТ-К и РЕС-К

Диапазон канала, Å	Основные ионы	$T, 10^6$ К
1,85–1,87	FeXXIV–XXV	20–50
8,418–8,423	MgXII	10
177–207	OIV, FeIX–XXIV, CaXIV–XVII	0,3–16
285–335	HeII, SiXI, FeXV–XVI, MgVIII, NiXVII, CaXVII	0,05–5
171	FeIX–X	1,3
175	FeX–XI	1,3
195	FeXII	1,6
284	FeXV	2
304	HeII	0,05
304	HeII, FeXV	0,05–2

матическое изображение в линии MgXII 8,42 Å области солнечной короны, разогретой до температуры 10 МК. Это изображение совмещено с изображением в канале 175 Å, соответствующем температуре 1,3 МК (шарообразная структура в правом верхнем углу рис. 5). Высокотемпературные (10 МК) динамические плазменные структуры с различным временем жизни (от минут до десятков часов), разной формы (шлемовидные, шарообразные, паукообразные и др.) и с различным распределением по высоте до сотен тысяч км над диском Солнца обнаружены в монохроматических рентгеновских изображениях впервые.

На рисунке 6 представлена спектрогелиограмма Солнца от 16.09.01, 03:59 UT (universal time (UT) — время по Гринвичу) вместе со спектром вспышки в области 177–207 Å, где показаны также основные интенсивные линии ионов FeX–XXIV, возбуждаемые в широком диапазоне температур от 1 до 16 МК, а также ряд линий ионов других элементов (O, Ca и Ni), соответствующих температурам 0,3–5 МК. Область вспышки видна как компактное изображение на спектрогелиограмме в "горячей" линии FeXXIV 192,04 Å, имеющей максимум светимости при 16 МК.

В результате первичного анализа изображений в эмиссионных линиях многозарядных ионов получены распределения электронной плотности и температуры в различных плазменных образованиях солнечной короны: активных областях, вспышках, корональных дырах и др., лежащих в диапазоне значений $N_e \approx 10^8 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 1 - 20 \text{ МК}$.

Таким образом, в рамках эксперимента СПИРИТ реализовано новое направление в солнечной астрофизике — изображающая рентгеновская спектроскопия, позволяющая по монохроматическим изображениям Солнца воссоздать трехмерную структуру и исследовать динамику плазменных образований солнечной атмосферы в диапазоне температур $T_e \approx 0,05 - 50 \text{ МК}$.

Спектрофотометр ДИОГЕНЕСС и рентгеновский спектрометр РЕСИК. Приборы РЕСИК и ДИОГЕНЕСС измеряют спектры излучения Солнца в диапазоне длин волн 3–7 Å и предназначены для исследования рентгеновского излучения активных областей и вспышек с высоким спектральным разрешением. Получаемые ими рентгеновские спектры солнечного излучения сравнимы по спектральному и временному разрешению с самыми лучшими наблюдениями, выполненными до сих пор. Вследствие полярной орбиты объекта КОРОНАС-Ф, а также полного покрытия широкого спектрального диапазона, они являются ценным дополнением спектров, получаемых со спутника Yohkoh. При больших потоках рентгеновского излучения детекторы прибора РЕСИК и спектрометров объекта Yohkoh насыщаются, поэтому прибор ДИОГЕНЕСС является на настоящий момент единственным в мире работающим спектрометром, который снимает спектры мощных вспышек балла свыше M2 (пример — вспышка класса X5.3 25 августа 2001 г.).

На рисунке 7 показаны спектры в линии CaXIX с высоким пространственным разрешением ($\sim 5''$) на фазе роста, промежуточной фазе и фазе распада самой мощной вспышки текущего цикла солнечной активности (25 августа 2001 г.). Температура излучающей плазмы уменьшается от 2,5 МК на фазе роста до 1,2 МК на фазе

