

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ КОРОНЫ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА: СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

INTENSITY OF EMISSION LINES OF THE QUIESCENT SOLAR CORONA: COMPARISON BETWEEN CALCULATED AND OBSERVED VALUES

Б.Б. Криссинель

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, krissinel@iszf.irk.ru*

B.B. Krissinel

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, krissinel@iszf.irk.ru*

Аннотация. Приведены результаты расчета центр—лиimbus интенсивности оптически тонких линий УФ-диапазона волн многокомпонентной модели спокойной короны Солнца.

Модель представляет собой совокупность ранжированных по размерам петель, спикул и свободного (межпетельного) вещества. Теоретические значения интенсивности находятся по вероятностям встречи по линии зрения участков петель с учетом вероятности отсутствия при этом других компонент короны. В модели используются 12 петель размерами от 3200 км до 210 000 км, с различными величинами коэффициента заполнения и давления в основании и в вершине петли. Температура вершин петель — 1 400 000 К. При расчетах использована база данных CHIANTI. Сравнение теоретических и экспериментальных значений интенсивности корональных линий, а также линий переходной зоны, полученных на телескопах SUMER, CDS и EIS, показало достаточно удовлетворительное согласие их, особенно для данных центра диска Солнца. Для данных над лимбом повышенные значения расхождений в результате анализа объясняются погрешностями измерений спектрометра EIS.

Ключевые слова: Солнце—корона, УФ-излучение, атомные данные.

Abstract. The paper reports the results of calculations of the center-to-limb intensity of optically thin line emission in EUV and FUV wavelength ranges. The calculations employ a multicomponent model for the quiescent solar corona.

The model includes a collection of loops of various sizes, spicules, and free (inter-loop) matter. Theoretical intensity values are found from probabilities of encountering parts of loops in the line of sight with respect to the probability of absence of other coronal components. The model uses 12 loops with sizes from 3200 to 210000 km with different values of rarefaction index and pressure at the loop base and apex. The temperature at loop apices is 1 400 000 K. The calculations utilize the CHIANTI database. The comparison between theoretical and observed emission intensity values for coronal and transition region lines obtained by the SUMER, CDS, and EIS telescopes shows quite satisfactory agreement between them, particularly for the solar disk center. For the data acquired above the limb, the enhanced discrepancies after the analysis refer to errors in EIS measurements.

Keywords: Sun—corona, UV radiation, atomic data.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения характеристик корональной плазмы важны для понимания различных процессов, происходящих в солнечной атмосфере, таких как нагрев короны и выбросы корональной массы, а также структуры и физических характеристик активных областей, протуберанцев и корональных дыр. Исследования короны в УФ-диапазоне волн ведутся давно, и в настоящее время ряд превосходных спектрографов на борту спутников дает возможность детальной диагностики электронной плотности и температуры солнечной плазмы. Диагностика по наблюдаемым интенсивностям оптически тонких линий [Mason, Monsignori Fossi, 1994; Laming et al., 1997] использует расчеты излучения переходов возбужденных уровней ионов. Созданная в 1997 г. и непре-

рывно уточняемая база атомных данных CHIANTI [Dere et al., 1997; Landi et al., 2012] содержит среди прочего пакет программ для таких расчетов.

К настоящему времени опубликовано достаточно большое число работ по исследованию плазмы спокойных участков Солнца и активных областей. Анализ эмиссионных линий УФ дает представление о характеристиках плазмы, но в то же время позволяет выявлять проблемы, возникающие из-за неточности атомных данных и погрешностей при обработке спектрогелиограмм. Атомные данные в значительной мере являются расчетными, и проверка правильности расчетов может быть осуществлена по стабильному источнику излучения, каковым представляется излучение спокойных участков атмосферы Солнца. Исследованию спокойной короны над лим-

бом на расстояниях 1.03–1.3 солнечного радиуса посвящены работы [Feldman et al., 1998, 1999; Warren, 1999; Allen et al., 2000; Landi et al., 2002a, 2002b; Warren, Warshall, 2002; Feldman, 2009; Mohan et al., 2003; Parenti et al., 2003; Warren, Brooks, 2009], в которых принималось, что плазма на таких высотах изотермальная.

В работах [Warren, 2005; Brooks, Warren, 2006; Brooks et al., 2009] исследовалась плазма при наблюдениях в центре диска Солнца. В этом случае температура излучающего слоя принималась равной температуре максимума ионизации данного иона. Оценить правомерность таких приближений можно путем расчета интенсивности эмиссионных линий по модели спокойных участков Солнца.

В настоящей работе использована многокомпонентная модель короны спокойного Солнца [Krissinel, 2015], позволившая получить экваториальные распределения центр—лиimbus в диапазоне волн от 1 до 100 см, хорошо совпадающие с экспериментальными данными. В этой модели распределение компонент по диску Солнца представляет собой случайный процесс, дисперсия и среднее значения которого неизменны. В таком случае излучение Солнца может быть представлено излучением дискретного набора компонент короны.

Целью данной работы является сравнение расчетов интенсивности излучения по модели солнечной короны, созданной по радионаблюдениям, с результатами наблюдений эмиссионных EUV- и FUV-линий на спектрографах SOHO/CDS, SOHO/SUMER и HINODE/EIS, опубликованными в литературе. При адаптации модели к расчетам экваториального распределения интенсивности корональных линий особое внимание было обращено на выбор типа фракционной ионизации, а также на высотные профили плотности и температуры в переходной области петель.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для расчета интенсивности эмиссионных линий спокойных участков короны используем методику, предложенную в работе [Krissinel, 2015] для излучения на волнах сантиметрового и дециметрового диапазонов.

По этой методике вся совокупность петель короны представляется в виде набора ранжированных по размерам петель, параметры плазмы которых являются средними для петель данной области размеров. Аналогичным образом учитывается присутствие спикул — быстро изменяющихся структур в солнечной хромосфере. Если известны высотные профили температуры и плотности электронов петель и спикул, а также параметры свободного (межпетельного) вещества, то можно найти общую интенсивность излучения короны, интегрируя излучение участков петель и спикул, а также свободного вещества по линии зрения. Вклад излучения каждого участка петли, спикулы или свободного вещества определяется параметрами плазмы этого участка, а также вероятностью появления этих участков по линии зрения.

Определение высотных профилей температуры и плотности петель и свободного вещества тесно свя-

зано с моделью спокойной атмосферы для центра диска, называемой далее «исходной» и полученной путем соединения корональной части (начиная с высоты $h_0=2275$ км) модели, описанной в работе [Гетман, Лившиц, 1996], и комбинации моделей FALA и FALF хромосферы и переходной области [Fontenla et al., 1993] в соотношении $FALA \cdot 0.965 + FALF \cdot 0.035$.

Петельная структура представлена набором из 10 петель с размерами, пропорциональными среднему размеру хромосферной сетки, т. е. с радиусами R_{loop} от 15 000 до 210 000 км, а также с существенно меньшими размерами: $R_{loop}=7\ 200, 3\ 100$ км. Принято также, что толщина петель неизменна по всей длине и равна $R_{loop}/15$. Путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных в работе [Krissinel, 2015] найдены основные параметры петельной структуры: $T_{maxloop}$ — температура вершин петель, p_0 — давление на высоте h_0 , p_1 — давление в вершине петли, коэффициенты заполнения a_r (число петель данного размера, находящихся на площадке $2R_{loop} \times 2R_{loop}$).

Зависимость температуры участка корональной части петли от высоты h определяется выражением

$$T_{lp}(h) = T_{min} + (T_{maxloop} - T_{min}) \times (\sin(\pi/2 \cdot (h-h_0)/(R_{loop}-h_0)))^{a_{lp}}, \quad (1)$$

где a_{lp} — параметр, определяющий степень «прямоугольности» профиля, T_{min} — температура в исходной модели на высоте h_0 . Ниже высоты h_0 профили температуры петель соответствуют исходной модели.

Плотность электронов корональной части петли находится по выражению

$$n_{elp}(h) = p_0 \exp(-(h-h_0)/\lambda_{p0}) / (2k_{Bolz} T_{lp}(h)), \quad (2)$$

где k_{Bolz} — постоянная Больцмана, $\lambda_{p0} = (R_{loop}/\ln(p_0/p_1))$. В области ножек петель плотность определяется по исходному модельному профилю $n_e(h)$:

$$n_{elp}(h) = n_e(h) p_0 / p_{sh}, \quad (3)$$

где p_{sh} — давление в исходной модели на высоте h_0 .

Для спикул за основу взята стратификация их (относительная площадь диска, покрытая спикулами, достигающими определенной высоты), предложенная в работе [Lantos, Kundu, 1972], дополненная более подробным ранжированием спикул по размерам и вероятностям нахождения на определенных высотах.

