

УДК 523.98

ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВСПЫШКАХ И АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ПО ЛИНИЯМ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 280–330 Å В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СПИРИТ/КОРОНАС-Ф

© 2010 г. С. В. Шестов^{1,2*}, С. В. Кузин¹, А. М. Урнов^{1,2}, А. С. Ульянов^{1,2}, С. А. Богачев¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Поступила в редакцию 04.05.2009 г.

По данным спектрогелиографа СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф проведена диагностика температуры плазмы в солнечных вспышках и активных областях. По относительным интенсивностям спектральных линий, зарегистрированных в спектральном диапазоне 280–330 Å в период с 2001 по 2005 г., определено температурное распределение дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ). Анализ этих распределений позволил сделать вывод о существовании активных областей с различными “характерными” температурными составами. Впервые по спектральным данным ВУФ диапазона и монохроматическим изображениям в рентгеновской линии установлено наличие в активных областях горячей плазмы с температурами $\lg T = 6.8–7.2$. Также впервые получено распределение ДМЭ для мощных вспышек с длительным затуханием и обнаружено подобие температурного состава для вспышек разных классов на стадиях затухания. На основе рассчитанных ДМЭ проведено моделирование исследованных спектров. Обсуждаются систематические расхождения рассчитанных и измеренных интенсивностей линий.

Ключевые слова: ОС КОРОНАС-Ф, СПИРИТ, ВУФ-спектры, вспышки, активные области, дифференциальная мера эмиссии.

ВВЕДЕНИЕ

Температура, плотность и мера эмиссии (МЭ) — важнейшие параметры, характеризующие состояние астрофизической и лабораторной плазмы. Получение экспериментальной информации о различных распределениях этих величин, в частности, температурного распределения для МЭ, необходимо для построения теоретических моделей устойчивых плазменных структур и явлений активности в солнечной короне — вспышек, активных областей, корональных петель и др. Наиболее полные данные о физических условиях в солнечной плазме могут быть получены методами спектроскопической диагностики на основе анализа спектральных изображений в коротковолновых областях спектра. В рентгеновской области, однако, этот метод был осуществлен лишь с помощью широкополосных фильтров в экспериментах Yohkoh и Hinode с небольшим количеством спектральных каналов.

В связи с этим весьма актуальной является задача диагностики по спектральным изображениям, содержащим большое число линий, излучаемых в ВУФ-диапазоне. Благодаря относительно низким порогам возбуждения таких линий по сравнению с рентгеновскими, возможные искажения, вносимые нетепловыми электронами с $E \gg kT$, не влияют на скорость их возбуждения, и, таким образом, электронное распределение можно считать максвелловским.

Спектроскопические наблюдения в ВУФ-диапазоне, выполненные при помощи спектрографов SERTS, SOHO/CDS, SUMER, КОРОНАС-Ф/СПИРИТ для отдельных компактных областей солнечной короны в отсутствие вспышек, свидетельствуют об одновременном существовании плазмы с различной температурой — от $T \sim 80$ тыс. К до $T \sim 5$ млн. К (МК), например, в активных областях (Бросиус и др., 1996; Ланди, Ландини, 1998; Житник и др., 2006), корональ-

* Электронный адрес: sshestov@dgap.mipt.ru

ных петлях (Ланди, Фельдман, 2008; Шмельц и др., 2008) и стримерах (Уоррен, Уоршелл, 2002).

Весьма важным для решения проблемы нагрева активных областей является вопрос о наличии плазмы с высокой температурой > 5 МК. Отметим, что хотя в спектральные диапазоны указанных выше спектрографов попадают “горячие” линии Fe XVII (SERTS), Fe XVI, Si XII, Fe XXIII (CDS) и Ni XIX, Fe XIX (SUMER), их использование для температурной диагностики плазмы на практике встречает определенные сложности. Это связано с невысокой точностью определения интенсивностей этих линий в связи с малой относительной интенсивностью в исследованных областях (Бросиус, др., 2000; Ланди, Ландини, 1998). Поэтому для получения наиболее полной и точной характеристики явлений необходимы многочисленно повторенные измерения спектральных линий, формируемых в широком диапазоне температур, в том числе при “вспышечных” температурах ≥ 10 МК для большого числа плазменных структур.

В настоящее время особую актуальность представляет исследование горячей плазмы вспышек, поскольку количество зарегистрированных спектров вспышек в ВУФ-диапазоне невелико, а наблюдения сильных вспышек практически отсутствуют. Сложность регистрации вспышек связана с их плохой предсказуемостью, компактными размерами и малым временем жизни. В случае спектрографов с ограниченным полем зрения (как в экспериментах SERTS, CDS/SOHO) вероятность зарегистрировать вспышку мала ввиду невозможности одновременного наблюдения всего Солнца. До сих пор основным источником информации по спектральным линиям, наблюдавшимся во время вспышки, является каталог спектральных линий, составленный по наблюдениям в 70-х гг. бесщелевым спектрогелиографом на станции Skylab (Дере, 1978) на основе вспышки класса M2.

Указанные ограничения были частично преодолены в эксперименте СПИРИТ (Житник и др., 2002) на спутнике КОРОНАС-Ф (Ораевский, Собельман, 2002). В состав аппаратуры СПИРИТ входили два независимых спектрогелиографа ВУФ-диапазона, которые регистрировали монохроматические изображения полного диска Солнца в спектральных диапазонах 176–207 Å и 280–330 Å (см. Бейгман и др., 2005).

Систематические наблюдения Солнца аппаратурой СПИРИТ проводились с сентября 2001 по декабрь 2005 г. Было зарегистрировано несколько десятков тысяч спектрогелиограмм, в т.ч. более сотни спектрогелиограмм, содержащих солнечные вспышки. Впервые были зарегистрированы спектры мощнейших солнечных вспышек рентгеновского класса X на разных стадиях их развития.

В настоящей работе приводятся методика и результаты диагностики температурного состава плазмы солнечных вспышек и активных областей на основе анализа дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ). ДМЭ определялась по относительным интенсивностям спектральных линий диапазона 280–330 Å, полученных на основе данных СПИРИТ. Основные задачи настоящей работы заключались в выборе спектральных линий в диапазоне 280–330 Å для определения ДМЭ по данным спектрогелиографа СПИРИТ/КОРОНАС-Ф, определении ДМЭ для плазмы различных явлений и структур солнечной короны по данным спектрогелиографа, моделировании спектров диапазона 280–330 Å для обнаружения возможных систематических отклонений в экспериментально зарегистрированных и модельных спектрах. При расчетах использовались данные и программное обеспечение (ПО) CHIANTI 5.2.1 (Ланди и др., 2006).

НАБЛЮДЕНИЯ

ВУФ-спектрогелиограф на борту спутника КОРОНАС-Ф

Спутник КОРОНАС-Ф (Ораевский, Собельман, 2002), второй спутник российско-украинской программы по исследованию активности Солнца, работал на орбите с середины 2001 до конца 2005 г. На его борту находился комплекс приборов СПИРИТ (Житник и др., 2002), разработанный в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

В состав аппаратуры СПИРИТ входили спектрогелиографы ВУФ-диапазона на спектральные интервалы 176–207 Å и 280–330 Å. Спектрогелиографы были реализованы по бесщелевой схеме с плоской дифракционной решеткой скользящего падения. Оптическая схема и характеристики спектрогелиографов ВУФ-диапазона приведены в работе Бейгмана и др. (2005). При использовании бесщелевой схемы на детекторе спектрогелиографа строятся монохроматические изображения *полного* диска Солнца. К особенностям схемы можно отнести отсутствие излучения в высших порядках дифракции, а малая ширина изображения Солнца вдоль оси дисперсии, составлявшая 0.5 Å, уменьшает переналожение изображений в соседних спектральных линиях. Применение такой оптической схемы в ВУФ-спектрогелиографах аппаратуры СПИРИТ позволило зарегистрировать более 100 спектрогелиограмм, содержащих солнечные вспышки, в том числе было зарегистрировано более 10 спектрогелиограмм диапазона 280–330 Å, содержащих мощнейшие солнечные вспышки класса X.