Рентгеновские изображения Солнца в телескопе СРТ-К

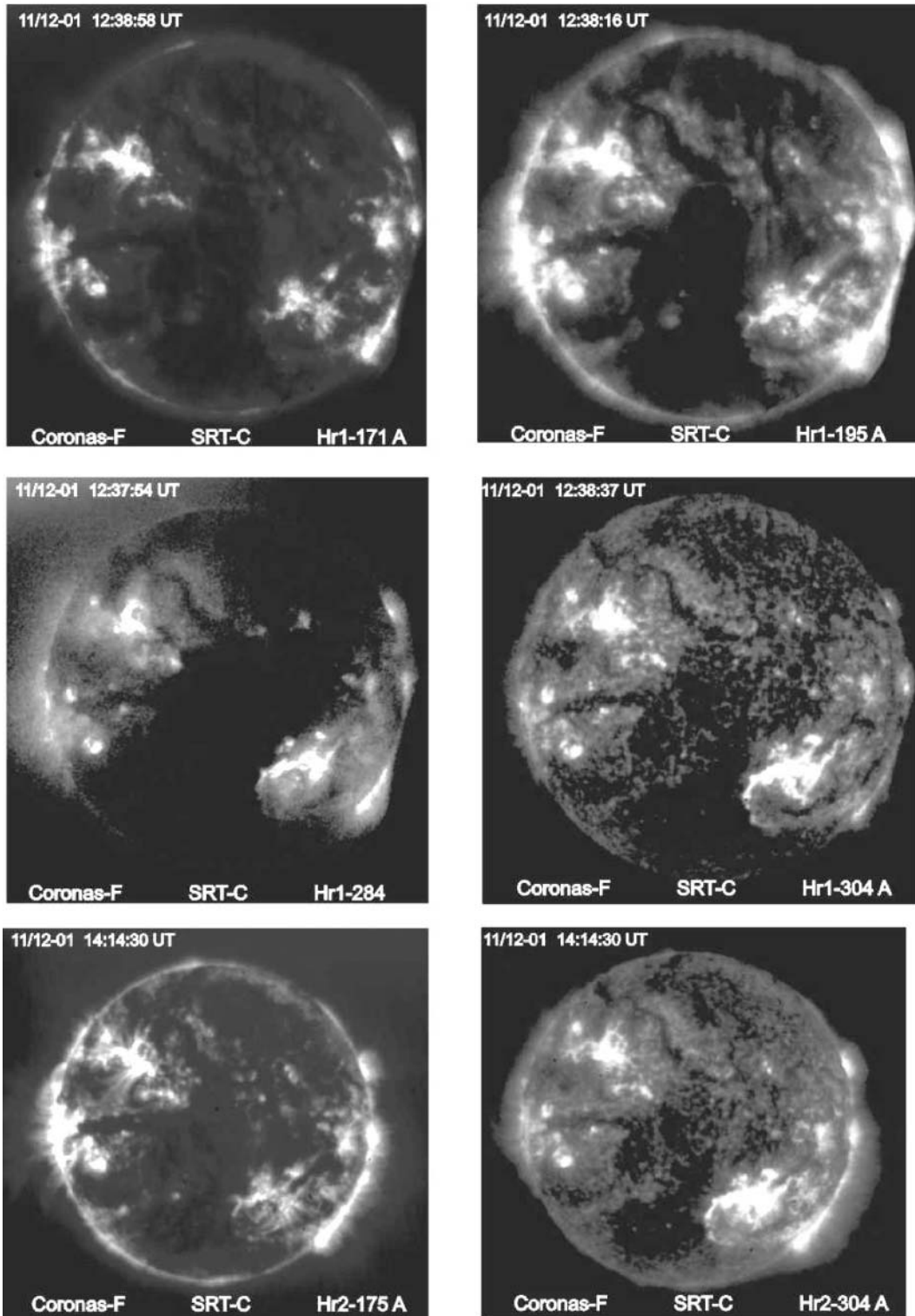


Рис. 4. Изображения Солнца в каналах рентгеновского телескопа, соответствующих температурным слоям в интервале 0,05–2 МК (эксперимент СПИРИТ).

спада. На спектрах видны эффекты изменения ширины спектральных линий, что указывает на роль плазменной турбулентности при эволюции вспышки. Относительные интенсивности излучения в линиях содержат информацию об энергетическом балансе во вспышках, роли немаксвелловских и неравновесных процессов в области

выделения энергии вспышки. В данном спектральном диапазоне (3–7 Å) для вспышки X-класса подобные спектры с таким высоким пространственным разрешением получены впервые. Они демонстрируют наличие множества линий излучения, которые образованы за счет процессов столкновительного возбуждения атомов,

Изображение Солнца в линиях ионов Fe IX–XI (175 Å) и Mg XII (8,42 Å) 12:40 UT, 01 сентября 2001 г.

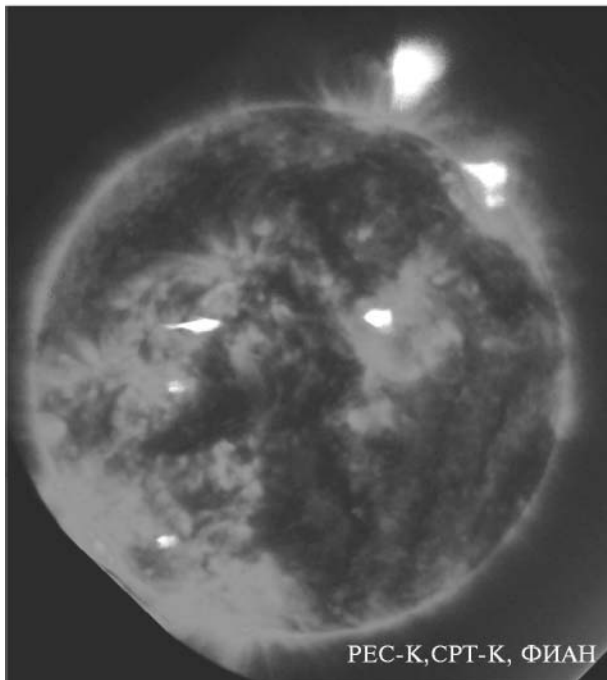


Рис. 5. Монохроматическое изображение в линии MgXII 8,42 Å области солнечной короны, разогретой до температуры 10 МК (эксперимент СПИРИТ).

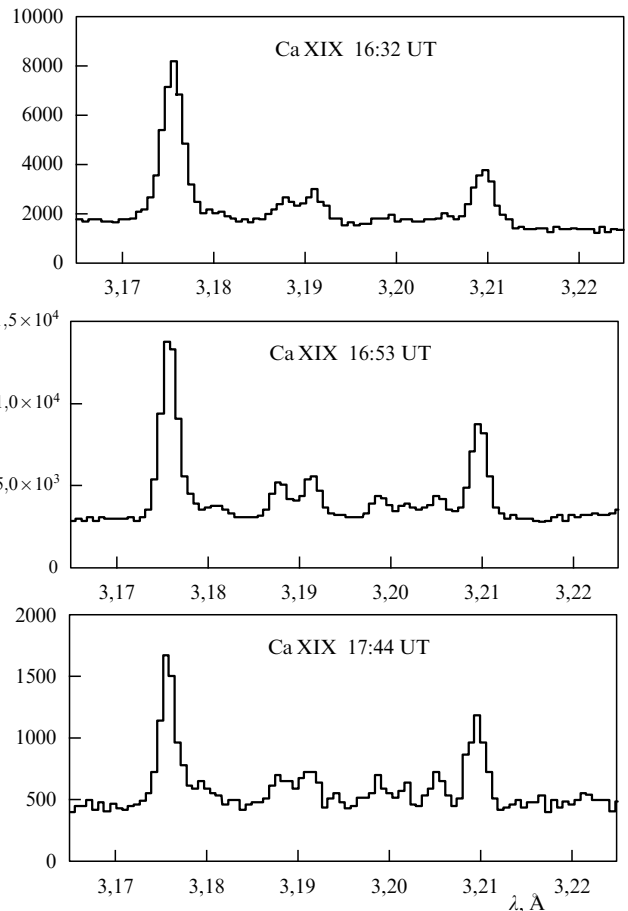


Рис. 7. Спектры в линии CaXIX с высоким пространственным разрешением (~ 5'') на фазе роста, промежуточной фазе и фазе распада самой мощной вспышки текущего цикла солнечной активности (25 августа 2001 г., спектрофотометр ДИОГЕНЕСС).

