

Глава 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ИСПОЛНЕННЫХ СПЕКТРОМЕТРОМ РЕСИК

З.Кордылевски, Я.Сильвестер, Б.Сильвестер, А.Кемпа,
М.Ковалински, В.Тшебински

В рентгеновской спектроскопии обычно используется данные полученные с помощью спектрометров с кристаллами, играющими роль дисперсионных элементов. Согласно закону Брэгга, длина волны λ рентгеновского излучения “отраженного” от кристалла зависит от угла падения Θ . Эта зависимость имеет вид:

$$k\lambda = 2d \sin \Theta,$$

где k - порядок отражения, а d - постоянна решетки кристалла. Последством изменения угла падения излучения на кристалл получается рентгеновский спектр из диапазона длин волн соответствующего крайним величинам угла поворота кристалла.

Рентгеновские спектрометры с плоскими кристаллами обладают некоторым недостатком, особенно при использовании для наблюдений спектров солнечных вспышек. Для получения спектра путем сканирования, изменяющего угол падения, нужно некоторое время, иногда несколько минут. Это затрудняет интерпретацию полученных спектров быстременяющихся динамических источников излучения, такими, например, являются солнечные вспышки. Получаемые спектры неоднородные - отдельные части спектра излучаются плазмой с разными физическими характеристиками, что связано с изменением физических условий во время сканирования.

Однородные мгновенные спектры источников быстременяющихся со временем можно получить используя в спектрометре вместо подвижных плоских изогнутые неподвижные кристаллы. Облучая такой кристалл параллельном пучком рентгеновского излучения, сразу после “отражения” получается весь спектр с некоторого диапазона длин волн, так как угол падения на изогнутую поверхность кристалла является монотонной функцией от положения точки падения, измеряемого вдоль кристалла. С другой стороны усложняется регистрация спектра, поскольку она требует использования так называемых позиционных детекторов рентгеновского излучения. Такой детектор должен обладать возможностью определения линейной координаты точек (вдоль направления дисперсии), на которые попадают кванты излучения. Таким путем можно одновременно измерять интенсивности излучения

4 Гл. 1. Исследование физических процессов спектрометром РЕСИК

в отдельных длинах волн. Схема спектрометра с изогнутыми кристаллами представлена на рис. 1.1.

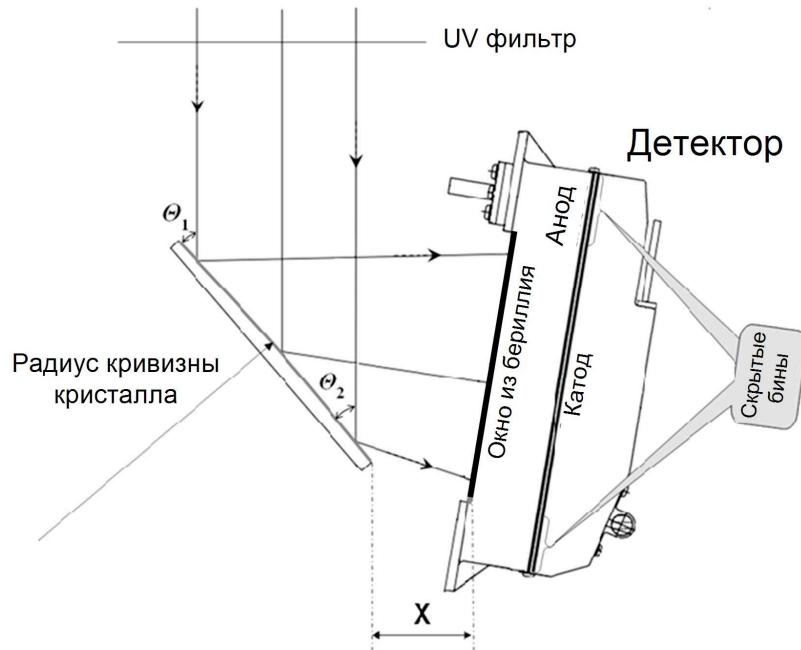


Рис. 1.1. Схема спектрометра с изогнутыми кристаллами использованного в эксперименте РЕСИК. Пучек параллельных лучей падает сверху на поверхность кристалла, изогнутого по цилиндрической форме (указан радиус). Угол падения плавно меняется вдоль кристалла. Вследствие того отдельные точки окна детектора освещаются излучением с разными длинами волн - получается спектр рентгеновского излучения.

Начиная с восемидесятых годов прошлого столетия, в Лаборатории физики солнца Центра космических исследований Польской академии наук во Вроцлаве велись работы с рентгеновскими спектрометрами для исследования излучения Солнца. Работы с польскими спектрометрами, которые начались на геофизических ракетах Вертикаль 8 и Вертикаль 9 [1], были продолжены с так называемыми допплеровскими спектрометрами на ракете Вертикаль 11 [2] и спутнике КОРОНАС-И [3], а наконец привели к конструкции спектрометра РЕСИК с изогнутыми кристаллами на объект КОРОНАС-Ф [4]. При составлении аппаратуры РЕСИК в качестве образца использовано похожий спектрометр BCS работающий на спутнике Yohkoh [5]. Разработка спектрометра РЕСИК проводилась

совместно группами сотрудников из Морской исследовательской лаборатории (NRL, США), Резерфордской лаборатории (RAL) и Муллардовской космической лаборатории (MSSL, Великобритания). В работах принимали участие научные сотрудники Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (Россия). Общее руководство работ осуществлялось Лабораторией физики солнца ЦКИ ПАН.

Спектрометр РЕСИК, которого общий вид представлен на рис. 1.2, состоялся из двух секций (А и В), собранных в одном блоке, приспособленным к работе на инструментальной платформе вне герметического контейнера спутника. Блок электроники, включающий компьютер, размещался внутри герметического контейнера объекта КОРОНАС-Ф. В каждой из секции А и В спектрометра дисперсионными элементами становились два кристалла

изготовленные из монокристаллов кремния (Si) и кварца (Qu). Используя кристаллы изготовленные из материалов с небольшим атомным числом Z удалось снизить эффекты флюoresценции, которые, как известно, пропорциональные Z^4 . Флюoresцентное нежелательное излучение появляется вследствие освещения кристаллов солнечном излучением. Используемые в приборе РЕСИК кристаллы изготовлено, изогнуто и прокалибровано в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST).