Таблица 1. Список объектов наблюдения

№	Время, UT	Объект	Примечание
1	06:38 04.11.2001	AR	NOAA 9684, SOT
2	21:21 28.12.2001	AR	NOAA 9742
3	00:34 20.04.2002	AR	NOAA 9906, SOT
4	19:24 20.04.2002	AR	»
5	20:32 21.04.2002	AR	»
6	18:41 24.12.2002	AR	NOAA 0223, 0225, 0229
7	09:06 27.12.2002	AR	NOAA 0223, 0225, 0229
8	03:21 11.01.2003	AR	NOAA 0254
9	04:06 02.02.2003	AR	NOAA 0276
10	16:48 25.02.2004	AR	NOAA 0564
11	17:02 13.03.2004	AR	—
12	17:07 25.07.2004	AR	NOAA 0652 SOT
13	03:59 16.09.2001	F	Вспышка M6.1 (max ~ 03:53)
14	05:21 17.11.2001	F	Вспышка M2.8 (max ~ 05:20)
15	08:29 17.11.2001	F	Вспышка M2.8 (»)
16	13:20 11.09.2005	F	Вспышка M3.2 (max — 13:11), измерена n_e^{**}
17	02:17 16.09.2005	F	Вспышка M4.8 (max — 01:49) + M2.2 (max — 02:20), измерена n_e^{**}
18	21:21 28.12.2001	F	Вспышка X3.4 (max ~ 20:30), опубликован спектр*, SOT
19	02:08 16.07.2004	F	Вспышка X1.4 (max — 02:06), измерена n_e^{**}
20	03:29 16.07.2004	F	Вспышка X1.4 (»)
21	10:42 17.01.2005	F	Вспышка X4.1 (max ~ 09:50), SOT
22	18:34 07.09.2005	F	Вспышка X17 (max — 17:40)
23	20:04 07.09.2005	F	Вспышка X17 (»), измерена n_e^{**}
24	21:35 07.09.2005	F	Вспышка X17 (»), измерена n_e^{**}
25	21:48 08.09.2005	F	Вспышка X5.5 (max — 21:06), измерена n_e^{**}
26	23:19 08.09.2005	F	Вспышка X5.5 (»), измерена n_e^{**}
27	20:29 09.09.2005	F	Вспышка X6.2 (max — 20:03), измерена n_e^{**}
28	21:59 09.09.2005	F	Вспышка X6.2 (»), измерена n_e^{**}
29	22:12 10.09.2005	F	Вспышка X2.2 (max ~ 22:05)
30	23:43 10.09.2005	F	Вспышка X2.2 (»)
31	19:48 13.09.2005	F	Вспышка X1.5 (max — 19:28), измерена n_e^{**}
32	21:19 13.09.2005	F	Вспышка X1.5 (max — 20:04), измерена n_e^{**}

Примечание. AR — активная область, F — вспышка. Время — начальный момент регистрации спектрогелиограммы. Активные области и вспышки, зарегистрированные одновременно, наблюдались в разных местах солнечного диска. Для вспышек рентгеновский класс и время максимума вспышки указаны по данным GOES. Номера активных областей приведены по классификации NOAA. * — каталог спектральных линий опубликован в работе Бейгмана и др. (2005), ** — измеренные плотности опубликованы в работе Шестова и др. (2009). SOT — событие выбрано для исследования по международной программе SOTERIA, <http://soteria-space.eu>.

По результатам наблюдения ВУФ-спектрогелиографов аппаратуры СПИРИТ составлен каталог спектральных линий диапазона 280–330 Å, наблюдавшихся во вспышке класса X3.4 (Бейгман и др., 2005), каталог спектральных линий диапазона 176–207 Å, наблюдавшихся во вспышке класса M5.6 (Шестов и др., 2008), по относительным интенсивностям спектральных линий ионов Fe XI–Fe XIII диапазона 176–207 Å определена плотность плазмы с температурой ~1–3 МК во вспышках (в т.ч. класса X), активных областях, областях спокойного Солнца (Шестов и др., 2009).

В настоящей работе для определения ДМЭ использовались данные ВУФ-спектрогелиографа диапазона 280–330 Å, полученные с сентября 2001 по сентябрь 2005 г. Интенсивности спектральных линий определены с учетом обновленной спектральной чувствительности аппаратуры СПИРИТ. Использовались спектрогелиограммы, содержащие солнечные вспышки классов X и M, зарегистрированные на разных фазах затухания и спектрогелиограммы, зарегистрированные в безвспышечный период.

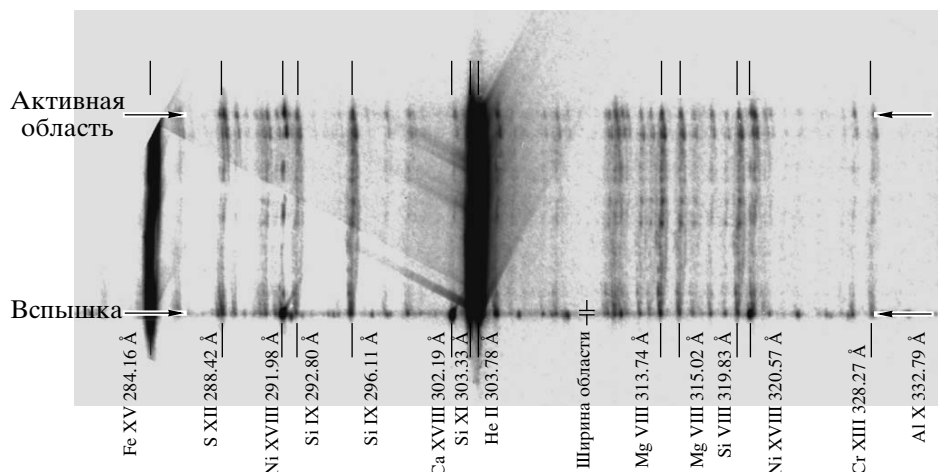


Рис. 1. Спектрогелиограмма диапазона 280–330 Å, зарегистрированная в 21:21 UT 28.12.2001 г. Обозначены некоторые спектральные изображения и отмечены положения вспышки (класс — X3.4, максимум — 20:30) и активной области NOAA 9742, использовавшиеся в настоящей работе, а также отмечен размер области, по которой брался спектр.

Выбор объектов наблюдения

В настоящей работе для анализа были использованы спектры 32 объектов наблюдения — солнечных вспышек с длительным затуханием и активных областей. Использованы 15 спектров вспышек рентгеновского класса X, зарегистрированных на разных фазах, 5 спектров вспышек класса M, 12 спектров активных областей. Полный список всех использованных наблюдений вместе с комментариями представлен в табл. 1. В таблице для вспышек класс и время максимума указано по данным рентгеновских мониторов GOES¹, номера активных областей приведены по классификации National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA².

Пример спектрогелиограммы диапазона 280–330 Å, содержащей вспышку класса X3.4 (объект № 18) и активную область (объект № 2), приведен на рис. 1. Спектрогелиограмма зарегистрирована в 21:21 UT 28.12.2001 г. На ней обозначены некоторые спектральные изображения и отмечены положения вспышки и активной области, использовавшиеся в настоящей работе, а также отмечен размер области, по которой брался спектр.

На рис. 2 приведены изображения солнечной короны, зарегистрированные в близкие моменты времени. На рис. 2а дано изображение в спектральном диапазоне вблизи 195 Å, полученное телескопом EIT на станции SOHO, 2б — монохроматическое изображение Солнца в спектральной

линии $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ иона Mg XII, полученное рентгеновским спектрогелиографом аппаратуры СПИРИТ. На рисунках отмечены участки, для которых получены спектры: активной области NOAA 9742 (объект № 2) и вспышки X3.4 (объект № 18) (см. табл. 1).

Выбор спектральных линий для определения ДМЭ

Хотя в каталоге спектральных линий диапазона 280–330 Å (Бейгман и др., 2005) приводится более 100 спектральных линий, большинство из них блендировано, многие имеют малую интенсивность. Кроме того, в соответствии с постановкой задачи об определении ДМЭ, следует использовать только те спектральные линии, светимости которых не зависят от электронной плотности. В соответствии с этим были выбраны следующие спектральные линии: Ni XVIII 291.98 Å, Fe XXII 292.46 Å, Si IX 296.11 Å, Ca XVIII 302.19 Å, Si XI 303.33 Å, Fe XX 309.29 Å, Si VIII 319.84 Å, Ni XVIII 320.57 Å, Fe XVII 323.65 Å (см. табл. 2). За исключением линий ионов Si VIII–IX, светимости линий не зависят от плотности.

Линия Si IX 296.11 Å блендирована линией Si IX 296.23 Å и их светимость зависит от плотности. Моделирование спектра излучения плазмы вблизи 296 Å для различных температур и плотностей, выполненное с учетом разрешающей способности спектрогелиографа, показало, что линия Si IX 296.11 Å вносит ~75–80% интенсивности в участок спектра вблизи 296.11 Å, и ее светимость меняется не более, чем на 30% при изменении плотности в диапазоне $\lg n_e = 8.5–11$.