16.09.2001 03:59 UT

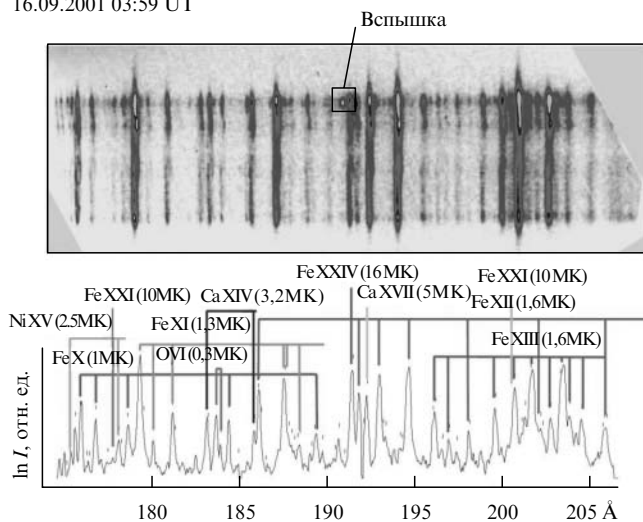


Рис. 6. Спектрогелиограмма Солнца от 16.09.01 (03:59 UT) вместе со спектром вспышки в области 177–207 Å. Показаны также основные интенсивные линии ионов FeX–XXIV, возбуждаемые в широком диапазоне температур от 1 до 16 МК, а также ряд линий ионов других элементов (O, Ca и Ni), соответствующих температурам 0,3–5 МК (эксперимент СПИРИТ).

возбуждения внутренних оболочек атомов и диэлектронной рекомбинации, и позволяют осуществить детальную диагностику вспышечной плазмы.

Вспышечный Спектрометр ИРИС. Прибор предназначен для исследования вспышечной активности Солнца в рентгеновском диапазоне спектра 2–200 кэВ. В патруль-

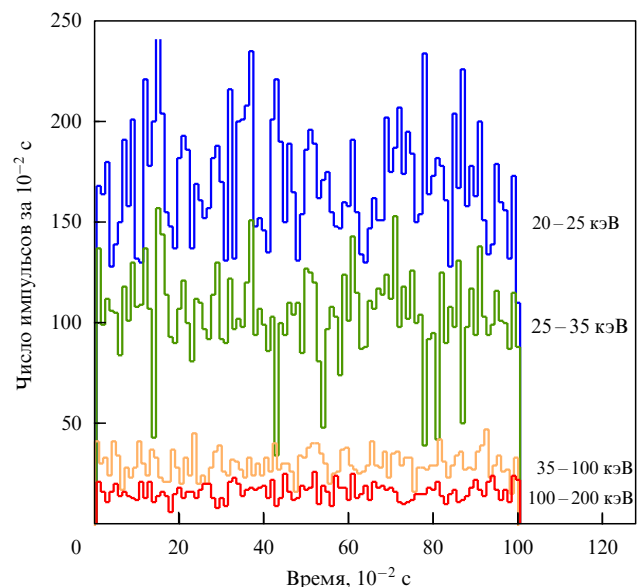


Рис. 8. Запись интенсивности жесткого рентгеновского излучения в четырех энергетических каналах в диапазоне 20–100 кэВ с высоким временным разрешением для события 27 сентября 2001 г., 18:26 UT (вспышечный спектрометр ИРИС).