После дифракции на кристаллах, рентгеновское излучение регистрировалось двумя линейными позиционными пропорциональными детекторами, изготовленными по образцу тех счетчиков, которые использовались в приборе BCS спутника Yohkoh. В каждой из секции А и В спектрометра РЕСИК работал один такой двойной детектор с входным окном из бериллиевой фольги толщиной 125 μm . Каждым из этих детекторов измерялось излучение отраженное отдельно кристаллами кварца и кремния. Разделение сигналов с двух

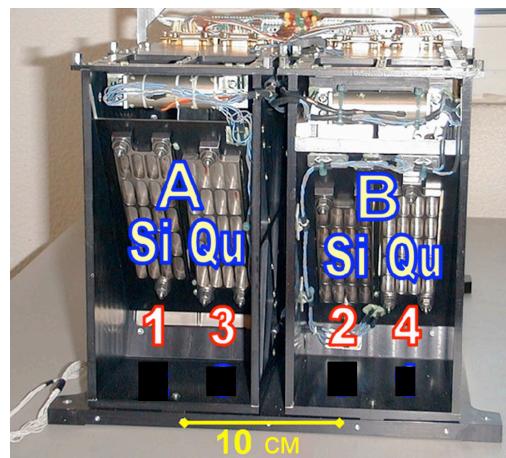


Рис. 1.2. Общий вид спектрометра РЕСИК (со снятым кожухом) со стороны системы крепления кристаллов. На рисунке обозначены секции А и В, материал кристаллов и номера каналов спектрометра.

6 Гл. 1. Исследование физических процессов спектрометром РЕСИК

каналов производилось в счетчике с использованием двух анод с высоковольтным питанием (1.5 кВ), подключенных к предусилителю. Положение точек падения излучения на окно детектора, определенное в 256 бинах, получалось из отношения сигналов измеряемых из двух частей гребеневого катода, расположенного непосредственно за анодом. Изза небольшого радиуса кривизны используемых кристаллов длина бинов составляла 0.02 - 0.04 Å. Эти величины немножко больше естественных ширин спектральных линий, а также больше инструментальной ширины кривой отражения от кристалла. В полете несколько раз проводилась калибровка детекторов с использованием радиопрепарата Fe^{55} , выдвигаемого в поле зрения окон счетчиков. В аппаратуре РЕСИК использовано запасные элементы (детекторы, высоковольтные питатели и электронные платы обрабатывающие сигналы с детекторов), оставшиеся с эксперимента BCS из ИСЗ Yohkoh.

Правильный отбор материала кристаллов, радиусов их кривизны, а также оптимальное взаимное размещение кристаллов и детекторов внутри прибора обеспечило получение спектров практически непрерывным образом в широком диапазоне длин волн с 3.3 Å по 6.1 Å. Этот диапазон особенно полезный для проведения анализа обилия в солнечной плазме. В этот диапазон попадают линии элементов как с высоким, так и с низким потенциалом первой ионизации (FIP). В частности спектры полученные с использованием прибора РЕСИК захватывают эмиссионные линии таких элементов как: Ar (FIP=15.8 эв), S (FIP=10.4 эв), Si (FIP=8.2 эв) и K (FIP=4.6 эв). Детальные характеристики четырех каналов спектрометра РЕСИК приведены в Таблице 1.1.

В связи с беспрецедентной чувствительностью спектрометра РЕСИК стало возможным проводить измерения не только мощных, но тоже слабых солнечных вспышек. В приборе применен динамический метод бортовой регулировки времени накопления сигнала (DGI). Бортовой компьютер аппаратуры РЕСИК анализировал уровень эмиссии наблюдаемого рентгеновского излучения Солнца и автоматически подбирал оптимальное время накопления DGI. Таким образом, во время фазы роста мощной вспышки, время DGI могло принимать величину 5 минут в начале вспышки, снижаясь даже до 1 секунды в максимуме явления.

Прибор РЕСИК успешно функционировал в полете почти два года. Этот срок можно разделить на несколько этапов. После первоначального, контрольного включения на короткий срок в половине октября 2001 года, рабочие включение наступило 24 августа 2001 года и длилось по 7 октября 2001 года. В то же время, 25 августа 2001 года, на Солнце произошла очень мощная вспышка. Анализ первых наблюдений показал на необходимость доработки бортовой программы работы прибора РЕСИК. На время проведения доработок с прибора снято питание, чтобы не ухудшать

Таблица 1.1

Параметры спектрометра РЕСИК.

		Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4
Детектор		A	B	A	B
Кристалл		Si	Si	Quartz	Quartz
Плоскость		111	111	10̄10	10̄10
2d [Å]		6.27	6.27	8.51	8.51
Радиус кривизны [см]		110.0	100.0	145.0	52.5
Длина [см]		12.8	11.6	12.8	12.8
Расстояние X детектор-кристалл* [см]		3.74	4.66	4.12	4.75
Угол падения [гр]		29.5-39.7	35.0-44.9	28.2-36.6	31.7-48.2
Rc** [μрад]		53	52	21	18
Длина волны***	Номинальный диапазон [Å]	3.40-3.80	3.83-4.27	4.35-4.86	5.00-6.05
	Максимальный диапазон [Å]	3.33-3.90	3.78-4.32	4.23-4.92	4.90-6.15
Спектральное разрешение [мÅ]		8	9	12	17
Дисперсия** [мÅ бин ⁻¹]		2.49	2.28	2.85	4.99
Главные спектральные линии		Ar XVIII, K XVIII	Ar XVII, S XV	S XVI	S XV, Si XIV, Si XIII

* Минимальное расстояние кристалл-детектор измеряется вдоль перпендикулярной к направлению на источник.

** Величины полного коэффициента отражения и дисперсии приведены для первого порядка отражения в центральной части кристалла.

*** Номинальный диапазон - для пучка излучения параллельного к оптической оси прибора; Максимальный диапазон - с учетом пучков максимально наклоненных к оптической оси (угол наклона сравнимый с угловым радиусом Солнца).