¹<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES/goes.html>

²См., например, <http://www.solar.ifa.hawaii.edu/ARMaps/archive.html>

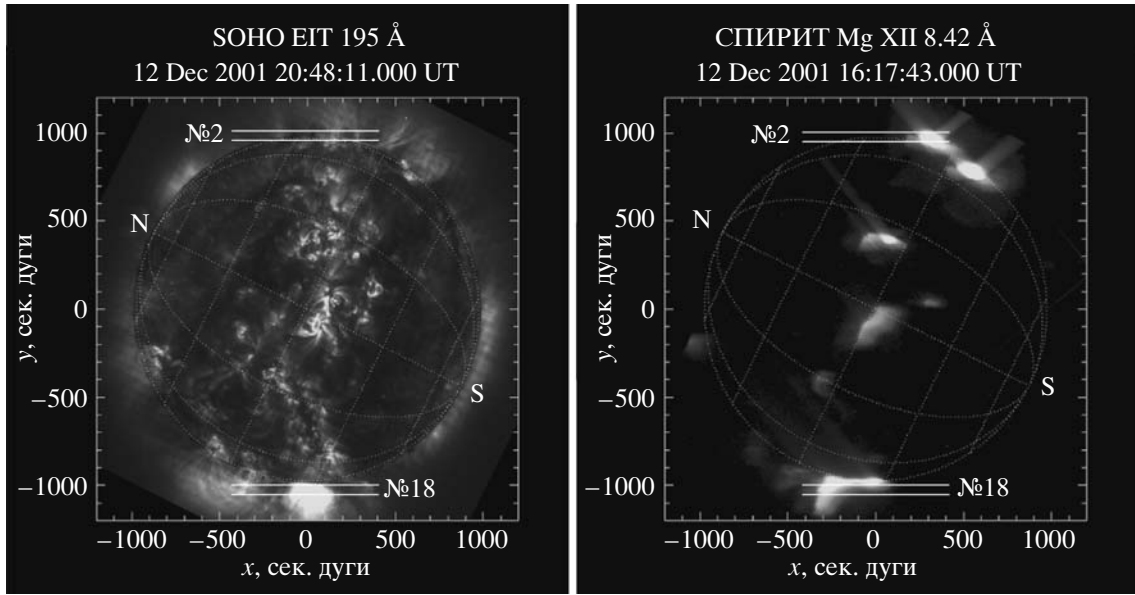


Рис. 2. Изображения солнечной короны, полученные 28.12.2001 телескопом EIT на станции SOHO вблизи 195 Å (а) и спектрогелиографом Mg XII аппаратуры СПИРИТ на длине волны $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ (б). Отмечены участки, для которых получены спектры: активной области NOAA 9742 (объект № 2) и вспышки X3.4 (объект № 18), см. табл. 1.

Светимость линии Si VIII 319.83 Å падает примерно вдвое при повышении плотности от $\lg n_e = 8$ до $\lg n_e = 11 \text{ cm}^{-3}$.

При вычислении ДМЭ светимости рассчитывались для плотности, определенной по одновременным наблюдениям в спектральном диапазоне 176–207 Å (Шестов и др., 2009), если такие измерения были, и $\lg n_e = 9.0$ в противном случае.

Линия Si XI 303.33 Å находится на крыле мощнейшей линии He II 303.78 Å и во многих случаях не разрешается в экспериментальном спектре. Поэтому интенсивность этой линии бралась как оценка сверху и точность контролировалась при последующем анализе.

Интенсивность линии Fe XXII 292.46 Å достаточна для надежного определения только во

вспышках. В других случаях ее интенсивность оценивалась как не превышающая уровень ошибок измерений и контролировалась при последующем анализе.

Светимости выбранных спектральных линий, рассчитанные при помощи ПО CHIANTI, приведены на рис. 3. На рисунке по оси x отложен логарифм температуры, по оси y — светимости $G(T)$, рассчитанные для плотности $\lg n_e = 9.0 \text{ cm}^{-3}$.

Интенсивности спектральных линий

Для определения интенсивностей выбранных спектральных линий по экспериментальным данным использовалась методика, аналогичная использованной в работе Шестова и др. (2009), но адаптированная к спектральному диапазону 280–330 Å. На спектрогелиограмме вычитался фон и вычислялся одномерный спектр для выбранной области. Одномерный спектр был получен суммированием по пяти вертикальным пикселям в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии. В полученном спектре каждая линия аппроксимировалась при помощи кривой Гаусса:

$$i(\lambda) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma} \right)^2 \right],$$

где $i(\lambda)$ — интенсивность (выраженная в цифровых отсчетах) одного пикселя, соответствующего длине волны λ , A — пиковая интенсивность линии (отсчеты/Å), λ_0 — центральная длина волны линии и σ —

Таблица 2. Спектральные линии диапазона 280–330 Å, используемые для расчета ДМЭ

Ni XVIII	$\lambda = 291.98 \text{ \AA}$	$3p^2P_{3/2} \rightarrow 3s^2S_{1/2}$
Fe XXII	$\lambda = 292.46 \text{ \AA}$	$2s2p^2^4P_{3/2} \rightarrow 2s^22p^2P_{3/2}$
Si IX	$\lambda = 296.11 \text{ \AA}$	$2s2p^3^3P_2 \rightarrow 2s^22p^2^3P_2$
Ca XVIII	$\lambda = 302.19 \text{ \AA}$	$1s^22p^2P_{3/2} \rightarrow 1s^22s^2S_{1/2}$
Si XI	$\lambda = 303.33 \text{ \AA}$	$2s2p^1P_1 \rightarrow 2s^2^1S_0$
Fe XX	$\lambda = 309.29 \text{ \AA}$	$2s^22p^3^2P_{3/2} \rightarrow 2s^22p^3^4S_{3/2}$
Si VIII	$\lambda = 319.84 \text{ \AA}$	$2s2p^4^4P_{5/2} \rightarrow 2s^22p^3^4S_{3/2}$
Ni XVIII	$\lambda = 320.57 \text{ \AA}$	$3p^2P_{1/2} \rightarrow 3s^2S_{1/2}$
Fe XVII	$\lambda = 323.65 \text{ \AA}$	$2s^22p^5^3P_2 \rightarrow 2s^22p^5^3S^3P_2$

ее ширина, выражаются в Å. Полная интенсивность линии (выраженная в отсчетах) вычислялась по формуле $I = 2.5A\sigma_{av}$, где $\sigma_{av} = 0.1$ — “средняя” ширина, принималась для всех линий. Точность измерения полной интенсивности отдельных линий составляет ~10% для “сильных линий” (типа Ni XVIII 291.98 Å) и ~30% для “слабых” (типа Fe XVII 323.65 Å).

Результаты измерения интенсивностей для выбранных линий приведены в табл. 3. В таблице указаны интенсивности, выраженные в относительных единицах (цифровых отсчетах), отмечены линии, интенсивность которых следует рассматривать как оценку сверху; в случае, когда интенсивность нельзя было надежно определить по экспериментальному спектру, стоит пропуск. Следует отметить, что использовавшиеся спектрогелиограммы отличаются между собой как временем экспозиции, так и общей чувствительностью аппаратуры, связанной, например, с деградацией рентгеновской оптики. Поэтому относительные интенсивности линий имеет смысл сравнивать между собой только для данного объекта наблюдений (строки в табл. 3). Сравнение интенсивностей линий по различным объектам наблюдений может иметь только качественный характер.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДМЭ

Постановка задачи

Мощность излучения W_{ij} [эрг с⁻¹] в спектральной линии λ_{ij} для оптически тонкой плазмы в объеме V определяется объемным интегралом вида

$$W_{ij} = 4\pi \int G_{ij}(T(\mathbf{r}), N_e(\mathbf{r})) N_e^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где функции $T(\mathbf{r})$, $N_e(\mathbf{r})$ — температура и плотность плазмы в данной точке плазмы, $G_{ij}(T, N_e)$ [эрг см⁺³ с⁻¹ ср⁻¹] — “contribution function” (далее — светимость), связана с локальной светимостью плазмы (плотностью мощности излучения) $F_{ij}(\mathbf{r})$ соотношением:

$$G_{ij}(T(\mathbf{r}), N_e(\mathbf{r})) = \frac{1}{4\pi N_e^2(\mathbf{r})} F_{ij}(\mathbf{r}).$$

Для выбранных нами спектральных линий, кроме линий Si VIII–IX, при плотностях плазмы $N_e < 10^{11}$ см⁻³ выполняется корональное приближение. Для таких уровней G_{ij} не зависит от плотности.