Для вычисления вероятностных характеристик участков петель по лучу зрения все петли разбиваются по высоте на отдельные сегменты, верхний из которых представляет собой вершину петли. Далее производится расчет вероятности попадания луча в эти сегменты P_{vk} по их проекциям на горизонтальную плоскость. Это позволяет определить интервалы высот Δh_{gr} , соответствующие высотным проекциям среднего пути луча в этих сегментах, и вероятности P_{vi} попадания луча в такой слой петли. Аналогичным образом находят вероятности P_{vsp} для спикул.

Из полученных последовательностей интервалов Δh_{gr} для петель и спикул формируется сетка высот h_{usd} , по которой далее производятся расчеты интенсивности. При расчете результирующей интенсив-

ности по линии зрения надо учитывать вероятность отсутствия других деталей атмосферы B_{ls} на рассматриваемом участке петли. Эти величины определяются для каждого интервала Δh_{gr} и представляют собой произведение вероятностей отсутствия других петель и спикул на этом интервале. Для свободного вещества вероятность отсутствия петель и спикул N_{bls} находится на каждой высоте h_{usd} как произведение вероятностей отсутствия участков петель и спикул в окрестности этой высоты, равных ближайшему интервалу Δh_{gr} этих элементов.

В результате интенсивность эмиссионной линии $I(i)$ спокойных участков Солнца может быть найдена по формуле

$$I(i) = I(i-1) + \eta(i-1) \times \left(\sum_{j=0}^n I_{lp}(i, j) P_{vl}(l, j) B_{ls}(l, j) \right) + I_{sv}(i) N_{bls}(i), \quad (4)$$

$$\text{где } \eta(i) = \eta(i-1) \left(\sum_{j=1}^{n_l} P_{vl}(l, j_1) B_{ls}(l, j_1) + N_{bls}(i) \right), \quad (5)$$

Здесь $I_{lp}(i, j)$ — интенсивность излучения j -й петли между высотами $h_{usd}(i-1)$ и $h_{usd}(i)$, $I_{sv}(i)$ — интенсивность излучения свободного вещества в таком же интервале высот. Расчет интенсивности излучения каждой j -й петли ведется по своей сетке интервалов высот $\Delta h_{gr}(l, j)$, поэтому при расчете по (4) на каждой высоте $h_{usd}(i)$ учитывается излучение той петли j_1 , у которой нижняя граница Δh_{gr} совпадает с высотой $h_{usd}(i)$.

Как известно [Mason, Monsignori Fossi, 1994; Dere et al., 1997], излучательность (мощность на единицу объема, эрг $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$) для оптически тонкой спектральной линии на волне $\lambda_{i,j}$ равна

$$\varepsilon_{ij} = N_j(X^{+m}) A_{ji} \frac{h_p c}{\lambda_{ij}}, \quad (6)$$

а интенсивность

$$I(\lambda_{ij}) = \frac{h_p v_{ij}}{4\pi} \int N_j A_{ji} dh \left[\text{эрг } \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1} \right], \quad (7)$$

где h_p — постоянная Планка, $v_{ij} = \frac{c}{\lambda_{ij}}$ — частота, i, j —

нижний и верхний уровни, A_{ji} — вероятность спонтанного перехода, N_j — плотность верхнего уровня j эмитирующего иона и h — линия через эмитирующую плазму. Населенность уровня j может быть выражена как

$$N_j(X^{+m}) = \frac{N_j(X^{+m}) N(X^{+m}) N(X) N(H)}{N(X^{+m}) N(X) N(H) N_e} N_e, \quad (8)$$

где $\frac{N(X^{+m})}{N(X)}$ — отношение плотности ионов X^{+m} к

общей плотности элемента X ; $Ab(X) = N(X)/N(H)$ — избыточность элемента относительно водорода; $N(H)/N_e$ — плотность водорода относительно плотности свободных электронов (≈ 0.83).

При диагностике плотности плазмы используют функцию вклада

$$C(T, \lambda_{ij}, N_e) = \frac{h_p v_{ij} A_{ji} N_j(X^{+m}) N(X^{+m})}{4\pi N_e N(X^{+m}) N(X)} \left[\text{эрг } \text{см}^3\text{с}^{-1} \right], \quad (9)$$

связанную с интенсивностью выражением

$$I(\lambda_{ij}) = \int Ab(X) C(T, \lambda_{ij}, N_e) N_e N_H dh. \quad (10)$$

Населенность уровня j может быть вычислена путем решения уравнений статистического равновесия, включающих все важные механизмы столкновительного и радиационного возбуждения и девозбуждения:

$$N_j \left(N_e \sum_i C_{ji}^e + N_p \sum_i C_{ji}^p + \sum_{i>j} R_{ji} + \sum_{i<j} A_{ji} \right) = \sum_i N_i \left(N_e C_{ij}^e + N_p C_{ij}^p \right) + \sum_{i>j} N_i A_{ij} + \sum_{i<j} N_i R_{ij}, \quad (11)$$

где C_{ji}^e и C_{ji}^p — коэффициенты скорости возбуждения столкновениями электрона и протона ($\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$), R_{ji} — коэффициенты скорости стимулированного поглощения (с^{-1}).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

2.1. Интенсивность эмиссионных линий короны

Проверка модели спокойной короны в виде, предложенном в работе [Krissinel, 2015], показала, что в УФ-диапазоне нужна ее небольшая доработка. Это было обусловлено в первую очередь необходимостью согласования расчетных и экспериментальных параметров эмиссионных линий, излучающих в разных диапазонах температур.

Распределение температуры по длине петли в формуле (1) определяется величиной a_{lp} . При небольших величинах a_{lp} преобладающая часть длины петель имеет температуру, близкую к температуре вершин. В этом случае повышается расчетная интенсивность эмиссионных линий высокотемпературных ионов и, наоборот, снижается интенсивность линий переходной зоны. В результате исследования было принято компромиссное решение: коэффициент a_{lp} считался равным 0.31 в верхней части петли и 0.6 на высотах, где температура ниже максимальной на 50 %.

Второе уточнение вызвано необходимостью снижения изрезанности профиля интенсивности над лимбом. В связи с этим число петель было увеличено до 12. После корректировки базовые давления петель p_0 (на высоте h_0) монотонно возрастают с уменьшением размера петли от $2.1 \cdot 10^{-8}$ до $3.2 \cdot 10^{-8}$ дин см^{-2} , а давления при вершинах — от 0.67 до 0.89 относительно величин p_0 . При этом плотности электронов при вершинах петель возрастают с уменьшением R_{100p} от $3.6 \cdot 10^8$ до $8.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Корректировка параметров практически не изменила результаты расчета яркости модели спокойного

Солнца. На рис. 1, где приведены расчетные и экспериментальные яркости в центре диска Солнца в диапазоне длин волн от 1 до 31.6 см, мы видим хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных.

Расчеты интенсивности эмиссионных линий выполнялись с использованием базы данных CHIANTI, при этом населенности уровней находились путем решения системы уравнений по выражению (11). Как показали расчеты, наилучшее согласие с данными наблюдений достигается при использовании фракционной ионизации по работе [Byans et al., 2009].

Особое внимание было уделено выбору величины избыточности Ab . В результате исследования принято, что величины корональной избыточности следует применять по работе [Feldman et al., 1992] для всех элементов, кроме Si и Fe. Для этих элементов избыточность по сравнению со значениями по работе [Feldman et al., 1992] снижена на 70 %, что соответствует данным работ [Fludra, Schmelz, 1999; Schmelz et al., 2012].

Экспериментальные данные об интенсивности УФ-излучения плазмы над спокойными участками Солнца, полученные в разные годы и на разных инструментах, имеют значительный, до трех раз, разброс по величине, что обусловлено погрешностями калибровки инструментов и различием методик обработки сигналов. В связи с этим в настоящей работе сравнение проведено с данными, полученными на спектрометрах SUMER, EIS и CDS [Warren, 2005; Brooks, Warren, 2006; Brooks et al., 2009; Warren, Brooks, 2009] с использованием одной и той же методики выделения спектральной линии.

В табл. 1 приведены расчетные (по (4)) I_{th} и наблюдаемые I_{obs} значения интенсивности 162 эмиссионных линий в центре диска и за лимбом (на

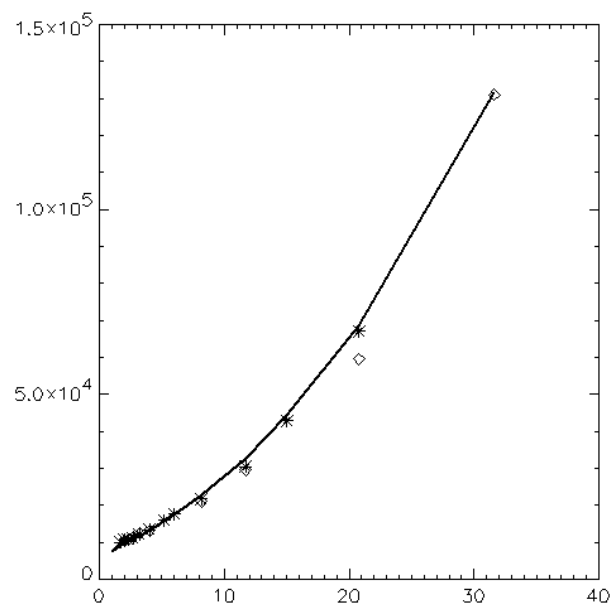


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные значения яркости в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн. По оси абсцисс — длина волны (см), по оси ординат — яркостная температура (К). Наблюдаемые значения по работе [Zirin et al., 1991] отмечены знаком «звездочка», а по работе [Borovik et al., 1992] — знаком «ромбик»

расстоянии 1.07 оптического радиуса спокойного Солнца). Для анализа выбраны эмиссионные линии с температурой формирования выше $\log(T)=4.9$, соответствующие излучению короны и верхней части переходной зоны. В 10-й и 11-й колонках даны отношения расчетных и наблюдаемых величин (при наличии измерений на нескольких телескопах берется среднее значение).