8 Гл. 1. Исследование физических процессов спектрометром РЕСИК

параметры детекторов. На переломе января и февраля 2002 года снова включено питание и прибор уже непрерывно работал по 22 мая 2003 года. Для получения самых лучших результатов наблюдений, во время активного функционирования прибора несколько раз изменялись по наземным командам параметры его работы. Оптимальные параметры подобрано только в январе 2003 года. Начиная с того времени собрано особенно ценный материал для множества вспышек, в том числе для 14 явлений (январь -

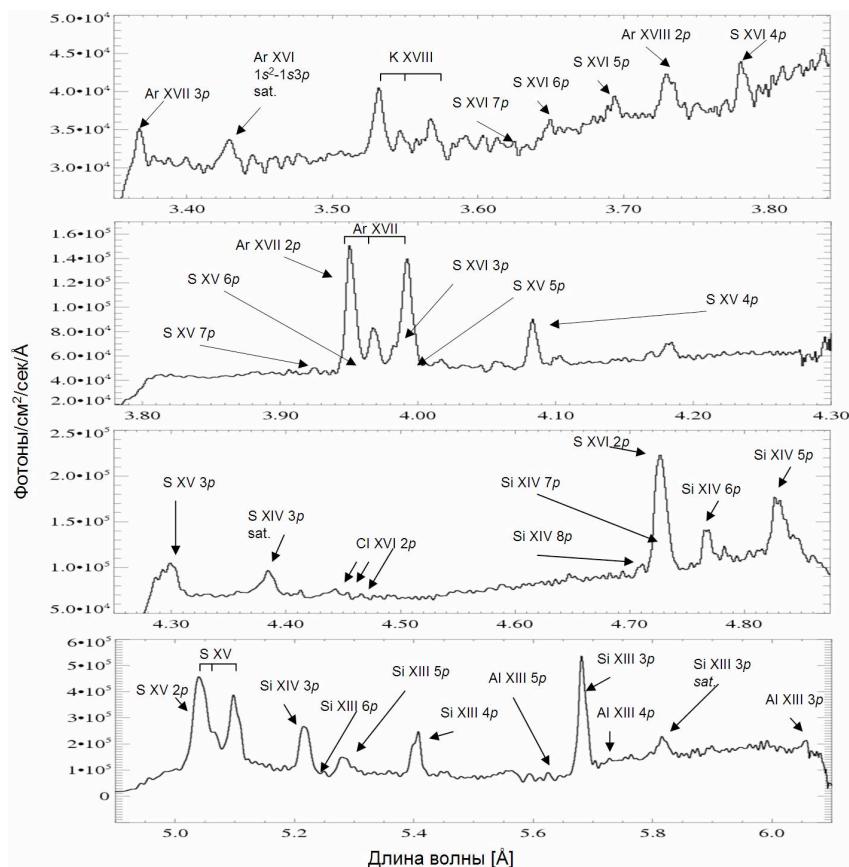


Рис. 1.3. Усредненные спектры 14 вспышек, которые наблюдались в период январь-март 2003 г. Приведены спектры получены в четырех каналах прибора РЕСИК (диапазон 3.35 - 6.05 Å). Указана идентификация линий, из которых многие наблюдались впервые в астрофизической плазме.

март 2003; средняя солнечная активность), которых средний спектр представлен на рис. 1.3. Прибор РЕСИК зарегистрировал около

миллиона рентгеновских спектров. Каталог наблюдений представлен на сайте http://www.cbk.pan.wroc.pl/resik_catalogue.htm.

В процессе редукции наблюдавших спектров учитывалось несколько факторов. Одним из них был эффект "notch" (FPS), дающий искусственные пики в спектрах вследствие деления целых чисел, которые определяли положения фотонов зарегистрированных детектором. Существенным фактором в процессе обработки данных было правильное чтение результатов наземной калибровки и калибровок проведенных в полете с помощью радиопрепарата Fe^{55} . Много усилий требовало устранение эффекта флюoresценции кристаллов, вызванной излучением Солнца. Это излучение добавлялось к наблюдаемому уровню континуума. Часть этого эффекта удалось уменьшить путем подборания подходящих параметров работы прибора, а остальную часть можно было учесть только численным путем. Для того требовалось хорошее знание параметров детекторов с лабораторной калибровки, а также исполнение в полете особых последовательности работы прибора. На это потребовалось 34 часа измерений, которые проведено начиная с 30 августа по 5 сентября 2002 года.

Полученные спектры в диапазоне 3.3-6.1 Å интересны тем, что в этой области длин волн они наблюдались впервые с такой высокой чувствительностью и спектральным разрешением. Вдобавок, благодаря тщательной проверке прибора как лабораторной (RAL, MSSL), так и в полете, удалось хорошо калибровать наблюдательный материал, достигая абсолютного уровня погрешности не превышающего 20%. На рис. 1.3 представлены спектры из четырех каналов спектрометра РЕСИК, усредненные по данным для 14 вспышек разных баллов. Эти усредненные спектры были получены путем суммирования нескольких десятков индивидуальных регистраций на фазе роста, максимума и затухания вспышек. Суммирование проводилось с целью увеличения статистики и выявления всех спектральных особенностей характерных как для горячей, так и более холодной плазмы.

Спектрометр РЕСИК измерял спектры в широком диапазоне интенсивности излучения, охватываемым четыре порядки. Таким образом получались спектры не только для фазы максимума мощных вспышек, но тоже во время фазы их развития и затухания, а даже те, которые формировались в плазме спокойной короны. Примером являются наблюдения мощной вспышки, которая произошла 21 января 2003 года на лимбе солнечного диска. Эта вспышка продолжалась почти пять часов и достигнула уровня M1.9 по рентгеновской шкале ГОЕС. На рис. 1.4 приведены два солнечные спектры - один (левая сторона), для спокойных условий на Солнце, полученный за 5 часов до максимума этой вспышки, и второй (правая сторона) для фазы развития вспышки. Сразу замечается разница между этими спектрами, которая связана не только с ростом

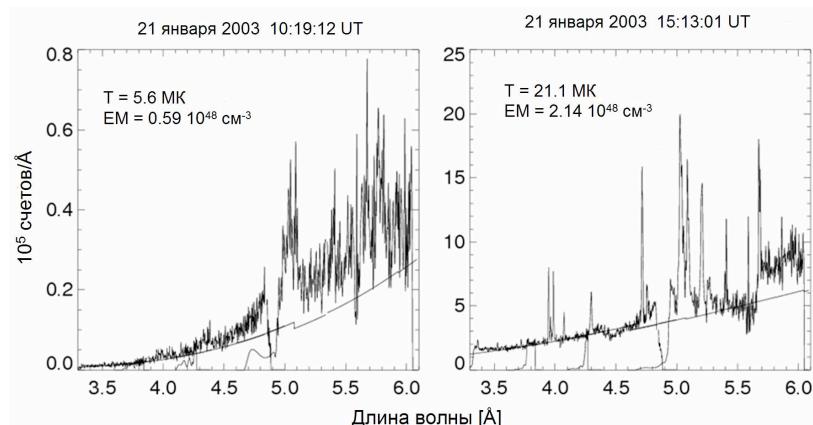


Рис. 1.4. Сравнение спектров, полученных прибором РЕСИК во время условий спокойного Солнца (левая часть) и во время вспышки класса M1.9 (правая часть). Тонкой линией пробегающей внизу спектров указан уровень непрерывного излучения, вычисленный с помощью кода CHIANTI на основании температуры и меры эмиссии, указанных на рисунке. Спектры сильно различаются как по интенсивности, так и по соотношениям интенсивностей в отдельных спектральных линиях.