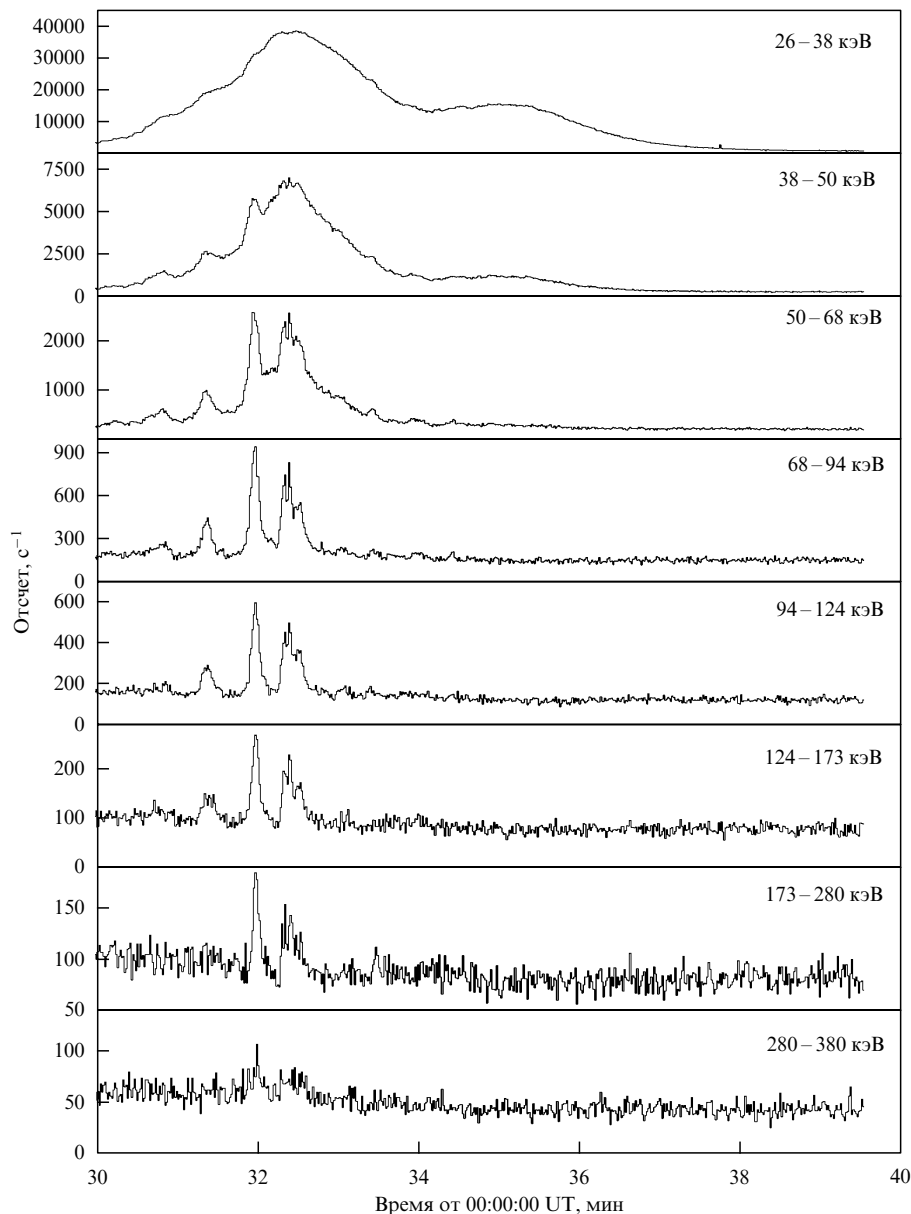


Рис. 9. Временной профиль излучения мощной вспышки 24 декабря 2001 г. ($T_0 = 0$ ч 31 мин 41,895 с UT) на взрывной фазе в восьми энергетических каналах (гамма-спектрометр ГЕЛИКОН).

ном режиме измерений он имеет 12 энергетических каналов с временным разрешением 2,5 с, в режиме всплеска — 64 энергетических канала с временным разрешением 1 с и 4 канала с разрешением 10 мс. Спектральных измерений с таким временным разрешением до настоящего времени не проводилось ни в одном эксперименте по исследованию рентгеновского излучения Солнца. Наблюдения тонкой временной структуры потоков жесткого рентгеновского излучения дают прямую информацию о развитии процессов энерговыделения на взрывной фазе вспышек и позволяют продвинуться в понимании их физического механизма. На рисунке 8 показана запись интенсивности жесткого рентгеновского излучения в 4-х энергетических каналах в диапазоне 20–100 кэВ с высоким временным разрешением для события 27 сентября 2001 г., 18:26 UT.

Гамма-спектрометр ГЕЛИКОН. Прибор регистрирует временные и спектральные характеристики жест-

кого электромагнитного излучения солнечных вспышек в широком энергетическом диапазоне от рентгена до γ (10 кэВ–10 МэВ). С его помощью осуществляется слежение за радиационной обстановкой в околоземном космическом пространстве и солнечными вспышками с мягким энергетическим спектром, обнаружение и детальная регистрация жестких ($E_\gamma > 50$ кэВ) вспышек и гамма-всплесков. За период наблюдений с 15 августа 2001 г. по 22 января 2002 г. прибором ГЕЛИКОН зарегистрировано свыше 600 солнечных вспышек и 5 гамма-всплесков. Большинство вспышек имели мягкие спектры и регистрировались в фоновом режиме с временным разрешением 1 с в восьми смежных интервалах энергии от 26 до 380 кэВ. Одна из мощных солнечных вспышек была зарегистрирована на взрывной фазе 24 декабря в $T_0 = 0:31:41,895$ UT. На рисунках 9–11 приведена временная динамика этой вспышки в восьми энергетических каналах и энергетические спектры, полученные последо-

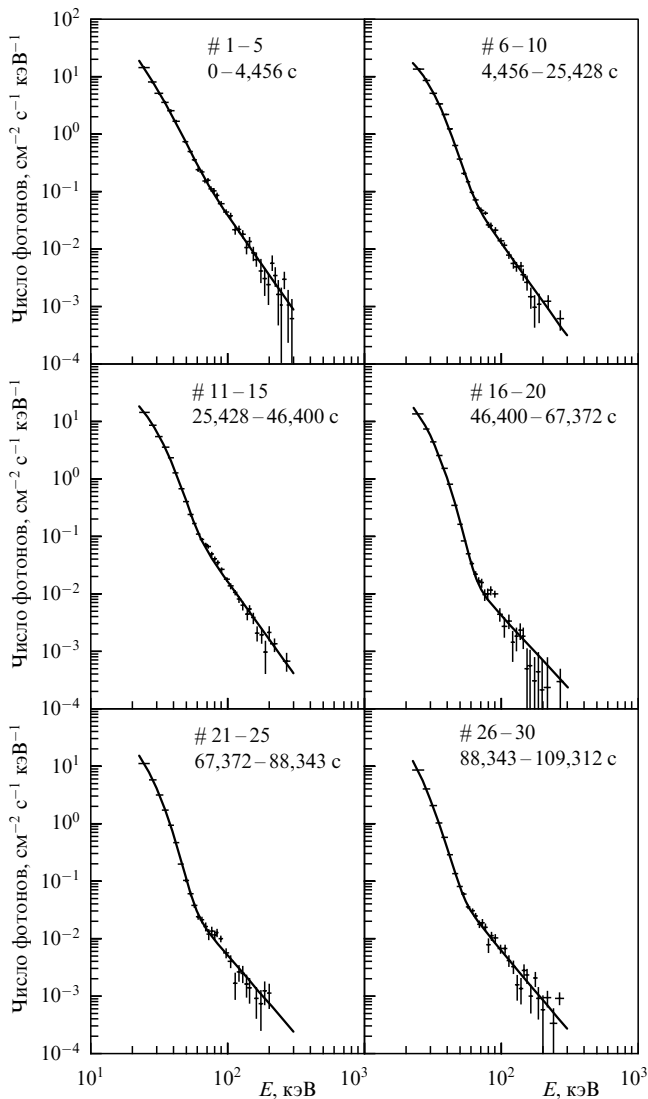


Рис. 10. Энергетические спектры мощной вспышки 24 декабря 2001 г., полученные последовательно на различных фазах события (0–109 с) (гамма-спектрометр ГЕЛИКОН).