Интеграл по объему V можно свести к интегралу по температуре (Крэйг, Браун, 1976; Урнов и др., 2007):

$$W_{ij} = 4\pi \int_V G_{ij}(T) N_e^2 dV = \quad (2)$$

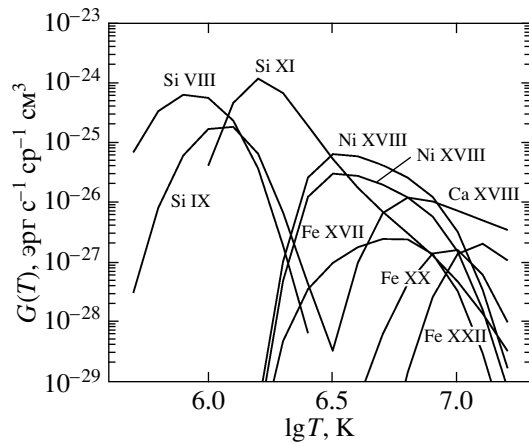


Рис. 3. Светимости спектральных линий диапазона 280–330 Å, использованных для определения ДМЭ. Рассчитано при помощи CHIANTI 5.2.1 для $\lg n_e = 9.0$ см⁻³, ионизационного равновесия mazzotta_et_al.ioneq и корональных обилий coronal_ext.abund.

$$= 4\pi \int_{\Delta T} G_{ij}(T) y(T) dT,$$

где интегрирование производится по диапазону температур, соответствующему объему V . Функция $y(T)$ [см⁻³ К⁻¹], называемая дифференциальной мерой эмиссии (ДМЭ), характеризует распределение плазмы по температуре.

Отметим, что ДМЭ является, фактически, единственной величиной, содержащей информацию о “количестве” и температурно-плотностном распределении излучающей плазмы, которую можно извлечь из интенсивностей спектральных линий. Кроме этого, ее использование при интерпретации спектров позволяет обнаруживать систематические ошибки как аппаратного характера (например, в спектральной чувствительности спектрографа), так и в обилиях и атомных характеристиках, ошибки в идентификации линий или в измеренных интенсивностях, вызванных блендированием.

В настоящей работе для расчета функций светимости и интенсивностей спектральных линий мы использовали программное обеспечение (ПО) и базу данных CHIANTI версии 5.2.1. (Ланди и др., 2006). Функции светимости рассчитывались при помощи процедуры gofnt.pro. Использовались корональные обилия sun_coronal_ext.abund (приведены в табл. 4) и ионизационного равновесия mazzotta_et_al.ioneq. Для определения зависимостей G_{ij} от плотности использовалась процедура pop_plot.pro. Для линий Si VIII–IX $G(T)$ рассчитывалось с учетом n_e , измеренной по одновременным наблюдениям в диапазоне 176–207 Å

Таблица 3. Интенсивности спектральных линий, использовавшиеся для определения ДМЭ

Номер объекта (табл. 1)	Ni XVIII 291.98	Fe XXII 292.46	Si IX 296.11	Ca XVIII 302.19	Si XI 303.33	Fe XX 309.29	Si VIII 319.84	Ni XVIII 320.57	Fe XVII 323.65
1	90	28	39		1500		33	28	
2	915	50	418	275	3750	57	430	645	39
3	240	13	126	45	6950		138	123	
4	240	25	89	75	1170		134	129	
5	843	13	299	150	2500	50	465	415	
6	104	13	74	19	845		78	21	6
7	105	10	150	56	1540	13	128	63	10
8	13	3	139	16	1465		198	25	14
9	470	15	208	73	2108	23	161	138	18
10	575		259	36	1000	36	278	289	108
11	13		206		1000	13	310	14	10
12	133	13	46	50	698		50	45	
13	1568	180	235	1230	5000	148	160	825	118
14	2485	125	370	1318	5000	175	278	865	170
15	1030		250	285	4018	45	233	390	74
16	3135	215	554	2245	3540	303	595	1515	473
17	2130	405	648	2195	3000	218	805	613	258
18	3655	429	674	3203	3750	470	548	1820	416
19	1579	223	237	1555	1804	198	228	475	108
20	1540	150	210	445	2000	43	175	555	140
21	1615		179	1593	5000	185	88	678	135
22	3248	565	347	3215	3615	658	308	2198	704
23	2500		266	1640	3750	200	288	1325	315
24	2053		273	970	4075	230	291	1000	259
25	2173		177	2603	3500	375	350	1150	308
26	3015		219	1480	3634	198	545	1465	530
27	4750	908	753	4405	4250	978	423	2733	1165
28	3355		481	2080	5723	318	535	1635	540
29	3363	508	453	3950	3750	675	280	1730	588
30	3153		497	2085	5730	233	605	1788	540
31	2800	320	522	2110	3000	330	553	1445	383
32	3078	223	688	1800	3750	193	580	1455	485

Примечание. Получено по данным спектрогелиографа СПИРИТ диапазона 280–330 Å. Интенсивность указана в цифровых отсчетах. Для линий, интенсивность которых нельзя было надежно определить по экспериментальному спектру, в таблице стоит пропуск.

спектрогелиографа СПИРИТ (см. Шестов и др., 2009).

Метод расчета ДМЭ

Для определения ДМЭ $y(T)$ по интенсивностям спектральных линий используются различные подходы, среди которых можно отметить основанные на решении системы интегральных уравнений (Харрисон, Томсон, 1991), метод форвард-фиттинга (Монсиньори-Фосси, Ландини, 1991; Бросиус и др., 1996) и другие. Для определения ДМЭ мы использовали оригинальный вероятностный подход, который обладает целым рядом преимуществ: в этом подходе не требуется регуляризация, а получаемые решения не зависят от выбранной сетки температур.

Введем функции

$$P(l) = \frac{W_l}{\sum_l W_l}, \quad P(T) = \frac{4\pi y(T) \sum_l G_l(T)}{\sum_l W_l}, \quad (3)$$

$$P(l/T) = \frac{G_l(T)}{\sum_l G_l(T)},$$

которые принимают положительные значения и удовлетворяют условиям нормировки:

$$\sum_l P(l) = 1, \quad \int_{\Delta T} P(T) dT = 1,$$

$$\sum_l P(l/T) = 1.$$

С учетом (3) уравнение (2) можно переписать в виде

$$P(l) = \int_{\Delta T} P(l/T) P(T) dT,$$

в котором $P(l)$, $P(T)$ могут рассматриваться как функции распределения вероятностей неких случайных величин l , T , а $P(l/T)$ — как функция распределения условной вероятности событий (l/T). Применим теорему Байеса об условных вероятностях:

$$P(T/l) = \frac{P(T)P(l/T)}{\sum_T P(T)P(l/T)},$$

где $P(T/l)$ — функция распределения условной вероятности событий (T/l). Домножая обе части уравнения на $P(l)$ и суммируя по l получим

$$P(T) = P(T) \sum_l \frac{P(l)P(l/T)}{\sum_T P(T)P(l/T)} = \quad (4)$$

$$= P(T) \sum_l \frac{P(l)P(l/T)}{P(l)}.$$

Таблица 4. Используемые обилия

Элемент	Обилие	Элемент	Обилие
H	12.00	S	7.27
He	10.90	Al	7.04
C	8.59	Ca	6.93
Mg	8.15	Ni	6.84
Si	8.10	Cr	6.21
Fe	8.10	K	5.67

Примечание. Обилия взяты из ПО CHIANTI, sun_coronal_ext.abund.

Для построения итерационной схемы представим левую часть уравнения (4) как $(n + 1)$ -й шаг итерационной схемы, а правую — как n -й и интерпретируем $P(l)$ в числителе как экспериментально измеренные величины, а в знаменателе — рассчитанные на основе n -й итерации для $P(T)$. Получим итерационную схему (итерационный метод Байесса — ИМБ, Урнов и др., 2007)

$$P^{n+1}(T) = P^n(T) \sum_l \frac{P^{\text{exp}}(l)P(l/T)}{P^{\text{th}}(l)}. \quad (5)$$

Существенной особенностью метода является отсутствие “формального” требования гладкости получаемых распределений $y(T)$. При тестировании метода было установлено, что при небольшом количестве итераций $n = 5-10$ получаемые решения имеют гладкий вид и весьма близки как качественно, так и количественно к распределению ДМЭ, полученному для тех же спектральных линий при помощи ПО CHIANTI в различных экспериментах. При последовательном увеличении количества итераций для некоторых наборов экспериментальных линий наблюдались δ -образные распределения $y(T)$. Этот факт, в частности, был использован для выбора числа итераций при анализе ДМЭ в настоящей работе с целью получения сглаженных кривых ДМЭ, используемых на данном этапе исследования. Подробный анализ указанных особенностей и степени достоверности полученных ДМЭ будет выполнен в дальнейшем.