общего уровня по интенсивности, но тоже с присутствием отдельных спектральных линий и отношениями их интенсивностей. Например гелиоподобный триплет Ar XVII ($\lambda \approx 3.95 \text{ \AA}$) очень интенсивный только во время развития вспышки. Тонкая сплошная линия продвигающаяся внизу спектров изображает уровень непрерывного излучения, вычисленного с помощью кода CHIANTI. Вычисления проводились на основании характеристических параметров плазмы источника (температура T и мера эмиссии EM), указанных на рисунке. Эти параметры были определенные по отношению потоков в первым и четвертом каналах спектрометра РЕСИК предполагая, что излучающая плазма является изотермической. Временной ход изменений интенсивностей в ряду хорошо выделяющихся спектральных линий представлен на рис. 1.5. Для улучшения просмотра зависимости, нулевые уровни отдельных кривых сдвинуто таким образом, чтобы они не пересекались. Видно, что когда быстро затухает излучение в "горячих" линиях (например Ar XVIII, Ar XVII, K XVIII), излучение в более холодных линиях падает значительно медленнее.

При калибровке спектрометра очень тщательно проводилась спектральная привязка шкалы длин волн. Использовалась "численная" модель геометрии отдельных секций прибора. Точность определения взаимных положений детектора и кристаллов в этой модели лучше 0.1 мм. Привязка шкалы длин волн определяется такими факторами, как: радиус кривизны кристалла, взаимное

расположение кристалла и окошка детектора, и линейность электронной системы определения положения попадания квантов. Одним из самых важных физических факторов, влияющих на привязку шкалы длин волн, является положение источника эмиссии относительно плоскости дифракции. В зависимости от размещения активной области или вспышки на Солнце, наблюдаемые положения линий могут смещаться на несколько бинов вдоль анода счетчика.

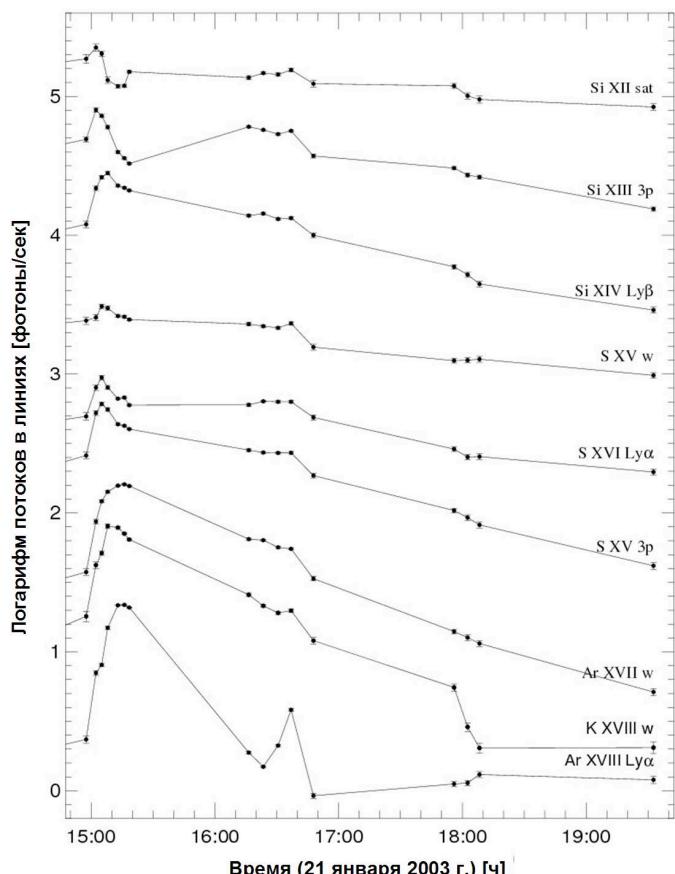


Рис. 1.5. Временные изменения потоков в отдельных спектральных линиях, наблюдавшихся прибором РЕСИК во время вспышки 21 января 2003 года. Эта вспышка, рентгеновского класса M1.9, произошла на лимбе Солнца. Отделные кривые вертикально сдвинуты, чтобы не пересекались.

Учет вышеуказанных факторов, а также данных об ориентации оси объекта относительно центра диска Солнца, дали возможность определения длин волн отдельных спектральных линий с точностью

Таблица 1.2

Главные эмиссионные линии видны в спектрах первого порядка отражения.

Номер	λ [Å]	T [МК]	Ион	Доминирующий переход
1	3.36	22	Ar XVII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^{1,3}P_1$
2	3.43	19	Ar XVI	сателлит к [1]
3	3.53	26	K XVIII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$
4	3.57	19	K XVIII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2s \ ^3S_1$
5	3.59	17	K XVII	сателлит к [3]
6	3.70	26	S XVI	$1s \ ^2S_{1/2} - 5p \ ^2P_{3/2,1/2}$
7	3.74	36	Ar XVIII	$1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{3/2,1/2}$
8	3.79	26	S XVI	$1s \ ^2S_{1/2} - 4p \ ^2P_{3/2,1/2}$
9	3.95	22	Ar XVII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$
10	3.97	22	Ar XVII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_{1,2} \ (\underline{x+y})$
11	3.99	22	Ar XVII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2s \ ^3S_1$
12	4.02		?	
13	4.09	16	S XV	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s4p \ ^1P_1$
14	4.10	14	S XIV	сателлит к $[1s^2 \ ^1S_0 - 1s5p \ ^1P_1]$
15	4.18	35	Cl XVII	$1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{3/2,1/2}$
16	4.30	15	S XV	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^1P_1$
17	4.39	14	S XIV	сателлит к [16]
18	4.44	19	Cl XVI	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$
19	4.73	24	S XVI	$1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{3/2,1/2}$
20	4.77		?	
21	4.83	14	Si XIV	$1s \ ^2S_{1/2} - 5p \ ^2P_{3/2,1/2}$
22	4.96	24	Si XIV	$1s \ ^2S_{1/2} - 4p \ ^2P_{3/2,1/2}$
23	5.04	13	S XV	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1)$
24	5.10	14	S XV	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2s \ ^3S_1)$
25	5.22	14	Si XIV	$1s \ ^2S_{1/2} - 3p \ ^2P_{3/2,1/2}$
26	5.28	15	Si XIII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s5p \ ^1P_1$
27	5.40	11	Si XIII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s4p \ ^1P_1$
28	5.59		?	
29	5.68	10	Si XIII	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^1P_1$
30	5.82	7	Si XII	сателлит к [29]
31	5.87		?	