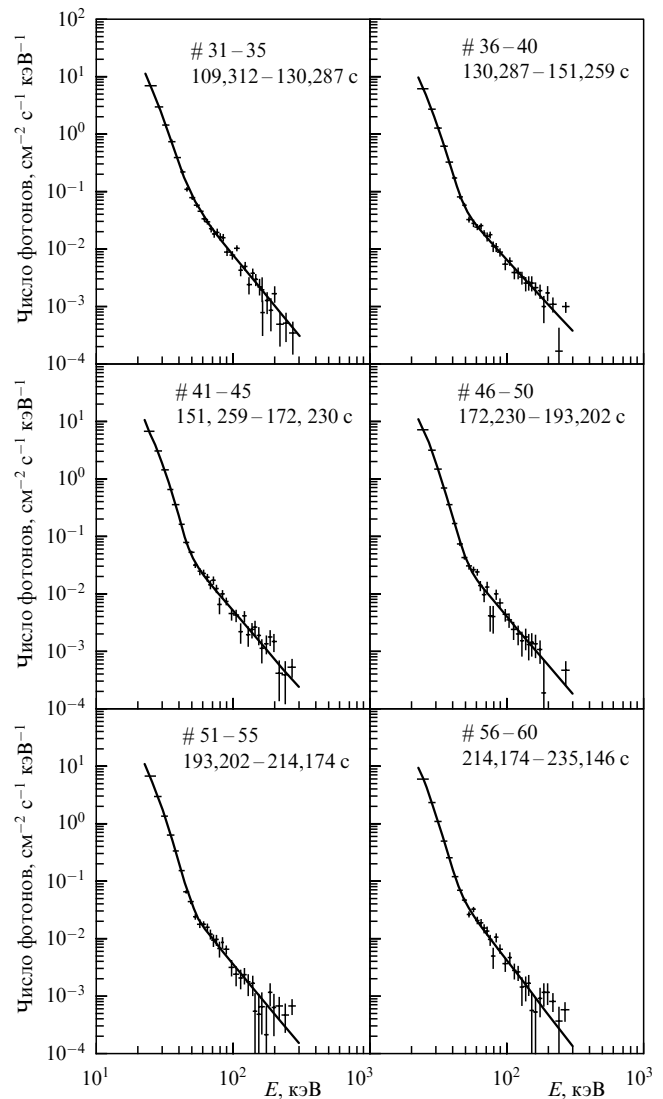


Рис. 11. Энергетические спектры мощной вспышки 24 декабря 2001 г., полученные последовательно на различных фазах события (109–235 с) (гамма-спектрометр ГЕЛИКОН).

вательно на различных фазах события. Времена начала регистрации каждого из спектров и длительность набора информации указаны на рисунках.

Рентгеновский спектрометр РПС-1. Прибор предназначен для исследования солнечных вспышек и их предвестников в рентгеновском диапазоне 3–30 кэВ. За время измерений проведено уточнение калибровочных характеристик прибора, построены карты фоновых условий и набрана статистика экспериментальных данных. В этом диапазоне энергий на SOHO измерения не проводятся, а результаты эксперимента SXS на спутнике *Yohkoh* до настоящего времени не опубликованы.

Амплитудно-временной спектрометр АВС. Прибор предназначен для исследования рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, и в частности, для анализа событий типа солнечная вспышка — гамма-всплеск в энергетических диапазонах $E = 3–30$ кэВ, $E = 0,1–8,0$ МэВ, $E = 2,0–80,0$ МэВ. За время наблюдений зарегистрировано несколько десятков кандидатов в события типа солнечная вспышка или гамма-всплеск, для которых получены энергетические спектры для

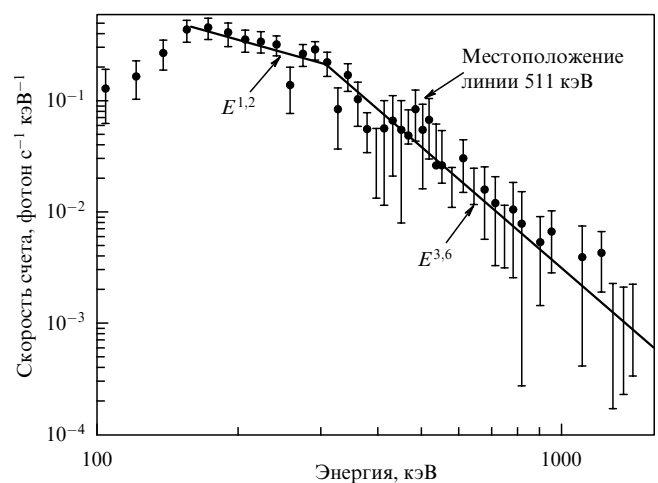


Рис. 12. Дифференциальный энергетический спектр события 18.09.2001, полученный с помощью амплитудно-временного спектрометра АВС.

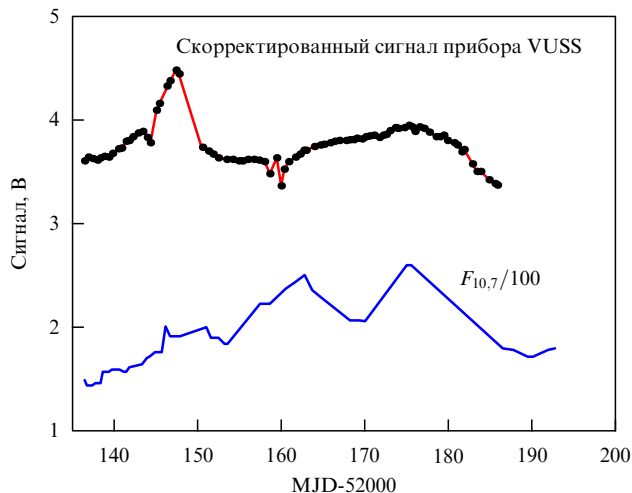


Рис. 13. Временная запись сигнала, пропорционального потоку УФ излучения, прибором ВУСС-Л и поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см. По оси x — дни в системе исчисления MJD.