Тестирование метода

Была проведена серия модельных тестов с целью определения чувствительности метода к используемой температурной сетке, чувствительности к ошибкам в интенсивностях линий, возможных ограничений на рабочий диапазон температур.

На рис. 4а слева показано сравнение функции $y(T)$, полученной для одних и тех же исходных данных с шагом температуры $\Delta \lg T = 0.001$

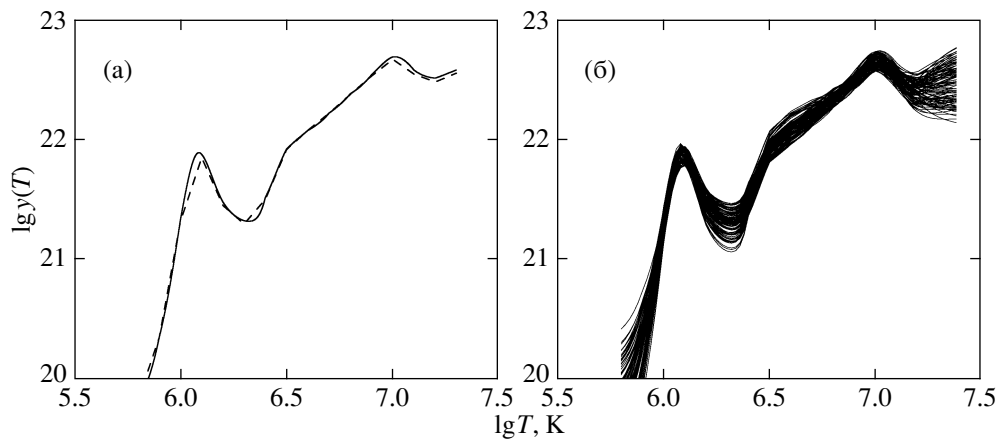


Рис. 4. Тестирование итерационного метода определения ДМЭ: (а) — ДМЭ, полученная для одних и тех же исходных данных с шагом температур $\Delta \lg T = 0.001$ (сплошная линия) и $\Delta \lg T = 0.1$ (штриховая линия); (б) — набор ДМЭ (100 тестов), полученных для одних и тех же исходных данных введением случайной ошибки $\pm 20\%$. На рисунках по оси x отложен логарифм температуры, по оси y — логарифм ДМЭ, выраженной в относительных единицах.

(сплошная линия) и $\Delta \lg T = 0.1$ (штриховая линия).

Оценка уровня достоверности получаемых результатов и степени устойчивости метода к ошибкам измерений интенсивностей линий была проведена следующим моделированием. Исходный набор интенсивностей спектральных линий варьировался на случайную величину до $\pm 20\%$ от исходного значения, после чего для возмущенного набора интенсивностей спектральных линий вычислялась ДМЭ. На рис. 4б справа приведены полученные таким образом ДМЭ для 100 тестов, демонстрирующих уровень достоверности. При увеличении числа тестов картина не менялась.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

Для объектов, указанных в табл. 1, были определены температурные распределения ДМЭ. При расчетах использовался температурный диапазон $\lg T = 5.9-7.2$, шаг температурной сетки $\Delta \lg T = 0.02$, в итерационной схеме использовалось 10 итераций. При таком количестве итераций для большинства спектров и спектральных линий отношение эксперимент/расчет имеют среднее значение ~ 1 и среднеквадратичное отклонение $\sim 25\%$ (см. табл. 5).

Далее приводятся результаты анализа ДМЭ для активных областей, вспышек X класса и M класса.

ДМЭ активных областей

ДМЭ, рассчитанные для 12 активных областей, приведены на рис. 5. Полученные распределения мы разделили на 4 группы в соответствии с их характерной формой. На рисунках по оси x отложен

логарифм температуры, по оси y — логарифм ДМЭ, выраженной в относительных единицах. Напротив кривых на рисунках приведен их номер в соответствии с табл. 1.

На рис. 5а распределения ДМЭ имеют по 2 локальных максимума с температурами $\lg T = 6.2-6.1$ и $\lg T = 6.5-6.7$. На этом же рисунке для сравнения приведена ДМЭ (штриховая кривая), рассчитанная для активной области по данным эксперимента SERTS (Бросиус и др., 1996). Приведенные на рис. 5б ДМЭ характеризуются существенным понижением в области $\lg T = 6.5-6.7$ и максимумом вблизи $\lg T \sim 7.0$. Представленные на рис. 5в ДМЭ имеют примерно постоянное значение в интервале температур $\lg T = 6.0-6.7$. ДМЭ на рис. 5г имеют максимум вблизи $\lg T \sim 6.3$, далее ДМЭ постепенно понижается.

У большинства спектров активных областей точность определения интенсивности линии Fe XXII 292.46 Å невысока ввиду блендирования линиями Ni XVIII 291.98 Å, Fe XV 292.28 Å, Si IX 292.80 Å. Для оценки «чувствительности» полученных ДМЭ к ошибкам в линии Fe XXII 292.46 Å была проведена серия модельных экспериментов. ДМЭ рассчитывались для исходного набора интенсивностей линий, но с пониженными интенсивностями линий Fe XXII. Коэффициенты понижения выбирались случайно в пределах 0.1–1, для каждого объекта наблюдения было проведено по 100 тестов. В полученных кривых наблюдался разброс ДМЭ при температурах $\lg T > 7.0$, достигающий 10-кратного отличия. При этом при меньших температурах ДМЭ существенно не менялась (в рамках диапазона, отмеченного на рис. 4).

Таблица 5. Отношение экспериментально измеренных интенсивностей спектральных линий к интенсивностям, рассчитанным на основе ДМЭ

Номер объекта (табл. 1)	Ni XVIII 291.98	Fe XXII 292.46	Si IX 296.11	Ca XVIII 302.19	Si XI 303.33	Fe XX 309.29	Si VIII 319.84	Ni XVIII 320.57	Fe XVII 323.65
1	1.11	1.00	0.73		1.01		0.88	0.73	
2	0.88	1.21	1.31	0.86	0.99	1.68	0.88	1.32	0.76
3	0.98	1.22	1.10	0.95	1.00		0.96	1.06	
4	1.03	1.57	1.39	0.83	0.98		0.84	1.02	
5	0.97	1.35	1.64	0.90	0.98		0.66	1.13	
6	0.89	1.54	1.18	0.74	0.99		0.92	1.28	1.21
7	0.90	0.91	1.28	0.92	0.99	1.71	0.87	1.14	1.66
8	0.45	0.77	1.07	0.91	1.00		0.97	1.81	3.25
9	1.16	1.35	1.34	0.74	0.99	2.19	0.84	0.72	0.98
10	0.96		1.51	0.32	0.97	4.12	0.82	1.02	3.61
11	0.56		1.26		0.99	5.43	0.92	1.28	7.78
12	1.10	1.11	1.07	0.97	1.00		0.96	0.79	
13	0.95	0.82	1.09	1.04	1.00	1.10	0.86	1.06	1.13
14	1.07	0.69	1.28	1.05	0.99	1.22	0.85	0.79	1.17
15	1.04		1.11	1.03	1.00	1.60	0.93	0.84	1.38
16	0.94	0.70	1.32	1.03	0.99	1.20	0.87	0.96	2.01
17	1.09	0.90	1.32	1.04	0.98	0.91	0.88	0.67	1.80
18	0.95	0.78	1.57	1.02	0.98	1.26	0.77	1.01	1.51
19	1.11	0.74	1.31	1.06	0.99	1.14	0.86	0.71	1.04
20	1.08	1.67	1.31	0.80	0.99	0.83	0.86	0.83	1.83
21	0.96		1.01	1.24	1.01	1.15	0.69	0.86	1.10
22	0.82	0.93	1.41	0.93	0.99	1.53	0.79	1.17	2.51
23	0.90		1.08	1.15	1.00	1.21	0.96	1.01	1.64
24	0.94		1.05	0.99	1.00	1.97	0.97	0.97	1.82
25	0.87		0.80	1.20	1.01	1.33	1.06	0.98	1.55
26	0.91		0.81	1.06	1.02	1.32	1.05	0.94	2.38
27	0.86	1.03	1.63	0.89	0.98	1.59	0.68	1.06	2.81
28	0.91		1.12	1.10	1.00	1.43	0.94	0.94	2.09
29	0.90	0.71	1.56	1.02	0.99	1.40	0.73	0.99	2.03
30	0.86		1.17	1.14	1.00	1.13	0.93	1.04	2.11
31	1.01	0.87	1.33	0.98	0.99	1.29	0.86	0.85	1.94
32	0.95	0.91	1.43	1.00	0.98	0.99	0.80	0.95	2.23
Среднее	0.94	1.04	1.24	0.96	0.99	1.36	0.87	1.00	1.76
σ	0.14	0.30	0.23	0.17	0.01	0.33	0.10	0.22	0.61