до 0.001 Å, что позволило сравнить значения длин волн наблюдаемых линий с теоретическими расчетами. Хорошая привязка шкалы длин волн является основанием для идентификации новых спектральных особенностей, указанных на рис. 1.3. В наблюдаемой области спектра присутствуют линии, соответствующие главным резонансным электронным переходам в водороподобных ионах Al, Si, S, и Ar и в гелиоподобных ионах Si, S, Cl, Ar и K. Особым достижением было отождествление впервые новых линий хлора [6] и калия[7]. Полный перечень отождествленных спектральных линий приведен в Таблицы 1.2 (для первого порядка отражения) и Таблицы 1.3 (для третьего порядка отражения). В таблицах указаны: длина волны, температура, для которой функция эмиссии имеет максимум, название иона и соответствующий переход.

Таблица 1.3

Главные эмиссионные линии видны в спектрах третьего порядка отражения.

Номер	λ [Å]	T [МК]	Ион	Доминирующий переход
1	1.457		?	
2	1.542	180	Ni XXVIII	$1s^2 \text{S}_{1/2} - 2p^2 \text{P}_{3/2,1/2}$
3	1.571	60	Fe XXV	$1s^2 \text{S}_0 - 1s3p \text{P}_1$
4	1.591	80	Ni XXVII	$1s^2 \text{S}_0 - 1s2p \text{P}_1$
5	1.750		Fe K β	
6	1.781	150	Fe XXVI	$1s^2 \text{S}_{1/2} - 2p^2 \text{P}_{3/2,1/2}$
7	1.850	54	Fe XXV	$1s^2 \text{S}_0 - 1s2p \text{P}_1$
8	1.910	30	Fe	много соединенных
9	1.980		?	
10	2.025		?	

На полученных спектрах видны линии соответствующие переходам как из низких возбужденных уровней $n=2$, которые наблюдались раньше, так и те до сих пор не наблюдавшиеся, для которых $n=10$. Кроме того в спектрах видны запрещенные и интеркомбинационные линии, своеобразные гелиоподобным ионом, а также многочисленные сателлиты, формирующиеся в процессах диэлектронной рекомбинации и возбуждения электронов внутренних оболочек. Значения относительных интенсивностей линий высших составляющих серии, пока по неизвестным причинам, несколько выше теоретических, ожидающихся для тепловой плазмы [8].

При обработке спектров показалось, что отношение интенсивностей пары линий Si XIII (линия-сателлит $\lambda = 5.82$ Å и резонансная линия $\lambda = 5.68$ Å), четко отличающихся от фона, является хорошим индикатором температуры плазмы, соответствующей условиям

"спокойной короны". Величина соотношения уменьшается на порядок при росте температур с 3 до 10 МК [9]. Этот факт предсказывался теорией, но наблюдался впервые на спектрах РЕСИК. Иногда наблюдаемая интенсивность сателлитной линии выше теоретической для тепловой плазмы, что может свидетельствовать о добавочном нетепловом процессе формирования сателлитных линий.

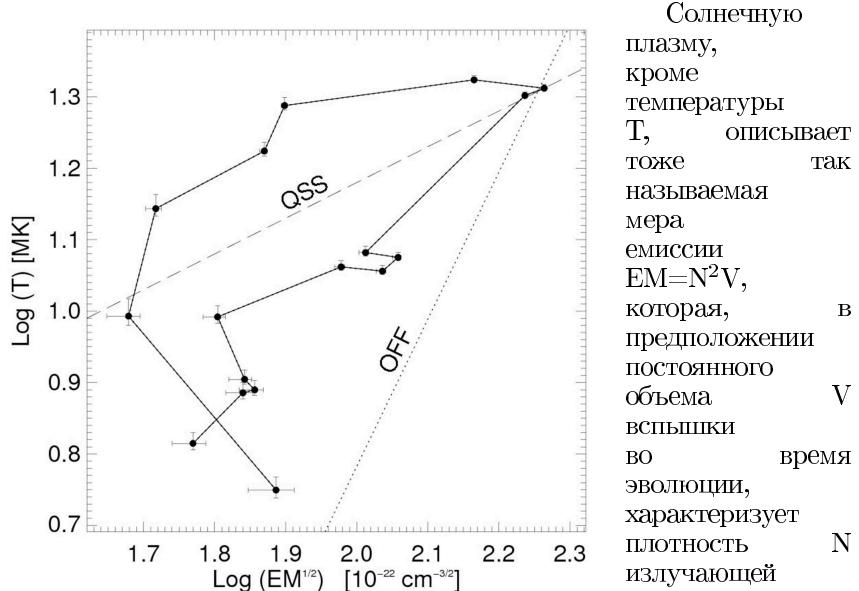


Рис. 1.6. Диагностическая диаграмма DD для вспышки 21 января 2003 г. Расположение точек, полученных из наблюдений, относительно теоретических прямых QSS (квазистационарная эволюция) и OFF (внезапное выключение), определяет характер эволюции процессов вспышечного нагрева. Изогнута линия между прямыми QSS и OFF свидетельствует о присутствии энерговыделения во вспышке, даже на фазе ее затухания.

$ThM = T \times (EM)^{1/2}$ [10], которая линейно связывается с количеством тепловой энергии вспышки. Средние величины T и EM для вышеупомянутой мощной вспышки 21 января 2003 года определялись для 17 временных интервалов на основании отношений полных потоков, включающих непрерывное излучение и спектральные линии, измеряемых в двух соседних каналах спектрометра РЕСИК. Для расчета употреблялся теоретический спектр, вычисленный с использованием так называемого кода CHIANTI [11]. Сравнение хода меры термодинамики ThM и температуры T показывает, что

Солнечную плазму, кроме температуры T , описывает тоже так называемая мера емиссии $EM=N^2V$, которая, в предположении постоянного объема V вспышки во время эволюции, характеризует плотность излучающей плазмы. Важным параметром характерным для излучающей плазмы становится так называемая мера термодинамики

максимум ThM имеет место на 10 минут позже наблюдаемого максимума температуры Т плазмы.