Точность измерений интенсивности определяется точностью калибровки спектрографа и погрешностью при выделении линии, которая зависит от ряда обстоятельств. Так, в работе [Brooks, Warren, 2006] отмечалось, что у некоторых линий разброс значений интенсивности при использовании двух независимых методов обработки значительно превышал обычные 20 %. Точность калибровки инструментов составляет также примерно 20 %, поэтому общая погрешность измерений интенсивности не может быть лучше 30 %. В крайне правой колонке табл. 1 отмечены линии, для которых идентифицированы примеси и в силу этого понижается точность определения интенсивности.

Рассмотрим вначале расчетные величины и наблюдаемые значения для центра диска. Данные наблюдений есть для 136 линий. На рис. 2, а приведена гистограмма отношений расчетных и экспериментальных значений. Из общего числа линий здесь были исключены линии, для которых расчетный уровень ниже наблюдаемого более чем в два раза и идентифицирована примесь (Mg VII 365.1 Å, Mg VIII 335.23 Å и Fe XI 349.04 Å), а также линии O V 758.67, 759.44, 760.23, 760.44, 762.00 Å, низкий расчетный уровень которых в работе [Doschek et al., 1999] объяснялся неточностью атомных данных. Основная часть расхождений группируется в области значений 0.5–1.5, что свидетельствует о хорошем согласии результатов.

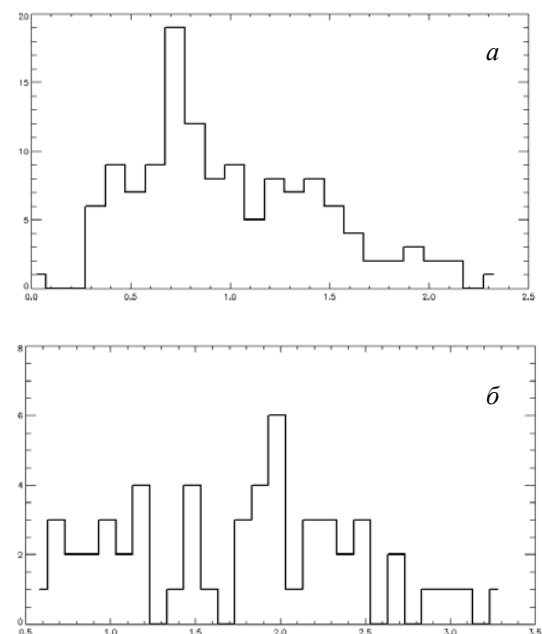


Рис. 2. Гистограммы отношений расчетных и экспериментальных значений интенсивности эмиссионных линий для центра диска Солнца (а) и над лимбом (б)

Таблица 1

Расчетные I_{th} и наблюдаемые I_{obs} значения интенсивности эмиссионных линий

$\lambda, \text{\AA}$	I_{th}		I_{obs}					I_{th}/I_{obs}		Com.
	k_R		k_R					k_R		
	0.0	1.07	0.0				1.07	0.0	1.07	
			Br06	Br09	W05	W05	W09			
			CDS	EIS	CDS	SUM	EIS			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ion Si VII										
275.3	17.84	8.960		10.52				11.54	1.69	0.77
275.6	3.17	1.59						1.81		0.88
278.4	5.69	2.86						2.95		0.97
Ion Si VIII										
314.3	17.51	39.85	22.39		27.32			0.71		
316.2	34.88	79.32	41.81		45.92			0.79		
319.8	52.07	118.2	49.92		69.20			0.87		
944.4	3.107	6.13			2.43			1.28		
Ion Si IX										
258.0	2.94	9.23					5.08		1.82	
341.9	11.69	40.01	16.11		20.3			0.64		
345.1	24.37	81.94	45.7		48.1			0.51		
349.8	30.39	100.2	38.2		43.3			0.74		bl(6)
676.5	0.385	1.25			0.71			0.54		
694.6	0.946	3.07			1.74			0.54		
Ion Si X										
253.7	10.33	38.1					12.84		2.97	
258.3	52.43	193.3		31.84			71.3	1.65	2.71	
261.0	22.60	84.12		16.61			43.34	1.36	1.94	
271.9	19.15	71.25		15.57			37.62	1.23	1.89	
277.2	15.72	58.50		10.06			28.83	1.56	2.03	
347.4	40.17	149.8	46.84		44.68			0.88		
356.0	25.31	92.69	27.85		24.33			0.97		bl(6)
Ion Si XI										
303.3	90.92	344.4	112.1		124.6			0.76		
580.9	2.622	9.938	4.03		4.09			0.64		bl(4)
Ion Si XII										
502.6	4.516	17.08	4.73		4.98			0.93		
Ion Mg VII										
365.1	5.12	0.43	6.13		9.95			0.64		
367.6	19.41	1.50	14.53		20.96			1.09		
Ion Mg VIII										
313.7	24.52	28.12	23.81		30.10			0.91		
315.0	68.48	77.26	59.15		71.83			1.04		
317.0	17.31	19.85	15.61		20.54			0.98		
335.2	11.82	13.49	24.75					0.48		
338.9	15.77	17.99	10.44		14.91			1.24		
Ion Mg IX										
368.0	277.1	769.5	220.7		279.4			1.11		
706.0	11.54	30.68			7.26			1.59		
749.5	1.97	5.47			1.15			1.71		
Ion Mg X										
609.7	137.9	485.9	93.87		101.2	78.47		1.51		
624.9	68.40	240.9	34.08		36.91	30.47		2.02		
Ion Al IX										
680.2.	0.02	0.061				0.85		0.02		
Ion Al XI										
550.0	6.84	25.89			2.88			2.37		
Ion Ca X										
557.7	16.49	41.03	7.16		9.08			2.03		
574.0	8.14	20.22	6.18		6.57			1.28		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ion O III										
525.7	17.07		17.56		17.75			0.97		
599.5	38.57		35.47		35.71			1.08		
702.3	9.086					9.26		0.98		
702.9	11.13					27.32		0.41		
703.8	34.16					43.46		0.78		
832.9	14.24					17.72		0.80		
833.7	34.35					51.02		0.67		
835.0	10.71					11.69		0.92		
835.2	63.97					78.59		0.81		
Ion O IV										
553.3	31.37		21.43		22.40			1.57		
554.0	60.93		37.32		40.12			1.48		
554.5	156.7		103.2		111.7			1.46		
555.2	31.54		22.54		24.50			1.34		
608.9	29.5		16.28		17.73			1.73		
779.8	1.758					2.54		0.69		
787.7	89.12					58.46		1.52		
790.2	163.7					108.2		1.51		
1399.7	5.106					6.05		0.84		
1401.1	27.8					36.14		0.77		
Ion O V										
629.7	647.2		308.1		338.4	415.7		1.82		
758.6	0.84					6.07		0.14		
759.4	0.644					4.73		0.14		
760.2	0.481					4.16		0.11		
760.4	2.498					18.77		0.13		
761.12	0.743					0.71		1.05		
762.0	0.795					6.25		0.13		
774.51	2.52					1.66		1.52		
1218.3	52.58					89.66		0.59		
Ion O VI										
183.93	2.356	2.647					2.81		0.94	
184.11	4.736	5.321					4.82		1.10	
1031.9	186.2	68.09				353.9		0.53		
1037.6	92.79	33.93				192.0		0.48		
Ion S IV										
744.90	1.185					1.48		0.80		
748.39	2.144					2.89		0.74		
750.22	5.571					6.89		0.81		
753.76	1.193					1.49		0.80		
1072.9	4.529					9.66		0.47		
1073.5	0.452					0.57		0.79		
Ion S V										
696.62	1.288					0.88		1.46		
786.46	32.72					32.06		1.02		
Ion S VI										
706.4	0.196					0.46		0.43		
712.6	0.348					0.90		0.39		
933.3	6.926					19.11		0.36		
944.5	3.465					9.43		0.37		
Ion S X										
264.2	13.17	49.02		14.26			34.77	0.92	1.41	
Ion Ne IV										
357.8	2.388		5.49					0.43		
541.1	2.84		2.43		2.39			1.14		
542.0	5.681		4.72		4.64			1.21		
543.8	8.498		7.35		8.34			1.08		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ion Ne V										
358.4	4.521		4.35					1.04		
569.8	6.803		5.27		5.40			1.27		
572.3	12.29		8.21		8.81			1.44		
Ion Ne VI										
558.6	11.47		8.44		9.59			1.27		
562.7	20.49				15.60			1.31		
1005.	1.169					0.85		1.37		
Ion Ne VII										
559.9	0.798				0.99			0.81		
561.3	0.591					0.85		0.69		
561.7	2.937					3.07		0.96		
564.5	0.959					2.2		0.44		
895.1	4.058					4.51		0.90		
Ion Ne VIII										
770.4	53.49	75.93				73.11		0.73		
780.3	26.79	37.88				36.78		0.73		
Ion N IV										
765.1	88.35					80.7		1.09		
Ion N V										
1238.	27.07					81.53		0.33		
1242.	13.53					38.51		0.35		
Ion Ar VIII										
713.8	1.304	1.294				1.26		1.03		
Ion Na IX										
681.7	5.86	14.47				3.2		1.83		
Ion Fe VIII										
185.2	34.30	16.13		19.73			18.54	1.74	0.87	
186.5	21.53	10.35		14.77			14.6	1.46	0.71	
194.6	9.946	4.14					5.38		0.77	
Ion Fe IX										
171.0	570.2	1141.					921.2		1.24	
188.4	27.49	57.68		14.13			31.28	1.94	1.84	
189.9	16.50	33.97		8.24			15.36	2.00	2.21	
197.8	18.91	42.94		8.78			21.02	2.15	2.04	
Ion Fe X										
174.5	411.2	1348.					572.5		2.35	bl(6)
177.2	226.8	743.4		109.7			308.2	2.06	2.41	
184.5	88.28	287.3		57.21			142.1	1.54	2.02	
190.0	24.82	80.78		20.34			52.74	1.22	1.52	
193.7	5.46	17.72		4.72				1.16		
195.1	3.09	9.94		4.35				0.71		
207.4	7.51	24.19					24.09		1.00	
257.2	36.6	122.9		47.66			122.6	0.77	1.00	bl(6)
345.7	20.00	63.87		28.65			24.37	0.75		
365.5	8.36	26.69		12.3			17.59	0.56		
Ion Fe XI										
180.4	315.7	1164.		190.5			432.2	1.66	2.69	
182.1	48.41	176.5		21.95			58.50	2.20	3.02	
188.16	152.4	561.4		93.95			224.9	1.62	2.49	
188.21	89.96	331.6		64.03			153.1	1.40	2.17	
192.8	31.01	114.2					57.73		1.98	bl(7)
257.5	10.94	30.61					24.29		1.63	
257.7	6.38	23.12					11.72		1.97	
341.1	9.83	35.94	11.96		11.62			0.84		
349.0	2.55	9.14			9.51			0.27		bl(3)
352.6	37.81	138.5	30.16		30.51			1.25		
369.1	11.39	41.76	8.55		7.97			1.38		