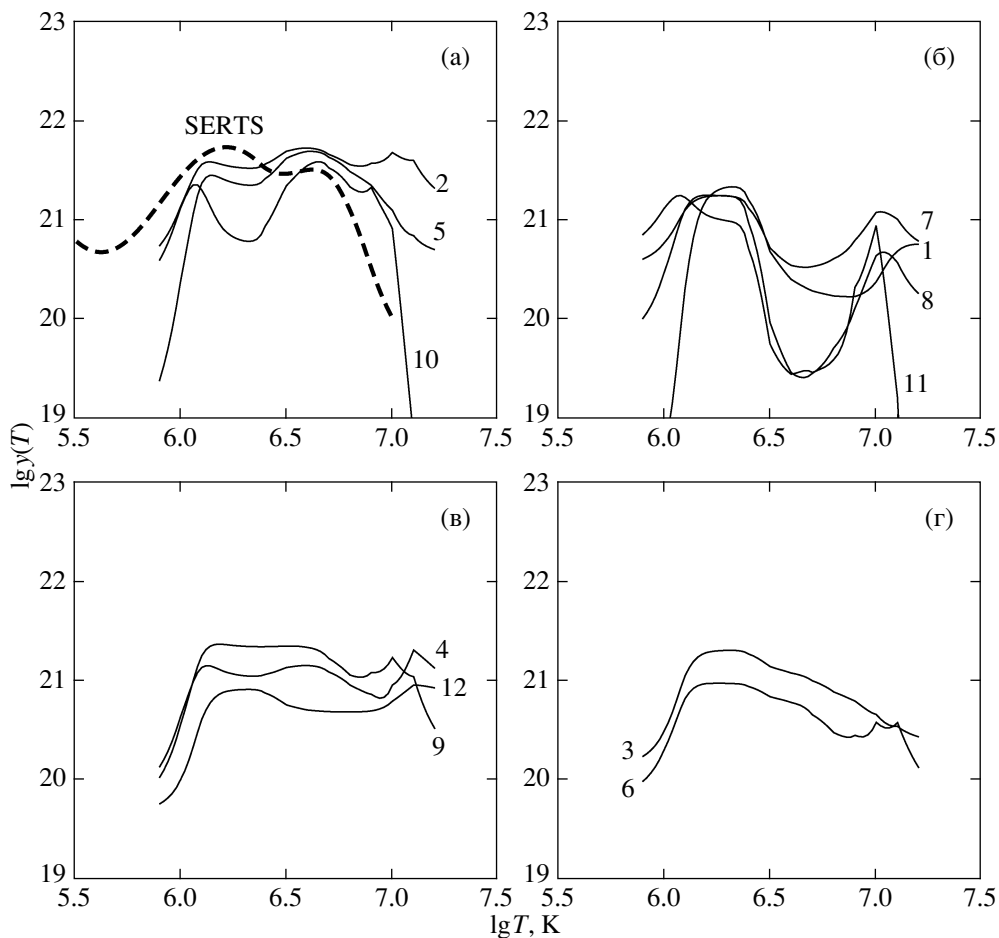


Рис. 5. ДМЭ активных областей по данным СПИРИТ. По оси x отложен логарифм температуры, по оси y — логарифм ДМЭ, выраженной в относительных единицах. Полученные ДМЭ разбиты на 4 группы в соответствии с их характерным видом. На рис. (а) для сравнения приведена ДМЭ для активной области, наблюдавшейся в ракетном эксперименте SERTS (штриховая кривая). Номер кривой соответствует номеру объекта в табл. 1.

Анализ исследованных активных областей показывает, что 10 из 12 содержат горячую плазму в температурном интервале $\lg T = 6.8-7.2$ с мерой эмиссии, близкой по величине к мере эмиссии “холодной” плазмы и две активных области — в значительно меньшем количестве.

Прямым подтверждением существования горячей плазмы является изображение Солнца, полученное в резонансной линии иона Mg XII $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ и приведенное на рис. 2б справа для АО NOAA 9742 (объект № 2). Это изображение получено спектрогелиографом Mg XII, который может регистрировать излучение только достаточно горячей плазмы с температурой выше 5 МК, при этом максимум светимости спектральной линии достигается при $T = 10 \text{ МК}$. Яркие источники в линии Mg XII соответствуют активным областям, которые также видны на изображении телескопа EIT и спектрогелиограмме диапазона 280–330 \AA .

Полученные результаты позволяют сделать вы-

вод о существовании активных областей с существенно различными температурными составами; на примере 12 активных областей показано существование горячей плазмы с $\lg T = 6.5-7.0$ в активных областях с относительно большой МЭ. ДМЭ, определенная для участка активной области в ракетном эксперименте SERTS (Бросиус и др., 1996) качественно соответствует ДМЭ ряда активных областей, наблюдавшихся СПИРИТ в области температур $T < 5 \text{ МК}$ (см. рис. 5а).

ДМЭ вспышек X-класса

ДМЭ, рассчитанная для вспышек X-класса, приведена на рис. 6. На рис. (а) приведены ДМЭ, рассчитанные для спектров, зарегистрированных не позднее, чем через 60 мин после максимума вспышки. Это объекты наблюдения с №№ 18, 19, 22, 25, 27, 29, 31 (см. табл. 1). На рис. (б) приведены ДМЭ, рассчитанные для спектров, зарегистрированных позже, чем через 60 мин после максимума вспышки. Это объекты наблюдения

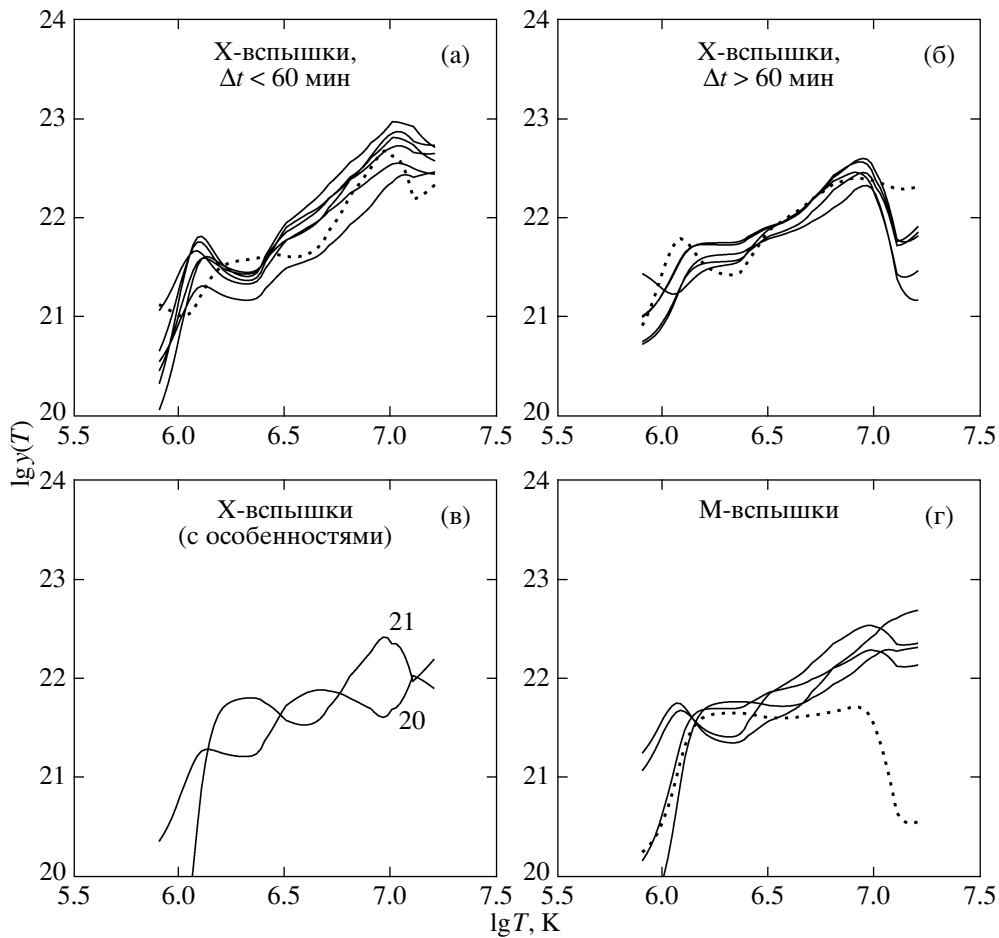


Рис. 6. ДМЭ вспышек классов X и M по данным СПИРИТ. По оси x отложен логарифм температуры, по оси y — логарифм ДМЭ, выраженной в относительных единицах. ДМЭ для вспышек X-класса разбиты на три группы в соответствии с временем наблюдения после максимума вспышки и характерным видом зависимости от температуры. См. также текст.