В работах [12], [13] и [14] указано, что для исследования процессов энерговыделения и охлаждения плазмы, очень удобно использовать так называемую диагностическую диаграмму (DD). Это на самом деле диаграмма “температура-плотность”. Рис. 1.6 изображает такую диаграмму для рассматриваемой вспышки. На диаграмме указано две теоретические прямые: одна (OFF), с наклоном 2, соответствует эволюции в случае внезапного отключения нагрева плазмы во вспышке, вторая (QSS), с наклоном 1/2, соответствует квазистационарной эволюции с постепенно уменьшающимся нагревом. Зигзагообразная линия, заключена на рисунке между прямыми OFF и QSS, связывает точки из наблюдений. Для фазы затухания вспышки она расположена вдоль прямой с наклоном ~ 1.1 . Это свидетельствует о том, что на фазе затухания вспышки все время еще происходил существенный нагрев плазмы.

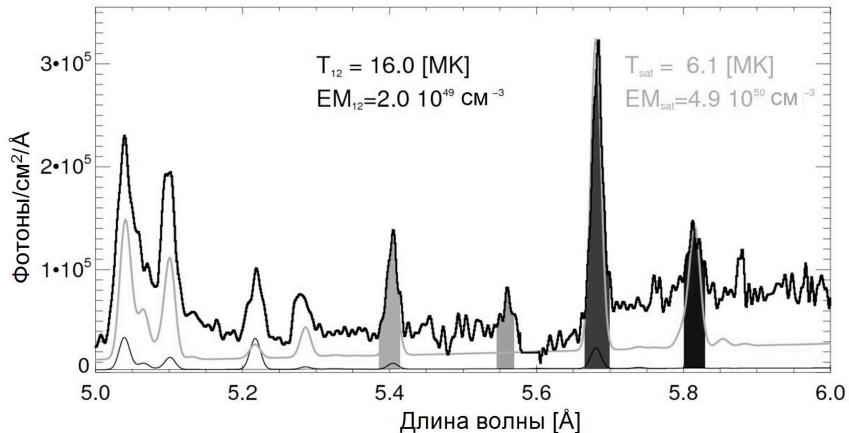


Рис. 1.7. Фрагмент спектра (толстая линия), усредненного по наблюдениям девяти вспышек. Тонкими линиями показаны теоретические спектры, рассчитанные с использованием кода CHIANTI для разных параметров излучающей плазмы. Несовпадение теоретических кривых с наблюдениями свидетельствует о существовании во вспышках многотемпературной плазмы.

Во многих работах по диагностике солнечной плазмы принимается однотемпературная модель. На рис. 1.7 толстой линией представлен небольшой фрагмент спектра в области 5 - 6 Å, полученный путем усреднения наблюдений из девяти выбранных вспышек, которые произошли в начале 2003 года (с января по март). Тонкой линией указан теоретический спектр, вычисленный с использованием кода CHIANTI. Использованные величины температуры Т и меры емиссии ЕМ были получены в однотемпературном приближении из отношения

16 Гл. 1. Исследование физических процессов спектрометром РЕСИК

потоков в первом ($3.3 - 3.8 \text{ \AA}$) и втором ($3.8 - 4.3 \text{ \AA}$) спектральных каналах прибора РЕСИК. Поскольку эти два спектры не совпадают, теоретический расчет повторено, принимая величины T и E_M , которые были получены из отношений потоков линий чувствительных на температуру, зачерненных на рис. 1.7 [9]. В этом случае тоже не наблюдается полного совпадения вычисленного спектра (светлая кривая) с наблюдаемым. Эти разногласия свидетельствуют о том, что излучающая плазма является мультитемпературной. Из рисунка также видно, что не все наблюдаемые линии имеют своих эквивалентов в расчетах, выполненных с использованием кода CHIANTI.

Таблица 1.4

Спектральные линии, использованные для вычислений формы DEM(T).

Номер	Диапазоны длины волн [\AA]	Главные линии
1	3.340 - 3.368	Ar XVII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^1P_1$
2	3.688 - 3.699	S XVI $1s \ ^2S_{1/2} - 5p \ ^2P_1$
3	3.724 - 3.740	Ar XVIII $1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{1/2,3/2}$
4	3.777 - 3.789	S XVI $1s \ ^2S_{1/2} - 4p \ ^2P_{1/2,3/2}$
5	3.944 - 3.962	Ar XVII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$ (w)
6	3.963 - 3.980	Ar XVII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_{1,2}$ (x+y)
7	3.981 - 4.004	Ar XVII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s2s \ ^3S_1$ (z)
8	4.076 - 4.091	S XV $1s^2 \ ^1S_0 - 1s4p \ ^1P_1$
9	4.288 - 4.315	S XV $1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^1P_1$
10	4.720 - 4.743	S XVI $1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{1/2,3/2}$ (Ly α)
11	5.030 - 5.061	S XV $1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$ (w)
12	5.086 - 5.124	S XV $1s^2 \ ^1S_0 - 1s2s \ ^3S_1$ (z)
13	5.204 - 5.232	Si XIV $1s \ ^2S_{1/2} - 3p \ ^2P_{1/2,3/2}$ (Ly β)
14	5.267 - 5.290	Si XIII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s5p \ ^1P_1$
15	5.396 - 5.417	Si XIII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s4p \ ^1P_1$
16	5.669 - 5.697	Si XIII $1s^2 \ ^1S_0 - 1s3p \ ^1P_1$

С целью детального исследования распределения плазмы солнечной вспышки с температурой удобно пользоваться так называемой дифференциальной мерой емиссии DEM, которую описывает зависимость:

$$\varphi(T) = N^2 dV/dT,$$

где T , N и V обозначают температуру, плотность и объем плазмы во вспышке. Форма распределения $\varphi(T)$ говорит о том, сколько материи находится в данной температуре T , а тем самым более полным образом характеризует физические условия в плазме. Наблюдательный материал, собранный с помощью спектрометра РЕСИК, оказался пригодным для анализа распределения DEM, поскольку включает информацию о потоках как непрерывного излучения, так и множества спектральных линий с диапазона 3.2-6.1 Å, формирующихся в различных температурах. Пользуясь данными по абсолютной калибровке прибора РЕСИК, определено потоки в 16 сильных, хорошо выделяющихся линиях. Список избранных линий представлен в Таблицы 1.4.

На основании наблюдаемых потоков в этих линиях вычислено распределение дифференциальной меры эмиссии DEM с температурой для многих вспышек на разных фазах развития. На самом деле воспользовались потоки в линиях и соответственным континуумом. При вычислениях использовано итерационный алгоритм

Withbroe-Sylwester [15], а теоретические функции эмиссии определяно с использованием кода CHIANTI.