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ion Fe XII										
186.8	23.83	89.01					35.17		2.53	bl(1)
192.3	51.69	195.7		36.96			79.48	1.4	2.46	bl(1)
193.5	108.5	410.8		79.57			177.5	1.36	2.31	
195.1	160.4	607.2		135.3			274.6	1.18	2.21	bl(1)
196.6	7.57	28.26					11.0		2.57	bl(7)
203.7	8.07	30.31					20.32		1.49	
256.4	6.03	22.78		13.62			39.09	0.44	0.58	
346.8	9.16	34.65	10.0		10.27			0.90		
352.1	17.71	67.01	21.0		19.52			0.87		
364.4	29.66	112.2	31.42		34.06			0.90		bl(1)
1242.	2.19	8.24				4.14		0.53		
Ion Fe XIII										
196.5	1.51	5.64					2.71		2.08	
197.4	2.94	11.17					7.10		1.57	
200.0	5.76	21.57					9.43		2.29	
201.1	14.28	54.22					45.14		1.20	bl(1)
202.0	46.27	177.3		82.05			157.6	0.56	1.12	
203.7	7.99	29.94					25.0		1.2	bl(6)
204.9	4.39	16.68					8.19		2.04	
246.2	8.32	31.54					9.36		3.37	
251.9	15.96	60.52					19.33		3.13	
320.8	4.03	15.12	8.65					0.47		
348.1	8.67	33.17	10.43		10.24			0.84		
Ion Fe XIV										
211.3	15.95	60.37					39.47		1.53	
264.7	6.69	25.25		9.43			20.72	0.71	1.22	
270.5	4.13	15.61					6.96		2.24	
274.2	9.035	34.20		11.26			18.31	0.80	1.87	
334.1	6.45	24.41	8.52		8.87			0.74		
Ion Fe XV										
284.1	11.46	43.23		13.16			21.20	0.87	2.04	

Примечание: единицы интенсивности — эрг см⁻² ср⁻¹.

Обозначения: k_R — расстояние от центра диска Солнца в долях солнечного радиуса; Br06 — работа [Brooks, Warren, 2006]; Br09 — работа [Brooks et al., 2009]; W05 — работа [Warren, 2005]; CDS — Coronal Diagnostic Spectrometer, SOHO; EIT — Extreme ultraviolet Imaging Telescope, SOHO; SUM — SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation, SOHO); EIS — EUV Imaging Spectrometer, Hinode; bl(1) — примесь согласно [Binello et al., 2001], bl(2) — примесь согласно [Brown et al., 2008], bl(3) — примесь согласно [Landi et al., 2002a; b], bl(4) — примесь согласно [Brooks, Warren, 2006], bl(5) — примесь согласно [Warren, 2005], bl(6) — примесь согласно [Young et al., 1998], bl(7) — примесь согласно [Young et al., 2007].

2.2. Экваториальное распределение интенсивности излучения

Исследование распределений центр—либ в диапазоне УФ до сих пор проводилось в основном в рамках изучения эффекта уширения эмиссионных линий вблизи лимба и над лимбом [Kjeldseth Moe, Nicolas, 1977; Mariska et al., 1978, 1979; Hassler et al., 1990; Erdely et al., 1998; Peter, 1999; Wilhelm et al., 1998; Lee et al., 2000]. В этих работах, как правило, не ставилась задача определения параметров распределения по спокойным участкам Солнца — величины пика над лимбом, его положения и ширины, крутизны спада интенсивности над лимбом. Параметры (угловое и временное разрешение, длительность экспозиции, точность наведения) в этих наблюдениях не соответствовали такой задаче.

В табл. 2 для ряда линий переходной области приведены расчетные отношения максимума интен-

Таблица 2

Параметры распределения интенсивности линий переходной области вблизи лимба

Ион	Длина волны, Å	T_{max} , К	Расчет			Wilhelm-1998	
			χ	X	R_{01}	χ	X
C III	977.02	79432.8	26.33	+2.37	+4.57	3.25	+1.8
C IV	1548.19	100000.	22.23	+2.37	+4.77	10.5:12.8	+2.8
O IV	787.71	158489.	10.21	+2.37	+4.57	3.7:3.99	+2.5
S V	786.47	158489.	9.42	+2.37	+4.57	3.38	+2.5
S VI	944.52	199526.	6.28	+2.37	+24.17	10.2	+2.6
O V	629.73	251189.	6.28	+2.17	+5.17	4.59:4.95	+2.5
Ne VIII	770.41	630958.	5.09	+2.5	+300		

Обозначения: T_{max} — температура максимума ионизации иона элемента; χ — отношение интенсивности пика на лимбе к интенсивности в центре диска; X — положение пика относительно оптического лимба (угл. сек.); R_{01} — расстояние от оптического лимба, при котором интенсивность становится меньше 0.01 интенсивности излучения над центром диска (угл. сек.); Wilhelm-1998 — данные измерений параметров центр/либ по работе [Wilhelm et al., 1998].

сивности на лимбе к интенсивности в центре диска χ , положения максимума интенсивности относительно оптического лимба X (угл. сек.) и расстояния R_{01} (угл. сек.), при котором интенсивность становится меньше 0.01 (расчет для линий C III и C IV выполнен без учета затухания). Здесь также даны для справки некоторые численные величины из работы [Wilhelm et al., 1998].

Экваториальное распределение эмиссионных линий рассчитывалось с шагом 0.25" в области лимба, а затем сглаживалось на интервале 2", чтобы приблизиться к техническим ограничениям реальных наблюдений. Из табл. 2 следует, что χ возрастает по мере приближения излучающей области к хромосфере. Это не просматривается в данных работы [Wilhelm et al., 1998], что говорит о технических трудностях измерения параметров лимба у линий переходной области, где ширина пика интенсивности составляет несколько угловых секунд.