разных фаз события (до события, во время события и после его окончания). Длительность событий-кандидатов изменяется от 16 с до 3–5 мин. На рисунке 12 для события 18.09.2001 по результатам измерений восстановлен дифференциальный энергетический спектр, на котором заметен излом в области энергии 300 кэВ и спектральная особенность, которую можно соотнести с аннигиляционной линией 511 кэВ.

Солнечный ультрафиолетовый радиометр СУФР-Сп-К. Аппаратура СУФР-Сп-К измеряет потоки ультрафиолетового излучения Солнца как звезды в нескольких спектральных интервалах от 1 до 130 нм и имеет в отличие от SOHO более широкий спектральный диапазон. Помимо научных задач выполняются задачи мониторинга одного из наиболее существенных элементов космической погоды — геоэффективного излучения Солнца. С помощью аппаратуры СУФР в рентгеновском диапазоне длин волн $\lambda < 12$ нм получены данные о мощной вспышке класса X-5.3В 25 августа в 16 ч 23 мин UT.

Ультрафиолетовый солнечный спектрофотометр ВУСС-Л. Прибор ВУСС-Л проводит измерения в полосе около 120 нм и предназначен для исследования УФ излучения Солнца вблизи резонансной линии водорода $H L_{\alpha}$. По результатам измерений получены многочисленные данные о потоке ультрафиолетового излучения в линии лайман-альфа, интенсивность которой по предварительным оценкам составила ~ 10 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Временная запись потока УФ излучения прибором ВУСС-Л показана на рис. 13.

Регистрируемое приборами СУФР-Сп-К и ВУСС-Л УФ излучение Солнца как звезды воздействует на верхние слои атмосферы Земли и является важной характеристикой активности Солнца на временах его цикличности.

Комплекс приборов СКЛ для исследования солнечных космических лучей. Комплекс научной аппаратуры СКЛ состоит из трех приборов — СОНГ (Спектрометр гамма-излучения и нейтронов, научный руководитель С.П. Рюмин), МКЛ (Монитор космических лучей, научный руководитель С.Н. Кузнецов) и СКИ-3 (Спектрометр космического излучения, научный руководитель

А.Ф. Подорольский) и предназначен для комплексных исследований солнечных космических лучей и их проявлений в околоземном космическом пространстве. Прибор СОНГ регистрирует спектры рентгеновского и гамма-излучений в диапазоне энергий 0,03–100 МэВ, детальные спектры гамма-линий в диапазоне 0,3–20 МэВ, нейтроны с энергиями > 20 МэВ, потоки заряженных частиц космических лучей — протонов с энергиями > 70 МэВ и электронов с энергиями > 50 МэВ. Прибор МКЛ измеряет потоки и спектры протонов с энергиями 1–200 МэВ и электронов с энергиями 0,5–12 МэВ. Прибор СКИ-3 измеряет химический состав и спектры ионов в диапазоне $Z = 1-10$ и диапазоне энергий 1,5–20 МэВ на нуклон для He, 4–40 МэВ на нуклон для Ne. По сравнению с приборами, установленными на SOHO и Yohkoh, спектрометр СОНГ обладает способностью регистрации высокоэнергетических (с энергиями до 100 МэВ) гамма-квантов, что, в свою очередь, дает возможность наблюдать гамма-кванты от распада π^0 -мезонов, образующихся во взаимодействиях высокоэнергетических протонов. Результаты проведенных измерений на КОРОНАС-Ф показали, что прибор СОНГ обладает фоном для регистрации солнечных нейтронов не менее чем в 5–7 раз ниже по сравнению с GRS (SMM) — единственным прибором, регистрировавшим солнечные нейтроны в том же диапазоне энергий.

Вспышка 04.11.2001 в 16 ч 20 мин привела к одному из крупнейших возрастаний потока солнечных частиц в околоземном пространстве. На рисунке 14 приводятся данные патрульного детектора прибора СПР-Н. Спутник в это время проходил полярную шапку. Поток рентгеновского излучения в областях 1 и 5 соответствует тормозному излучению электронов внешнего пояса, в области 2 наблюдался всплеск магнитосферных электронов (данные прибора МКЛ), возрастания 3 и 4 являются реальными возрастаниями рентгеновского излучения. Сравнение с данными спутника GOES показало, что несмотря на непрерывное возрастание потока теплового рентгеновского излучения с 16 ч 03 мин до 16 ч 20 мин тормозное излучение свидетельствовало по крайней мере о двух импульсах ускорения частиц на Солнце.

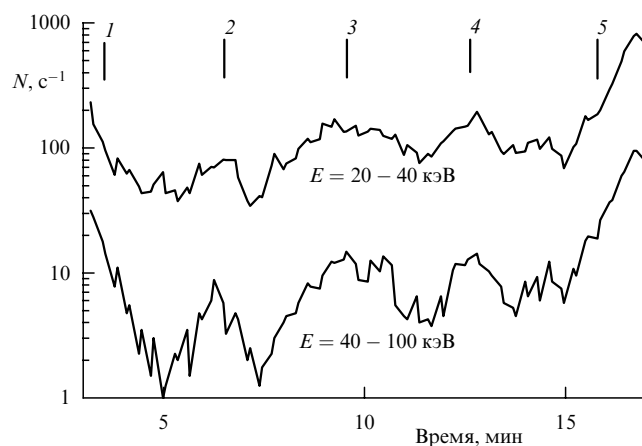


Рис. 14. Показания мониторингового рентгеновского детектора прибора СПР-Н во время солнечной вспышки. Возрастания 1, 2 и 5 — тормозное излучение магнитосферных электронов. Возрастания 3 и 4 — рентгеновское излучение внемагнитосферного источника (солнечная вспышка).