№№ 23, 24, 26, 28, 30, 32. Спектры №№ 20, 21 также зарегистрированы более, чем через 60 мин после максимума, однако соответствующие ДМЭ приведены на рис. (в), так как отличаются по своему виду от первых двух групп.

Все распределения ДМЭ, представленные на рис. (а), за исключением ДМЭ объекта № 25 (отмечен пунктиром), имеют явно выраженный максимум при $\lg T \approx 6.1$ и минимум при $\lg T = 6.2-6.4$. Затем следует резкий подъем ДМЭ с максимумом при температурах $\lg T = 7.0-7.1$.

Распределения ДМЭ, представленные на рис. (б), за исключением ДМЭ объекта № 32 (отмечен пунктиром), не имеют максимума при $\lg T = 6.1$, но имеют постоянное значение при температурах $\lg T = 6.1-6.5$. “Горячие” максимумы этих распределений наблюдаются при более низких температурах $\lg T = 6.9-7.0$ и кривые имеют более резкий спад при больших температурах, чем кривые, приведенные на рис. (а).

ДМЭ, показанные на рис. (в), качественно отличаются от ДМЭ, приведенных на рис. (а) и (б) и больше похожи на ДМЭ, соответствующие активным областям.

Отмеченные различия в характеристиках ДМЭ с учетом временного запаздывания относительно максимума вспышек можно интерпретировать как остывание более горячей вспышечной ($\lg T \sim 7.0$) и разогрев более холодной плазмы.

Важно отметить, что локальный максимум в распределениях ДМЭ при $\lg T \sim 6.1$, наблюдавшихся вблизи максимальной фазы вспышек, близок по величине к максимуму в распределениях ДМЭ, наблюдавшихся в экспериментах SERTS (Шмельц и др., 1999), CDS (Ланди, Ландини, 1998), SUMER (Ланди, Фельдман, 2008) и ряда активных областей, рассмотренных в настоящей работе. Это может свидетельствовать о наличии в активных областях устойчивых плазменных структур с “характерной” температурой $\lg T \sim 6.1$, ко-

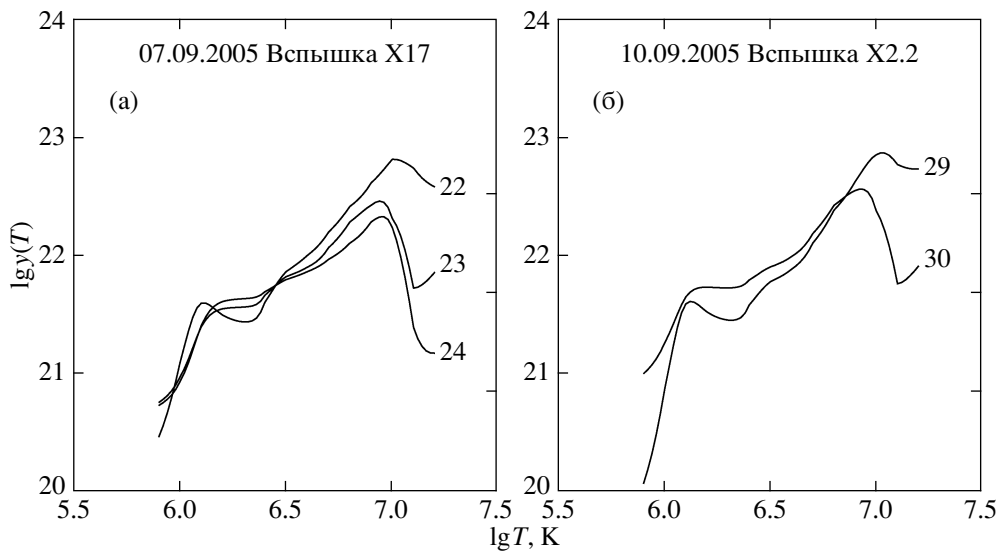


Рис. 7. Временная динамика ДМЭ для двух вспышек класса X по данным СПИРИТ. По оси x отложен логарифм температуры, по оси y — логарифм ДМЭ, выраженной в относительных единицах.

торые затем нагреваются более горячей плазмой, непосредственно разогретой во время вспышки.

Отметим также, что для всех рассмотренных спектров наблюдается существенное количество “промежуточной” плазмы с температурами $\lg T = 6.5–7.0$ и наличие “предельной” температуры $\lg T \approx 7.0$, что хорошо согласуется с данными, полученными для вспышки класса M2, зарегистрированной спектрогелиографом на станции Skylab (Дере, Кук, 1979) и вспышечных событий, наблюдавшихся в рентгеновской линии Mg XII 8.42 Å (Урнов и др., 2007).

ДМЭ вспышек M-класса

ДМЭ, рассчитанные для вспышек M-класса, приведены на рис. 6г. Основные особенности ДМЭ вспышек M-класса соответствуют вспышкам X класса: наличие у некоторых ДМЭ максимума при температуре $\lg T = 6.1$, последующего спада, сильное увеличение ДМЭ, начиная от температуры $\lg T = 6.5$ и наличие максимума при $\lg T \sim 7.0$.

Распределение ДМЭ для спектра № 15 (отмечен пунктиром), зарегистрированного более чем через 3 ч после максимума вспышки, имеет существенно меньшее значение при $\lg T \sim 6.5–7.0$.

Не обнаружено систематических различий (качественных или количественных) между ДМЭ для вспышек X- и M-классов, что может свидетельствовать об общих механизмах выделения и диссипации энергии во вспышках.

Динамика ДМЭ

На рис. 7 приведены ДМЭ, зарегистрированные на разных фазах затухания вспышек. На рис. (а) приведены ДМЭ для вспышки класса X17, наблюдавшейся 7 сентября 2005 г. Спектр № 22 получен через 1 ч после максимума вспышки, № 23 — еще через 1.5 ч, а № 24 — еще через 1.5 ч. На рис. (б) приведены ДМЭ для вспышки класса X2.2, наблюдавшейся 10 сентября 2005 г. Спектр № 29 получен через ~ 12 мин после максимума вспышки, № 30 — еще через 1.5 ч.

Полученные кривые соответствуют высказанному предположению о термализации вспышечной плазмы.

Моделирование спектров

На основе рассчитанных ДМЭ были рассчитаны спектры излучения корональной плазмы. Спектры получены при помощи ПО CHIANTI для спектрального диапазона 280–330 Å; использовались ионизационное равновесие mazzotta_et_al.ioneq, корональные обилия coronal_ext.abund, плотность $\lg n_e = 9.0$ или экспериментально измеренная. Кроме того, были приняты параметры BINSIZE = 0.04 Å и FWHM = 0.2 Å. Сравнение измеренного и расчетного спектров для вспышки класса X4.1, наблюдавшейся на Солнце 17.01.2005 г. (объект наблюдения № 21), приведено на рис. 8, 9.

Сравнительный анализ экспериментально полученных и расчетных спектров для разных объектов наблюдения привел к следующим результатам.