По мере возрастания температуры максимума ионизации уярчение на лимбе расширяется и замедляется спад интенсивности над лимбом. На рис. 3, а это демонстрируется на экваториальных распределениях излучения линий ионов Fe. Заметим, что, чем ниже температура ионизации эмиссионной линии, тем выше пик на лимбе и скорость возрастания интенсивности перед лимбом. Это объясняется тем, что с понижением температуры формирования линии снижается высота излучающей области и увеличивается размер этой области по линии зрения на лимбе по сравнению с размером в центре диска.

Скорость спада интенсивности у линий одного и того же иона зависит от степени чувствительности к плотности: с увеличением чувствительности повышается вклад в общее излучение средних и нижних частей петель и петель малого размера, более плотных по сравнению с большими петлями. Поэтому с удалением от лимба, когда эти излучающие детали оказываются вне линии зрения, общая интенсивность снижается более существенно. На рис. 3, б показаны графики нормированных по интенсивности в центре диска зависимостей интенсивностей ряда линий Fe XIII от расстояния над лимбом. Как мы видим, различие в скорости снижения интенсивности может быть значительным.

3. ДИСКУССИЯ

Для оценки теоретических данных по интенсивности эмиссионных линий в настоящей работе привлечены данные наблюдений на спектрографах CDS, SUMER, EIS, выполненных разными группами исследователей. При этом по техническим причинам наблюдений одной и той же эмиссионной линии разными инструментами было немного. Как видно из данных табл. 1, результаты наблюдений излучения центра диска на CDS, полученные в работах [Warren, 2005; Brooks, Warren, 2006], в основном совпадают с точностью около 10 %, но при этом есть различия до 60 %. Наблюдения на SUMER производятся в длинноволновой части спектра, и по редким случаям совпадений с данными CDS нельзя сделать оценки относительной точности измерений.

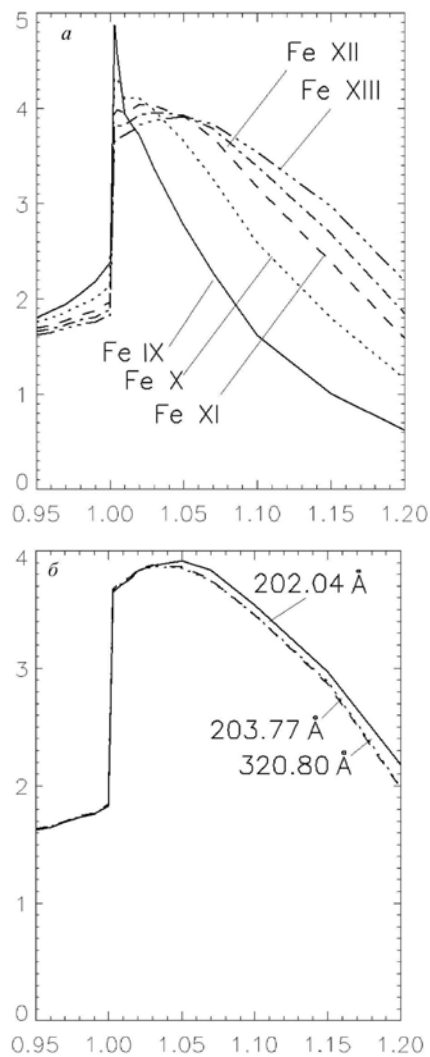


Рис. 3. Экваториальные нормированные распределения интенсивности эмиссионных линий (а): Fe IX 197.8 Å, Fe X 190.0 Å, Fe XI 180.40 Å, Fe XII 193.50 Å, Fe XIII 202.04 Å. По оси абсцисс — расстояние от центра диска Солнца в долях солнечного радиуса. По оси ординат — интенсивность излучения, нормированная по интенсивности в центре диска. Зависимости от высоты над лимбом интенсивности эмиссионных линий Fe XIII, нормированные по интенсивности в центре диска (б); по оси абсцисс — расстояние от центра диска Солнца в долях солнечного радиуса

В особом положении находятся результаты измерений на спектрографе EIS, частотный диапазон которого не перекрывается с частотами других инструментов. Между тем наиболее тщательное исследование спокойного Солнца над лимбом по большому числу эмиссионных линий было выполнено именно на этом инструменте. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для излучения над лимбом, приведенные в табл. 1, показывают большой разброс величин отношений — от 0.6 до 3.3. Расхождения могут быть вызваны разными причинами: неточностью атомных данных, фракционной ионизации, ошибками в определении населенности уровней и высотной зависимости избыточности элементов, погрешностями калибровки и изменениями ее со временем.

Анализ расхождений можно сделать по разбросу точек пересечения кривых зависимости меры эмис-

сии от температуры, полученных для линий разных ионов. Из формул (9, 10) в случае изотермальной короны можно получить выражение для меры эмиссии EM :

$$EM(T) = \int n_e^2 dh = \frac{4\pi I_\lambda}{C(n_e, T)},$$

где I_λ — интенсивность эмиссионной линии. Как известно [Allen et al., 2000], кривые $EM(T)$, вычисленные при фиксированной плотности для эмиссионных линий различных ионов, пересекаются в точке, соответствующей температуре плазмы. Выполним такие вычисления для данных над лимбом, принимая, по аналогии с [Warren, Brooks, 2009], $\log(n_e)=8.3$.

На рис. 4, а приведены зависимости $EM(T)$ для теоретических данных. Из всего ансамбля длин волн, приведенных в табл. 1, здесь исключены эмиссионные линии, у которых расчетное значение меры эмиссии изменяется более чем на 10 % при изменении значения плотности в 10 раз. Это линии Si IX 258.08 Å; Si X 253.78, 258.37 Å; S X 264.23 Å; Fe IX 189.94 Å; Fe X 257.26 Å; Fe XI 182.16 Å; Fe XII 186.88, 196.64, 203.72 Å; Fe XII 196.52, 200.02, 202.04, 203.79 Å; Fe XV 284 Å. Все эти линии отличаются повышенной чувствительностью к плотности. Наблюдаемая интенсивность, по которой определяют меру эмиссии, пропорциональна интегралу излучательности по линии зрения и для большинства линий соответствует произведению меры эмиссии и функции вклада при какой-то фиксированной величине плотности. Если по линии зрения плотность существенно изменяется, то для некоторых линий интегральное значение излучательности получится иным, в результате чего при той же величине меры эмиссии для функции вклада требуется другое значение плотности. Все это демонстрирует рис. 4, в, на котором приведены нормированные к максимальному значению зависимости от высоты излучательности одной из петель модели для ряда линий Fe XII. У эмиссионных линий 186.88, 196.64 и 203.72 Å мы видим, по сравнению с линиями 192.3, 193.5 и 195.11 Å, более резкое изменение излучательности с высотой.

На рис. 4, а точка пересечения кривых $EM(T)$ соответствует температуре $\log(T)=6.11$ и мере эмиссии $\log(EM)=27.1$. Флуктуации положения точки пересечения не превышают 0.05 (7 %) и объясняются в основном расчетными ошибками при вычислении фракционной ионизации для эмиссионных линий, у которых температура пика ионизации значительно удалена от температуры точки пересечения (Si VII, Fe XIV).

На рис. 4, з приведены распределения температуры и плотности в наиболее длинной петле модели короны по высоте от 0.07R. Как видно, эти параметры изменяются с высотой в относительно небольших пределах. Для петель меньшего размера эти изменения еще меньше. Таким образом, можно считать, что при высоте над лимбом 0.07R корона по линии зрения является практически изотермальной.

На рис. 4, б приведены зависимости $EM(T)$ по данным наблюдений над лимбом для того же набора длин волн, что и на рис. 4, а. Как мы видим, пересече-

ния кривых занимают обширную область. Центральная точка пересечения соответствует температуре $\log T=6.07$ и плотности $\log(n_e)=27.0$. Эти величины согласуются с результатами работы [Warren, Brooks, 2009], если учесть, что там использованы другие фракционные ионизации и избыточности. Разброс положений точки пересечения соответствует величине расхождения расчетных и наблюдаемых значений интенсивности.

Исследования зависимостей $EM(T)$ проводились во многих работах (например, [Allen et al., 2000; Landi et al., 2002a, b; Landi, Feldman, 2003; Warren, Brooks, 2009]). В некоторых работах большой разброс точек пересечения объясняется неизотермальностью короны на высоте, где были проведены измерения. Однако следует учитывать, что если по линии зрения в короне присутствуют области атмосферы, резко отличающиеся по температуре, то у всех эмиссионных линий одного и того же иона отклонение от точки пересечения будет примерно одинаковым. На самом деле эти отклонения совершенно разные.