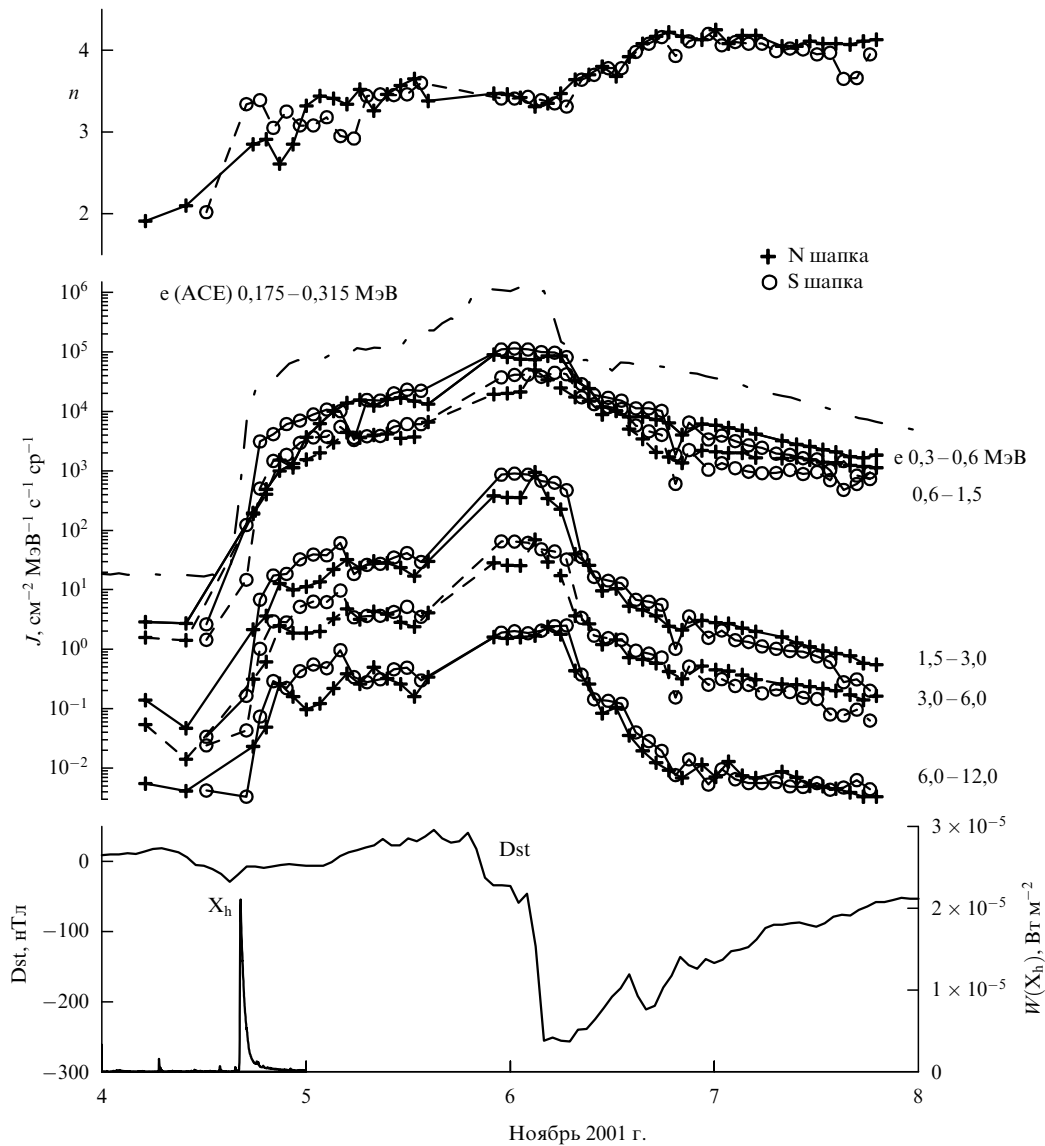


Рис. 15. Некоторые следствия солнечной вспышки 4 ноября 2001 г. в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли. Нижняя панель: X_h — тепловое вспыхивающее рентгеновское излучение по данным GOES 8, Dst-вариация 4–7 ноября 2001 г. Средняя панель — данные о потоках электронов с энергией 0,175–0,315 МэВ в межпланетном пространстве (по данным спутника ACE), а также данные о потоках электронов с энергией 0,3–12 МэВ в полярных шапках (комплекс СКЛ КОРОНАС-Ф). Верхняя панель — изменение показателя степени энергетического спектра электронов со временем (комплекс СКЛ КОРОНАС-Ф).

После вспышки появились солнечные высокоэнергетические частицы и 5 ноября в 20 ч начались геомагнитные возмущения, связанные с приходом корональной плазмы, инжектированной во вспышке 4 ноября. На нижней панели рис. 15 показаны излучение солнечной вспышки в 16:20 UT 4 ноября по данным GOES 8 и Dst-вариация. Видно, что геомагнитное возмущение, связанное с приходом к Земле коронального выброса массы (КВМ), началось приблизительно в 20 ч UT 5 ноября. Средняя путевая скорость КВМ $\sim 1700 \text{ км с}^{-1}$, следовательно, перед КВМ должна существовать мощная ударная волна. Измерения межпланетного магнитного поля на ИСЗ ACE, WIND, GEOTAIL подтверждают этот вывод. Эта ударная волна может служить мощным источником высокоэнергетических частиц. Измерения протонов и ионов с энергией от 1 до 100 МэВ на нуклон показали возрастание потоков этих частиц от момента вспышки до прихода КВМ к Земле. При этом ударная

волна эффективно ускоряла электроны. На средней панели рис. 15 показаны временные зависимости потоков электронов с энергией от 0,3 до 12 МэВ, которые не измерялись на других спутниках в это время вне геомагнитосферы. На верхней панели рис. 15 приведено изменение показателя энергетического спектра электронов. Спектр электронов практически не изменялся, пока КВМ приближался к Земле. Спектр электронов сделался мягче, и поток электронов так же, как поток протонов и ионов, стал уменьшаться при удалении КВМ от Земли.

На спутнике КОРОНАС-Ф измерялись также потоки ионов с энергией от 2 до 40 МэВ на нуклон. Временные вариации ионов от C до Si были подобны вариациям протонов и электронов. Химический состав ионов на протяжении всей вспышки высокоэнергетических частиц практически не изменялся. В таблице 3 приведено процентное содержание различных элементов относительно кислорода для вспышки 4–7 ноября 2001 г.