— Во всех рассмотренных спектрах экспериментально измеренная интенсивность линий Mg VIII

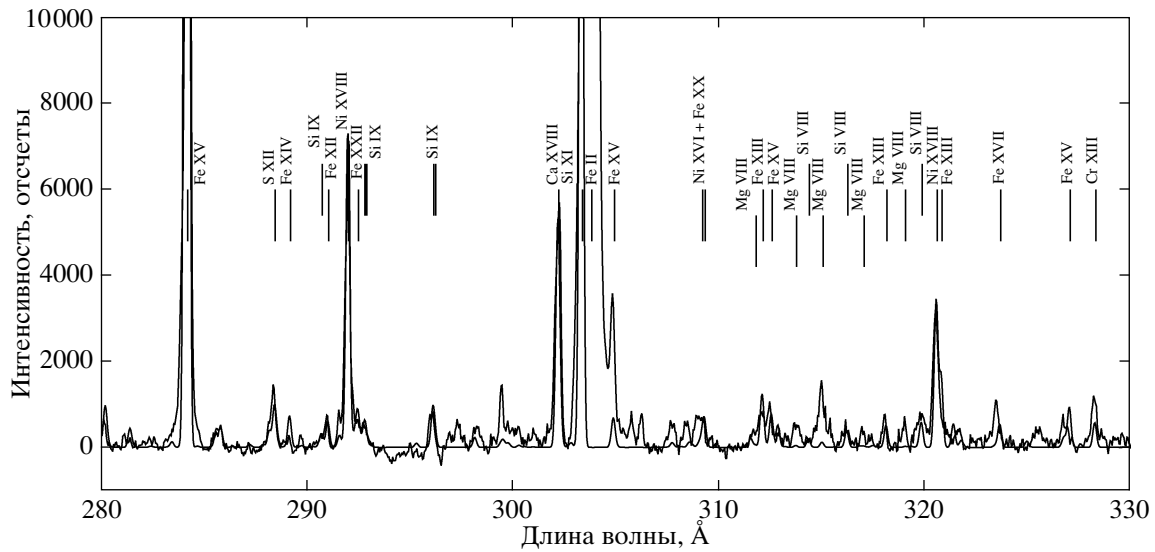


Рис. 8. Сравнение экспериментально измеренного и рассчитанного на основе ДМЭ спектра в диапазоне 280–330 Å (объект наблюдений № 21).

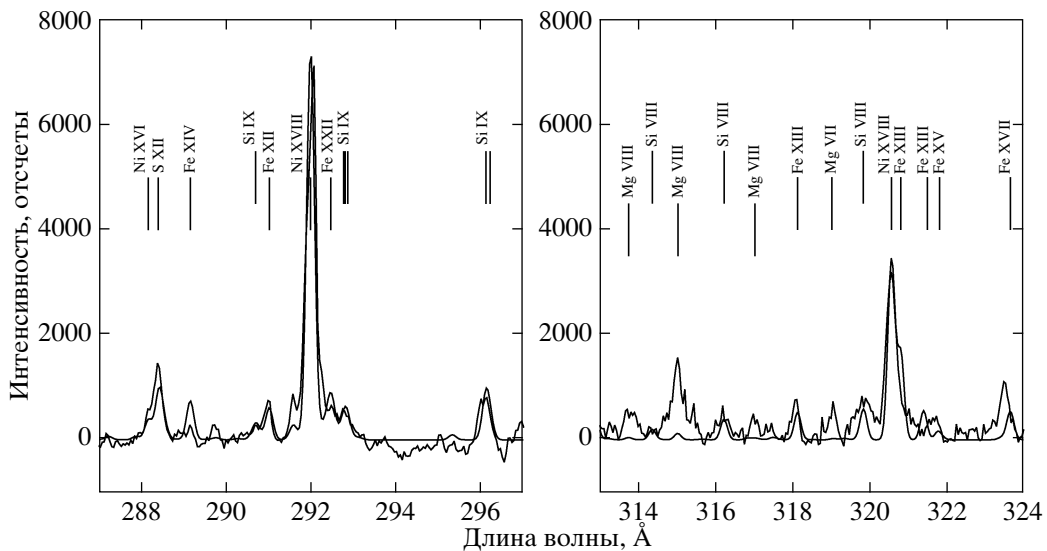


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но в увеличенном масштабе (объект наблюдений № 21).

(линии 311.77, 313.74, 315.02, 317.03 Å) существенно выше (до 10 раз) своих теоретических значений. Так как “низкотемпературная” часть измеренных ДМЭ зависит в основном от линий Si, и, кроме того, светимости линий Mg VIII и Si VIII имеют близкую зависимость от температуры, указанное различие можно объяснить использованием неадекватных обилий.

— Спектральные линии иона Fe XV 284.16, 304.89, 312.56, 321.77, 327.03 Å для всех исследуемых спектров показали следующие особенности: экспериментальная интенсивность линии 284.16 Å ниже расчетной, линии 304.89 Å — вы-

ше, 312.56 Å — эксперимент соответствует расчету, 321.77 Å — эксперимент выше расчетного значения, 327.03 Å — ниже расчетного значения. Указанные расхождения наблюдаются для многих спектров, использованных в настоящей работе и не могут быть объяснены ни вариацией обилий, ни статистической погрешностью.

— Экспериментальная интенсивность спектральной линии Cr XIII 328.27 Å выше рассчитанной для всех спектров, использовавшихся в настоящей работе.

ВЫВОДЫ

Выполненный в работе анализ температурных распределений ДМЭ для вспышек и активных областей позволяет сделать следующие выводы.

1. Наблюдались четыре типа активных областей с разным температурным составом, характеризующимся особенностями в распределениях ДМЭ.

2. Впервые установлено наличие в активных областях горячей плазмы с температурой $\lg T = 6.8-7.2$.

3. Впервые получены распределения ДМЭ для мощных солнечных вспышек с длительным затуханием и обнаружено подобие температурного состава для вспышек разных классов на стадиях затухания.

4. Установлены “проблемные линии” в спектральном диапазоне 280–330 Å.

5. Для более детальных выводов о характере температурных распределений в структурах солнечной короны необходимы дальнейшие исследования как уровня достоверности получаемых распределений ДМЭ, так и проведение более точного и полного отождествления спектров структур и увеличение объема экспериментальных данных.

Авторы благодарны Ф.Ф. Горяеву и С.Н. Опарину и сотруднику ЦКИ ПАН Сильвестеру Янушу за ценные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-02-01301-а и 08-02-13633-офи_ц), программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Программы № 16, Часть 3”, программ фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Плазменные процессы в солнечной системе” и “Прецизионная оптическая спектроскопия внутриатомных и внутримолекулярных переходов”, а также гранта № 218816 (проект SOTERIA, <http://soteria-space.eu>) седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP07/2007-2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейгман И.Л., Боженков С.А., Житник И.А. и др., Письма в Астрон. журн. **31**, 39 (2005).
2. Бросиус и др. (J.W. Brosius, J.M. Davila, R.J. Thomas, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **106**, 143 (1996).
3. Бросиус и др. (J.W. Brosius, R.J. Thomas, J.M. Davila, et al.), *Astrophys. J.* **543**, 1016 (2000).
4. Дере (K.P. Dere), *Astrophys. J.* **221**, 1062 (1978).
5. Дере, Кук (K.P. Dere and J.W. Cook), *Astrophys. J.* **229**, 772 (1979).
6. Житник и др. (I.A. Zhitnik, O.I. Bugaenko, J.-P. Delaboudiniere, et al.), *Solar variability: from core to outer frontiers* (Ed. A. Wilson, Prague: ESA SP-506, 2002), p. 915.
7. Житник И.А., Кузин С.В., Урнов А.М. и др., *Астрон. вестник* **40**, 1 (2006).
8. Крэйг, Браун (L.J.D. Craig and J.C. Brown), *Astron. Astrophys.* **49**, 239 (1976).
9. Ланди, Ландини (E. Landi and M. Landini), *Astron. Astrophys.* **340**, 265 (1998).
10. Ланди, Фельдман (E. Landi and U. Feldman), *Astrophys. J.* **672**, 674 (2008).
11. Ланди и др. (E. Landi, G. Del Zanna, P.R. Young, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **162**, 261 (2006).
12. Монсиньори-Фосси, Ландини (B.C. Monsignori-Fossi and M. Landini), *SERC Technical Report RAL-91-092* (1991).
13. Ораевский В.Н., Собельман И.И., Письма в Астрон. журн. **28**, 457 (2002).
14. Уоррен, Уоршелл (H.P. Warren and A.D. Warshall), *Astrophys. J.* **571**, 999 (2002).
15. Урнов А.М., Шестов С.В., Богачев С.А. и др., Письма в Астрон. журн. **33**, 446 (2007).
16. Харрисон, Томпсон (R.A. Harrison and A.M. Thompson), *SERC Technical Report RAL-91-092* (1991).
17. Шестов С.В., Боженков С.А., Житник И.А. и др., Письма в Астрон. журн. **34**, 38 (2008).
18. Шестов С.В., Урнов А.М., Кузин С.В. и др., Письма в Астрон. журн. **35**, 50 (2009).
19. Шмельц и др. (J.T. Schmelz, J. Scott, and L.A. Rightmire), *Astrophys. J.* **684**, L115 (2008).