Для ионов, интенсивности линий которых изменялись во всем диапазоне длин волн EIS, величина расхождения расчетных и наблюдаемых значений за лимбом изменяется в больших пределах: от 1.2 до 2.2 у Fe IX, от 1.0 до 2.4 у Fe X, от 1.6 до 3.0 у Fe XI, от 0.6 до 2.5 у Fe XII и от 1.12 до 3.3 у Fe XIII. Это отмечалось в работе [Warren, Brooks, 2009], где было сделано предположение о технической причине такого эффекта — различии калибровок детекторов, используемых для измерения длинноволновых и коротковолновых линий. Согласно рис. 5, где представлены отношения расчетных и экспериментальных данных во всем диапазоне длин волн EIS, эта причина не проявляется как основная.

При анализе данных для центра диска можно заметить, что интенсивности линий одного иона, измеренные на CDS или SUMER, как правило, превышают расчетные значения, в то время как интенсивности, измеренные на EIS, всегда ниже расчетных.

По совокупности всех приведенных особенностей расхождений экспериментальных и расчетных величин можно сделать вывод, что большая изменчивость расхождений над лимбом и значительное превышение обычных величин погрешностей являются следствием неточности измерений на EIS.

В работах [Warren, 2005; Brooks, Warren, 2006] экспериментальные величины, перечисленные в табл. 1, проверялись на соответствие расчетным значениям, полученным по мере эмиссии группы линий. Для ряда линий результаты этих оценок хорошо соответствуют значениям расхождений, приведенным в табл. 1 для центра диска. В связи с этим мы можем исключить случаи, когда отношения расчетных и наблюдаемых величин превышают 2, если это уже было установлено в работах [Warren, 2005; Brooks, Warren, 2006]. Это касается линий: Al IX 680.39 Å, Ne IV 357.88 Å, O VI 1037.6 Å, N V 1238.3, 1242.8 Å, S VI 706.5, 712.68, 933.40, 944.55 Å. В результате этих, а также перечисленных в разделе 2.2 исключений из общего числа

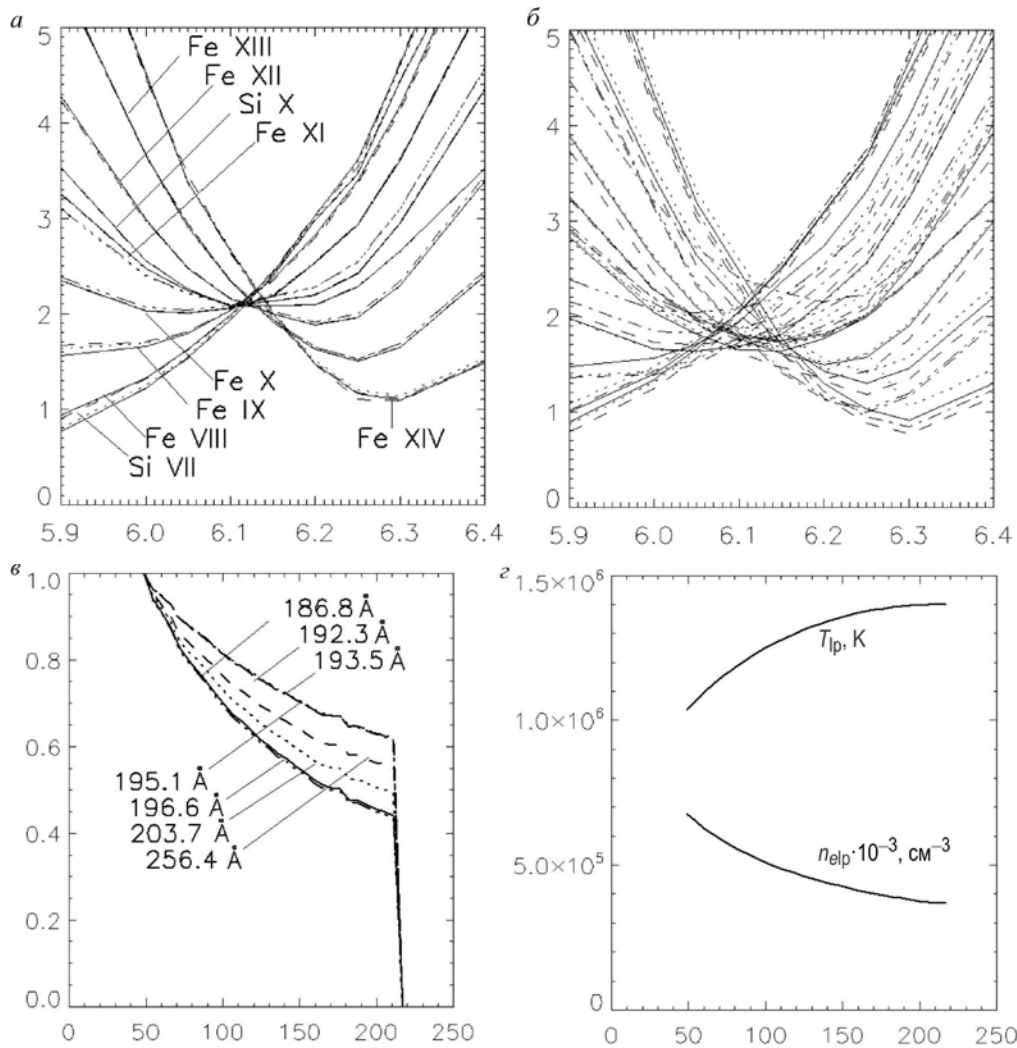


Рис. 4. Анализ меры эмиссии линий Si и Fe в корональной модели (а) и по наблюдениям на EIS (б) (по оси абсцисс — $\log(T)$, по оси ординат — $\log(EM)$ (cm^{-5})); зависимости от высоты излучательности участков петли с $R_{loop}=210\ 000$ км для ряда линий Fe XII (в); распределения температуры и плотности по наиболее длинной петле модели короны в пределах высот от $0.07R$ (г). По оси абсцисс — расстояние от фотосферы, Мм

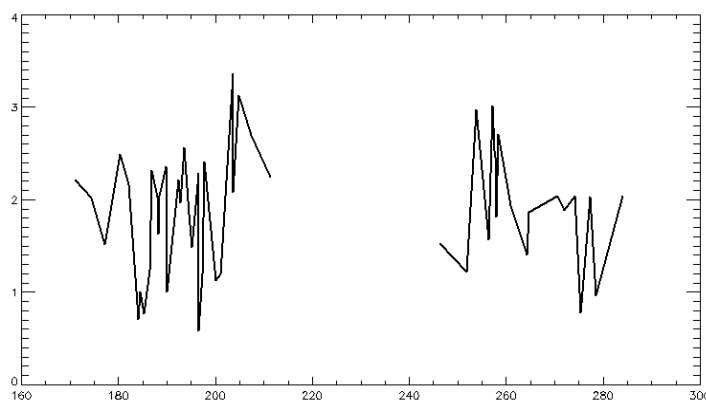


Рис. 5. Спектр расхождений расчетных и экспериментальных данных над лимбом. По оси абсцисс — длины волн (Å), по оси ординат — отношения расчетных и наблюдаемых величин

линий остается 119. При этом лишь у пяти линий расчетные значения составляют от 0.5 до 0.38 наблюдаемых, а у трех линий теоретические значения превышают экспериментальные, полученные на EIS, в 2–2.2 раза.

В целом результаты расчета интенсивности эмиссионных линий EUV и FUV с учетом погреш-

ностей измерений на EIS согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, многокомпонентная модель спокойной короны, предложенная в работе [Krissinel, 2015], применима в широком диапазоне волн.

Необходимо отметить при этом существенное различие излучений в радиодиапазоне и в EUV по

вкладу излучения свободной составляющей. Если в коротковолновом радиодиапазоне (1–5 см) вклад излучения свободной составляющей является определяющим (80–95 %), то в дециметровом диапазоне он не превышает 10 %. В диапазоне EUV этот вклад не превышает 16 % для линий переходной области и 10 % — для корональных линий, т. е. основное EUV-излучение в спокойных областях Солнца связано с излучением петель. Это означает, что исследование движений вещества в спокойных областях короны (по расширению и сдвигу профиля линии), обусловленных перемещениями масс свободного вещества, может осуществляться только при достижении высокого отношения сигнал/шум. В то же время в корональных дырах, где вклад излучения петель существенно меньше, условия для таких исследований оказываются более благоприятными.

В данной работе расчеты интенсивности эмиссионных линий позволили уточнить распределение температуры и плотности в петлях модели короны, главным образом в переходной области петель. Это важно с точки зрения теории нагрева, поскольку эти параметры характеризуют скорость нагрева.

С другой стороны, результаты работы показали достаточно большой уровень погрешностей измерений, особенно при использовании спектрографа EIS. Это осложняет диагностику солнечной плазмы и исследование избыточности [Feldman et al., 2009].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проводилось сравнение с экспериментальными данными расчетных значений интенсивности EUV- и FUV-излучения по модели спокойных участков короны Солнца, предложенной ранее для излучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн. Модель короны была в небольшой степени изменена — увеличено число петель и откорректированы высотные профили температуры и плотности петель. Расчетные значения сравнивались с данными наблюдений на спектрографах CDS, SUMER, EIS, выполненных разными группами исследователей.