Таблица 3. Процентное содержание различных элементов (ядер с энергией 11,4–23 МэВ на нуклон) относительно кислорода для четырех интервалов времени в течение вспышки 4–7 ноября 2001 г.

Время	C	N	O	Ne	Mg	Si
22 h 04 Nov–15 h 05 Nov	39,0 ± 3,9	11,9 ± 1,7	100	14,4 ± 2,3	17,9 ± 2,4	17,4 ± 2,2
22 h 05 Nov–07 h 06 Nov	45,5 ± 3,4	10,4 ± 1,3	100	12,0 ± 1,4	20,6 ± 2,0	16,8 ± 1,9
07 h 06 Nov–19 h 06 Nov	42,4 ± 6,5	11,2 ± 2,7	100	12,4 ± 2,7	16,8 ± 3,4	10,4 ± 2,6
19 h 06 Nov–20 h 07 Nov	54,7 ± 12,6	8,5 ± 2,0	100	12,2 ± 4,6	21,6 ± 6,7	18,9 ± 6,0

Благодарности. Авторы благодарят Т.В. Казачевскую, Ю.Д. Котова, Г.Е. Кочарова, С.Н. Кузнецова, Н.И. Лебедева, Е.П. Мазеца, А.А. Нусинова, В.М. Панкова, А.Ф. Подорольского, С.П. Рюмина и Я. Сильвестра за предоставление обработанных данных со спутника КОРОНАС-Ф, которые были использованы при написании настоящей статьи.

Список литературы

1. *The SOHO Mission: Scientific and Technical Aspects of the Instruments* (ESA SP, 0379-6566, № 1104, Compiled by T D Guyenne) (Paris: European Space Agency, 1989)
2. Jimenez A et al. *Astron. Astrophys.* **193** 298 (1988)
3. Аветисян Э А и др. "Рентгеновская изображающая спектроскопия Солнца в области 1,85–335 Å в эксперименте СПИРИТ (СРТ-К, РЕС-К) на спутнике "КОРОНАС-Ф" *Письма в Астрон. журн.* (в печати)

PACS numbers: 04.40.Dg, 97.60.–s

Звезды Вольфа – Райе и релятивистские объекты

А.М. Черепашук

1. Введение

Звезды Вольфа – Райе (WR), отождествляемые по сильным и широким линиям излучения гелия, азота, углерода и кислорода в разных стадиях ионизации, были открыты в 1867 г. французскими учеными М. Вольфом и Ж. Райе [1]. Мы рассмотрим лишь массивные ($m = 5–50M_{\odot}$) звезды WR I типа населения Галактики, которые в среднем концентрируются к галактической плоскости. Признаками звезд WR обладают также маломассивные горячие звезды — ядра планетарных туманностей, которые мы в данной статье рассматривать не будем.

Всего известно 227 звезд WR в нашей Галактике и около 300 — в других ближайших Галактиках [2]. Полное число звезд WR в Галактике оценивается в одну-две тысячи.

В последнее время выявляется тесная связь между эволюцией звезд WR и образованием нейтронных звезд (НЗ) и черных дыр (ЧД) [3–5], а также генерацией космических гамма-всплесков [6, 7].

2. О природе звезд WR

По современным представлениям, звезды WR являются обнаженными гелиевыми ядрами первоначально массивных ($m > 30–40M_{\odot}$) звезд, потерявших основную часть своих водородных оболочек либо в результате обмена веществом в тесных двойных

системах (ТДС) [8], либо вследствие интенсивного истечения одиночных массивных звезд в виде звездного ветра [9, 10]. Мощный эмиссионный линейчатый спектр звезд WR формируется вблизи основания звездного ветра, истекающего со скоростями в 1–3 тыс км с⁻¹, по-видимому, под действием давления радиации горячего "ядра", с темпом потери массы $\sim 10^{-5}M_{\odot}$ в год (см. монографии [11, 12] и ссылки в них). Механизм ускорения ветров звезд WR пока окончательно не выяснен.

Звезды WR делятся на две последовательности: азотную (WN) и углеродную (WC). В спектрах звезд WN в основном содержатся линии азота, а в спектрах звезд WC преобладают линии углерода и кислорода. Кроме того среди звезд WR выявляется немногочисленная группа звезд с усиленными линиями кислорода (WO-звезды).

В спектрах звезд WN и WC присутствуют линии гелия и водорода, однако линии водорода весьма слабы ввиду преимущественно гелиевого химического состава звезд WR. Последовательность звезд WN–WC–WO интерпретируется как эволюционная [8]. Сразу после обнажения ядра массивной звезды оно обогащено продуктами CNO-цикла термоядерных реакций. Поэтому вначале поверхность звезды WR обогащена азотом (WN-стадия). По мере потери массы в виде звездного ветра у звезды WR обнажаются слои, обогащенные углеродом в результате термоядерных превращений гелия в углерод в реакции тройного столкновения α -частиц (WC-стадия). Последующая потеря вещества обнажает слои звезды WR, обогащенные кислородом в результате реакции захвата α -частиц ядрами атомов углерода (WO-стадия). Средняя масса звезд WN составляет $\sim 22M_{\odot}$, а звезд WC — $12M_{\odot}$, что качественно согласуется с описанным сценарием эволюции звезд WR. Примерно половина звезд WR входит в состав двойных систем WR+O, содержащих в качестве спутников массивные горячие звезды спектрального класса O.

Звезды WR, как массивные, горячие, невырожденные, в основном гелиевые звезды, находящиеся на поздней стадии эволюции, должны взрываться как сверхновые типа Ib и Ic и формировать в результате коллапса своих CO-ядер релятивистские объекты. Кроме того, поскольку звезды WR лишены мощных водородных оболочек, это облегчает трансформацию энергии коллапса в наблюдаемое гамма-излучение [6, 7]. К настоящему времени измерены массы 23 звезд WR в двойных WR+O системах и массы 34 релятивистских объектов (19 НЗ и 15 ЧД) в рентгеновских двойных системах и двойных системах с радиопульсарами (см. обзоры [4, 13–16] и ссылки в них, а также недавние публикации [17–20]).