Примером анализа DEM могут служить вычисления проведены для мощной вспышки класса M1.9 с 21 января 2003 года. Результаты для нескольких фаз эволюции вспышки представлены на рис. 1.8. На рисунке видно, что во время всей эволюции вспышки общий вид распределения можно считать двухкомпонентным. Выделяются две компоненты: холодная плазма с температурой

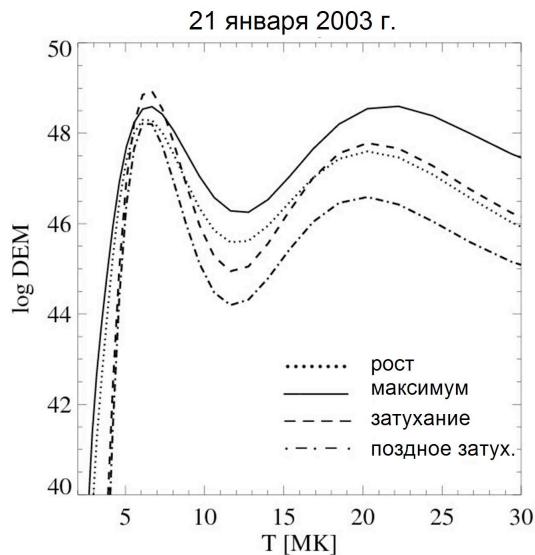


Рис. 1.8. Распределение дифференциальной меры эмиссии с температурой для лимбовой, долгоживущей вспышки 21 января 2003 г. (рентгеновский класс M1.9). Отдельные кривые соответствуют разным фазам развития вспышки. Видно, что на всех этапах эволюции вспышки, она содержала как холодную, так и горячую плазму.

5-8 МК и горячая с температурой 18-25 МК. Температура холодной компоненты почти не изменяется в течение вспышки, хотя существенно изменяется количество этой плазмы. Во время фазы затухания количество холодной плазмы почти на порядок больше горячей, чем во время фазы роста. Количество горячей плазмы во время затухания уменьшается значительно сильнее (на два порядка), при этом максимум температуры этой компоненты смещается с 22 МК в максимуме до 20 МК три часа после максимума.

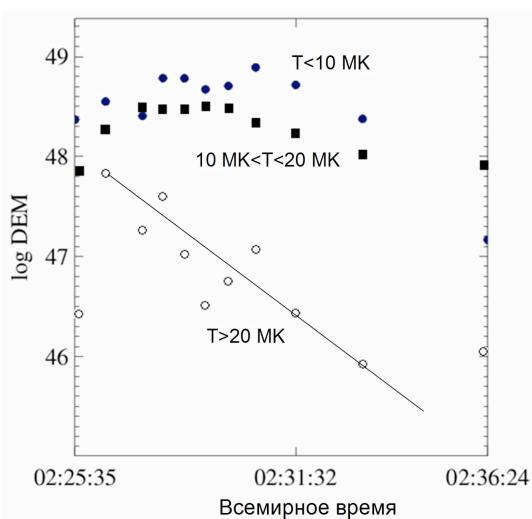


Рис. 1.9. Временные изменения количества плазмы находящейся в разных температурах. Вычисления проводились для вспышки с 21 января 2003 г. (рентгеновский класс C8.1). Поведение самой горячей компоненты заметно отличается от поведения остальных составляющих.

$T < 10$ МК, составляющая с умеренной температурой, заключенной в диапазоне 10 - 20 МК, и горячая составляющая с температурой выше 20 МК. На рис. 1.9 показан временный ход меры эмиссии (количества плазмы) в отдельных температурных диапазонах. Мера эмиссии горячей составляющей постоянно уменьшается почти с самого начала вспышки. Количество более холодной плазмы слабо меняется со временем.

На спектрах, полученных прибором РЕСИК, кроме спектральных линий хорошо выделяется непрерывное излучение - континуум, формирующиеся в процессах тормозного излучения и рекомбинации. Уровень сигнала, измеренный спектрометром РЕСИК в континууме, намного (до сотни раз) превышает уровень шума на орбите

Похожие распределения DEM получено тоже для других, более слабых и короткоживущих вспышек. В частности выполнены расчеты распределений DEM для вспышки класса C8.1, которая произошла тоже 21 января 2001 года, а длилась только 10 минут. Чтобы получить представление о "количественном" поведении отдельных составляющих распределения DEM со временем, выделено три составные части: холодная составляющая плазмы с температурой

спутника, что разрешает использовать континуум в процессе анализа физических параметров излучающей плазмы. Таким образом, измеряемое отношение интенсивности линий к уровню соседнего континуума дает возможность непосредственно определять абсолютные (по отношению к водороду) обилия элементов во вспышечной плазме.

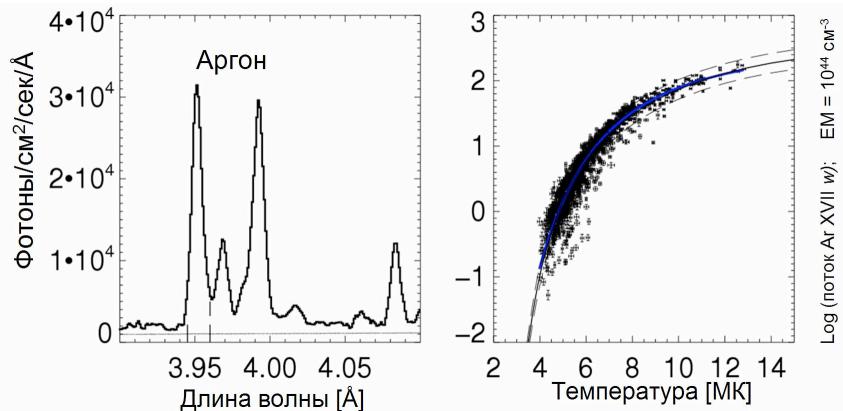


Рис. 1.10. С левой стороны рисунка показан фрагмент спектра, полученного путем суммирования многих (~ 1200) спектров вспышек, наблюдаемых прибором РЕСИК в начале 2003 года. Спектр захватывает триплет гелиоподобного иона Ar XVII. На основании наблюдений потоков сильной линии w этого триплета ($\lambda = 3.95 \text{ \AA}$) получено зависимость “поток-температура”, представленную в правой части рисунка. Точками обозначены величины вычисленные из наблюдений, сплошной линией нарисована зависимость, предсказываемая теоретически для ионизационного равновесия и среднего коронального обилия аргона. Верхняя и нижняя линии соответствуют вычислениям для принятого обилия аргона в два раза больше и два раза меньше среднего значения.