Расчет проводился с использованием фракционной ионизации по [Bryans et al., 2009]. В результате получено удовлетворительное согласие расчетных и наблюдаемых величин, особенно для центра диска. Анализ расхождений данных над лимбом, где эти расхождения часто превышали ожидаемые погрешности, показал, что причиной рассогласования, скорее всего, являются погрешности измерений EIS.

Использование модели короны позволяет рассчитать экваториальные распределения интенсивности излучения. Ввиду отсутствия данных наблюдений центр—лиimbus с высоким пространственным разрешением, в работе в демонстрационном порядке приведены распределения центр—лиimbus ряда корональных линий Fe и даны оценки параметров распределения для линий переходной области. Эти оценки согласуются с известными экспериментальными исследованиями, если учитывать технические ограничения.

Таким образом, модель короны спокойных участков Солнца адекватна наблюдаемым интенсивностям эмиссионных линий, как оптически тонких

так и в диапазоне 1 см — 1 м. Представляется, что данная модель или применяемый в модели вероятностный подход к излучению короны могут быть использованы для исследования атмосферы спокойного Солнца на всех широтах, корональных дыр, нетепловых перемещений в короне. В то же время эта модель непригодна для описания излучения хромосферы, пространственные характеристики компонент которой недостаточно изучены.

Результаты данной работы свидетельствуют о трудностях интерпретации данных EUV-телескопов. Проблемы калибровки и контроля проводимых измерений могут быть в определенной степени решены при регулярных тестовых наблюдениях спокойных участков Солнца. При этом результаты настоящей работы могут быть прямо использованы для проведения соответствующих корректировок.

Автор признателен коллективу отдела радиоастрономии ИСЗФ СО РАН за полезное обсуждение работы.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на 2018 г. № 007-00163-18-00 от 12.01.2018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гетман К.В., Лившиц М.А. Модель внешней атмосферы Солнца, лишенной активности // АЖ. 1996. Т. 73. С. 119–124.
- Allen R., Landi E., Landini M., Bromage G.E. An empirical test of different ionization balance calculations in an isothermal solar plasma // Astron. Astrophys. 2000. V. 358. P. 332–342.
- Binello A.M., Landi E., Mason H.E., et al. A comparison between theoretical and solar Fe XII UV line intensity ratios // Astron. Astrophys. 2001. V. 370. P. 1071–1087. DOI: [10.1051/0004-6361:20010255](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010255).
- Borovik V.N., Kurbanov M.Sh., Makarov V.V. Distribution on radio brightness of the quiet Sun in the 2–32 cm range // Soviet Astron. 1992. V. 36, N. 9. P. 656–663.
- Brooks D.H., Warren H.P. The intercalibration of SOHO EIT, CDS-NIS, and TRACE // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2006. V. 164, N 1. P. 202–214.
- Brooks D.H., Warren H.P., Williams D.R., Watanabe T. HINODE/Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer observations of the temperature structure of the quiet corona // Astrophys. J. 2009. V. 705, N 1. P. 1522–1532. DOI: [10.1088/0004-637X/705/2/1522](https://doi.org/10.1088/0004-637X/705/2/1522).
- Brown C.M., Feldman U., Seely J.F., et al. Wavelengths and intensities of spectral lines in the 171–211 and 245–291 Å ranges from five solar regions recorded by Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer (EIS) on Hinode // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2008. V. 176. P. 511–535.
- Bryans P., Landi E., Savin D.W. A new approach analyzing solar spectra and updated collisional ionization equilibrium calculations. II. Updated ionization rate coefficients // Astrophys. J. 2009. V. 691, N 2. P. 1540–1559. DOI: [10.1088/0004-637X/691/2/1540](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1540).
- Dere K.P., Landi E., Mason H.E., et al. CHIANTI – an atomic database for emission lines // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1997. V. 125. P. 149–173.
- Doschek E.E., Laming G.A., Doschek G.A., et al. A comparison of measurements of solar extreme-ultraviolet spectral line intensities emitted by C, N, O, and S ions with theoretical calculations // Astrophys. J. 1999. V. 518, N 2. P. 909–917.
- Erdelyi R., Doyle J.G., Perez M.E., Wilhelm K. Center-to-limb width measurements of solar chromospheric, transition

region and coronal lines // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 337. P. 287–293.

Feldman U. Elemental abundances in the upper solar atmosphere // *Physica Scripta.* 1992. V. 46. P. 202–220.

Feldman U., Mandelbaum P., Seely J.L., et al. The potential for plasma diagnostics from stellar extreme-ultraviolet observations // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1992. V. 81. P. 387–408.

Feldman U., Schühle U., Widing K.G., Laming J.M. Coronal composition above the solar equator and the north pole as determined from spectra acquired by the SUMER instrument on SOHO // *Astrophys. J.* 1998. V. 505, N 2. P. 99–1006.

Feldman U., Doschek G.A., Schühle U., Wilhelm K. Properties of quiet – Sun coronal plasmas at distances of $1.03 \leq R_0 \leq 1.50$ along the solar equatorial plane // *Astrophys. J.* 1999. V. 518, N 1. P. 500–507.

Feldman U., Warren H.P., Brown C.M., Doschek G.A. Can then composition of the solar corona be derived from HINODE/extreme-ultraviolet imaging spectrometer spectra // *Astrophys. J.* 2009. V. 695, N 1. P. 36–45. DOI: [10.1088/0004-637X/695/1/36](https://doi.org/10.1088/0004-637X/695/1/36).

Fludra A., Schmelz J.T. The absolute coronal abundance of sulfur, calcium, and iron from YOHKOH-BCS flare spectra // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 348. P. 286–294.

Fontenla I.M., Avrett E.H., Loeser R. Energy balance in the solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion // *Astrophys. J.* 1993. V. 406, N 1. P. 319–345.

Hassler D.M., Rottman G.J., Shoub E.C., Holzer T.E. Line broadening of Mg X $\lambda\lambda 609$ and 625 coronal emission lines observed above the solar limb // *Astrophys. J.* 1990. V. 348, N 1. P. L77–L80.

Kjeldseth Moe O., Nicolas K.R. Emission measures, electron densities, and nonthermal velocities from optically thin UV lines near a quiet solar limb // *Astrophys. J.* 1977. V. 211. P. 579–586.

Krissinel B.B. Modeling of the structure of quiescent areas of the solar atmosphere emitting at 1–100 cm // *Astron. Rep.* 2015. V. 59, N 1. P. 58–71. DOI: [10.1134/S1063772915010060](https://doi.org/10.1134/S1063772915010060).

Laming J.M., Feldman U., Schühle U., et al. Electron density diagnostic for solar upper atmosphere from spectra obtained by SUMER/SOHO // *Astrophys. J.* 1997. V. 485. P. 911–919.

Landi E., Feldman U., Dere K.P. CHIANTI – an atomic database for emission lines. V. Comparison with an isothermal spectrum observed with SUMER // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2002a. V. 139, N 1. P. 281–296

Landi E., Feldman U., Dere K.P. A comparison between coronal emission lines from an isothermal spectrum obtained with the coronal diagnostic spectrometer and CHIANTI emissivities // *Astrophys. J.* 2002b. V. 574, N 2. P. 495–503.

Landi E., Feldman U. Properties of solar plasmas near solar maximum above two quiet regions at distance of $1.02 - 1.34 R_0$ // *Astrophys. J.* 2003. V. 592, N 1. P. 607–619.

Landi E., Del Zanna G., Young P.R., et al. CHIANTI – an atomic database for emission lines. XII, Version 7 for database // *Astrophys. J.* 2012. V. 744, N 1. P. 99–108. DOI: [10.1088/0004-637X/778/1/29](https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/29).

Lantos P., Kundu M.R. The quiet Sun brightness distributions at millimeter wavelengths and chromospheric inhomogeneities // *Astron. Astrophys.* 1972. V. 21. P. 119–124.

Lee H., Yun H.S., Chae J. Nonthermal broadening of UV lines observed at the limb of the quiet SUN // *J. Kor. Astron. Soc.* 2000. V. 33. P. 57–37.

Mariska J.T., Feldman U., Doschek G.A. Measurements of extreme-ultraviolet emission-line profiles near the solar limb // *Astrophys. J.* 1978. V. 226. P. 698–705.

Mariska J.T., Feldman U., Doschek G.A. Nonthermal broadening of extreme ultraviolet emission lines near Solar limb // *Astron. Astrophys.* 1979. V. 73. P. 361–363.

Mason H.E., Monsignor Fossi B.C. Spectroscopic diagnostic in the VUV for solar and stellar plasmas // *Astron. Astrophys. Rev.* 1994. V. 6. P. 123–173.

Mohan A., Landi E., Dwivedi B.N. On the extreme-ultraviolet/ultraviolet plasma diagnostics for nitrogen-like ions from spectra obtained by SOHO/SUMER // *Astrophys. J.* 2003. V. 582, N 1. P. 1162–1171.