Определения химического состава на основании анализа спектров, полученных с помощью прибора РЕСИК, привело к выводу, что в плазме вспышек обилие элементов, для которых $FIP < 10$ эв, выше обилий характерных для фотосферной плазмы. До сих пор этот факт был известным из спектральных наблюдений только в случае кальция [16] и [17]. О точности полученных результатов свидетельствуют данные, представлены на рис. 1.10. По левой стороне рисунка представлен участок спектра, полученный путем суммирования множества спектров, собранных за 400 часов наблюдений (~ 1200 спектров), проведенных спектрометром с января по март 2003 года. Этот спектр захватывает триплет гелиоподобного иона аргона Ar XVII, которого резонансную линию w , соответствующую переходу $1s^2-1s2p$, использовано в дальнейших обсуждениях. На основании соотношений полных потоков, измеряемых в первом и четвертом

каналах спектрометра для ~ 1200 спектров наблюдаемых в начале 2003 года, определялось температуру Т и полную меру эмиссии ЕМ. Полученный ряд этих параметров составлял базу для вычисления непрерывного излучения и нормировки на единицу меры эмиссии потоков наблюдаемых в спектральной линии триплета аргона. Таким образом исключалась зависимость потока спектральной линии от количества плазмы в источнике. Зависимость наблюдаемого нормированного потока от температуры представлена в правой части рис. 1.10. Отдельные точки на рисунке соответствуют отдельным спектрам вспышек и безвспышечных активных областей, измеренным при разных физических условиях на Солнце. Из рисунка видно, что точки укладываются вдоль характерной кривой. Три расчетные линии, представлены на рисунки, получено теоретически для ионизационного равновесия [18] предполагая три разные величины обилия аргона: 5.64×10^{-6} (верхняя), 2.82×10^{-6} (средняя - сплошная) и 1.41×10^{-6} (нижняя).

Большое количество спектров собранных спектрометром РЕСИК будет в дальнейшем анализировано с целью определения изменения термодинамических параметров плазмы и обилия отдельных элементов во время эволюции индивидуальных вспышек.

Работы по спектрометру РЕСИК выполнено при поддержке Польского фонда по научным исследованиям (проект 2.P03C.005.08 - по технической конструкции; проект 1.P03D.017.29 - по обработке данных).

1. Siarkowski M., Sylwester J. The analysis of MG XI Ion X-ray spectra obtained from Vertical 9 rocket experiment // Artificial Satellites, Space Physics, 1985, 20, 63-70.
2. Sylwester J. Experience of Wroclaw team in construction of solar X-ray instruments // ESA SP, 2001, 493, 377-382.
3. Sylwester J., Farnik F. DIOGENESS Soft X-ray Spectrometer-photometer for Studies of Flare Energy Balance // Astronomical Institute of Czechoslovakia, Vol 41, No 3, 149-157, 1990
4. Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowalinski M., Nowak S., Plocieniak S., Siarkowski M., Sylwester B., Trzebinski W., Bakala J., Culhane J.L., Whyndham M., Bentley R.D., Guttridge P.R., Phillips K.J.H., Lang J., Brown C.M., Doschek G.A., Kuznetsov V.D., Oraevsky V.N., Stepanov A.I., Lisin D.V. RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition// Solar Physics, 2005, 226, 45-72.
5. Culhane, J. L., Hiei, E., Doschek, G. A., Cruise, A. M., Ogawara, Y., Uchida, Y., Bentley, R. D., Brown, C.M., Lang, J., Watanabe, T., Bowles, J. A., Deslattes, R. D., Feldman, U., Fludra, A., Guttridge, P., Henins, A., Lapington, J., Magraw, J., Mariska, J. T., Payne, J., Phillips,

- K. J. H., Sheather, P., Slater, K., Tanaka, K., Towndraw, E., Trow, M. W., and Yamaguchi, A. The Bragg Crystal Spectrometer for Solar-A // Solar Physics, 1991, 136, 89.
6. Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., Phillips K.J.H., Landi E. Detection of H- and He-like resonance lines of chlorine in solar flare spectra // Proceedings of IAU Symposium 223, 2004, Vol. 223, 671 - 672.
7. Phillips K.J.H., Sylwester J., Sylwester B., Landi E. Solar Flare Abundances of Potassium, Argon and Sulphur // ApJ, 2003, 589, 113-116.
8. Kepa A., Sylwester J., Sylwester B., Siarkowski M., Phillips K.J.H. and Kuznetsov V.D. Observations of 1s²-1s(np) and 1s-np Lines in RESIK Soft X-ray Spectra // Advances in Space Research, 2006, 38, 7, 1538-1542
9. Phillips K.J.H., Dubau J., Sylwester B., Sylwester J., Culhane J.L., Doschek G.A., Lang J. Temperature-sensitive Line Ratios Diagnostics of the Corona Based on Satellite-to-Resonance Line Ratios of 1s²-1s(np) Transitions // Advances in Space Res., 2006, 38, 7, 1543-1546
10. Sylwester, J., Garcia, H.A., and Sylwester, B. Quantitative Interpretation of GOES soft X-ray measurements // Astron. Astrophys. 1995, 293, 577-585.
11. Dere K.P., Landi E., Mason H.E., Monsignori Fossi B.C., Young P.R. CHIANTI - an atomic database for emission lines // A&AS 1997, 125, 149-173.
12. Serio, S., Reale, F., Jakimiec, J., Sylwester, B., and Sylwester J. Dynamics of flaring loops I. Thermodynamic decay scaling laws // Astron. Astrophys. 1991, 241, 197-202.
13. Jakimiec, J., Sylwester, B., Sylwester, J., Serio, S., Peres, G. and Reale F. Dynamics of flaring loops II. Flare evolution in the density-temperature diagram // Astron. Astrophys. 1992, 253, 269-276.
14. Sylwester, B., Sylwester, J., Serio, S., Reale F., Bentley R.D., and Fludra, A. Dynamics of flaring loops III. Interpretation of flare evolution in the emission measure-temperature diagram // Astron. Astrophys. 1993, 267, 586-594.
15. Sylwester, J., Schrijver, J. and Mewe, R. Multitemperature analysis of solar X-ray line emission // Solar Phys. 1980, 67, 285-309.
16. Sylwester J., Lemen J.R., Mewe R. Variation in Observed Coronal Calcium Abundance of X-ray Flare Plasmas // Nature, 1984, 310, 665 - 666.
17. Sylwester J., Lemen J.R., Bentley R.D., Fludra, Zolcinski M.C. Detailed Evidence for Flare- to Flare Variations of the Coronal Calcium Abundance // ApJ, 1998, 501, 397-407.
18. Mazzotta P., Mazzitelli G., Colafrancesco S., Vittorio N. Ionization balance for optically thin plasmas: Rate coefficients for all atoms and ions of the elements H to NI // A&AS 1998, 133, 403-409.