Parenti S., Landi E., Bromage B.J.I. SOHO-ULYSSES spring 2000 quadrature: coronal diagnostic spectrometer and SUMER results // *Astrophys. J.* 2003. V. 590, N 1. P. 519–532.

Peter H. Analysis of transition-region emission-line profiles from full-disk scans of the Sun using the SUMER instrument on SOHO // *Astrophys. J.* 1999. V. 516, N 1. P. 490–504.

Schmelz J.T., Reames D.V., von Steiger R., Basu S. Composition of the solar corona, solar wind, and solar energetic particles // *Astrophys. J.* 2012. V. 755, N 1. P. 33–40. DOI: [10.1088/0004-637X/755/1/33](https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/1/33).

Warren H.P. Measuring the physical properties of the solar corona: results from SUMER/SOHO and TRACE // *Sol. Phys.* 1999. V. 190. P. 363–377.

Warren H.P., Warshall A.D. Temperature and density measurements in a quiet coronal streamer // *Astrophys. J.* 2002. V. 571, N 1. P. 999–1007.

Warren H.P. A solar minimum irradiance spectrum for wavelengths below 1200 Å // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005. V. 157, N 1. P. 147–173.

Warren H.P., Brooks D.H. The temperature and density structure of the solar corona. I. Observations of the quiet Sun with the EUV imaging spectrometer on Hinode // *Astrophys. J.* 2009. V. 700, N 2. P. 762–773. DOI: [10.1088/0004-637X/700/1/762](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/762).

Wilhelm K., Lemaire P., Dammasch I.E., et al. Solar irradiances and radiances of UV and EUV lines during the minimum sunspot activity in 1996 // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 334. P. 685–702.

Young P.R., Landi E., Thomas R.J. CHIANTI: an atomic database for emission lines. II. Comparison with the SERTS-89 active region spectrum // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 329. P. 291–314.

Young P.R., Del Zanna G., Mason H.E., et al. EUV emission lines and diagnostics observed with Hinode/EIS // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2007. V. 59. P. S857–S864.

Zirin H., Baument B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun // *Astrophys. J.* 1991. V. 370, N 1. P. 779–783.

REFERENCES

Allen R., Landi E., Landini M., Bromage G.E. An empirical test of different ionization balance calculations in an isothermal solar plasma. *Astron. Astrophys.* 2000, vol. 358, pp. 332–342.

Binello A.M., Landi E., Mason H.E., Storey P.J., Brosius J.W. A comparison between theoretical and solar Fe_{XII} UV line intensity ratios. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 370, pp. 1071–1087. DOI: [10.1051/0004-6361:20010255](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010255).

Borovik V.N., Kurbanov M.Sh., Makarov V.V. Distribution on radio brightness of the quiet Sun in the 2–32 cm range. *Soviet Aston.* 1992, vol. 36, no. 9, pp. 656–663.

Brooks D.H., Warren H.P. The intercalibration of SOHO EIT, CDS-NIS, and TRACE. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2006, vol. 164, no. 1, pp. 202–214.

Brooks D.H., Warren H.P., Williams D.R., Watanabe T. HINODE/extreme – ultraviolet imaging spectrometer observations of the temperature structure of the quiet corona. *Astrophys. J.* 2009, vol. 705, no. 1, pp. 1522–1532. DOI: [10.1088/0004-637X/705/2/1522](https://doi.org/10.1088/0004-637X/705/2/1522).

Brown C.M., Feldman U., Seely J.F., Korendyke C.M., Hara H. Wavelengths and intensities of spectral lines in the 171–211 and 245–291 Å ranges from five solar regions recorded by Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer (EIS) on Hinode. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2008. vol. 176. pp. 511–535.

Bryans P., Landi E., Savin D.W. A new approach analyzing solar spectra and updated collisional ionization equilibrium calculations. II. Updated ionization rate coefficients. *Astrophys.*

J. 2009, vol. 691, no. 2, pp. 1540–1559. DOI: [10.1088/0004-637X/691/2/1540](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1540).

Dere K.P., Landi E., Mason H.E., et al. CHIANTI – an atomic database for emission lines. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1997, vol. 125, pp. 149–173.

Doschek E.E., Laming G.A., Doschek G.A., Feldman U., Wilhelm K. A comparison of measurements of solar extreme-ultraviolet spectral line intensities emitted by C, N, O, and S ions with theoretical calculations. *Astrophys. J.* 1999, vol. 518, no. 2, pp. 909–917.

Erdely R., Doyle J.G., Perez M.E., Wilhelm K. Center-to-limb width measurements of solar chromospheric, transition region and coronal lines. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 337, pp. 287–293.

Feldman U. Elemental abundances in the upper solar atmosphere. *Physica Scripta.* 1992, vol. 46, pp. 202–220.

Feldman U., Mandelbaum P., Seely J.L., Doschek G.A., Gursky H. The potential for plasma diagnostics from stellar extreme-ultraviolet observations. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1992, vol. 81, pp. 387–408.

Feldman U., Schühle U., Widing K.G., Laming J.M. Coronal composition above the solar equator and the north pole as determined from spectra acquired by the SUMER instrument on SOHO. *Astrophys. J.* 1998, vol. 505, no. 2, pp. 99–1006.

Feldman U., Doschek G.A., Schühle U., Wilhelm K. Properties of quiet – Sun coronal plasmas at distances of $1.03 \leq R_0 \leq 1.50$ along the solar equatorial plane. *Astrophys. J.* 1999, vol. 518, no. 1, pp. 500–507.

Feldman U., Warren H.P., Brown C.M., Doschek G.A. Can then composition of the solar corona be derived from HINODE/extreme-ultraviolet imaging spectrometer spectra. *Astrophys. J.* 2009, vol. 695, no. 1, pp. 36–45. DOI: [10.1088/0004-637X/695/1/36](https://doi.org/10.1088/0004-637X/695/1/36).

Fludra A., Schmelz J.T. The absolute coronal abundance of silicon, calcium, and iron from YOHKOH-BCS flare spectra. *Astr. Astrophys.* 1999, vol. 348, pp. 286–294.

Fontenla I.M., Avrett E.H., Loeser R. Energy balance in the solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion. *Astrophys. J.* 1993, vol. 406, no. 1, pp. 319–345.

Getman K.V., Livshits M.A. A model for the outer solar atmosphere devoid of activity. *Astronomichesky zhurnal* [Astron. Report]. 1996, vol. 73, pp. 119–124. (In Russian).

Hassler D.M., Rottman G.J., Shoub E.C., Holzer T.E. Line broadening of Mg X $\lambda\lambda 609$ and 625 coronal emission lines observed above the solar limb. *Astrophys. J.* 1990, vol. 348, no. 1, pp. L77–L80.

Kjeldseth Moe O., Nicolas K.R. Emission measures, electron densities, and nonthermal velocities from optically thin UV lines near a quiet solar limb. *Astrophys. J.* 1977, vol. 211, pp. 579–586.

Krissinel B.B. Modeling of the structure of quiescent areas of the solar atmosphere emitting at 1–100 cm. *Astron. Rep.* 2015, vol. 59, no. 1, pp. 58–71. DOI: [10.1134/S1063772915010060](https://doi.org/10.1134/S1063772915010060).

Laming J.M., Feldman U., Schühle U., Lemaire P., Curdt W., Wilhelm K. Electron density diagnostic for solar upper atmosphere from spectra obtained by SUMER/SOHO. *Astrophys. J.* 1997, vol. 485, pp. 911–919.

Landi E., Feldman U., Dere K.P. CHIANTI – an atomic database for emission lines. V. Comparison with an isothermal spectrum observed with SUMER. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2002a, vol. 139, no. 1, pp. 281–296.

Landi E., Feldman U., Dere K.P. A comparison between coronal emission lines from an isothermal spectrum obtained with the coronal diagnostic spectrometer and CHIANTI emissivities. *Astrophys. J.* 2002b, vol. 574, no. 2, pp. 495–503.

Landi E., Feldman U. Properties of solar plasmas near solar maximum above two quiet regions at distance of $1.02 - 1.34 R_0$. *Astrophys. J.* 2003, vol. 592, no. 1, pp. 607–619.

Landi E., Del Zanna G., Young P.R., Dere K.P., Mason H.E. CHIANTI – an atomic database for emission lines. XII, Version 7 for database. *Astrophys. J.* 2012, vol. 744, no. 2, p. 99. DOI: [10.1088/0004-637X/778/1/29](https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/29).

Lantos P., Kundu M.R. The quiet Sun brightness distributions at millimeter wavelengths and chromospheric inhomogeneities. *Astron. Astrophys.* 1972, vol. 21, pp. 119–124.

Lee H., Yun H.S., Chae J. Nonthermal broadening of UV lines observed at the limb of the quiet SUN. *J. Kor. Astron. Soc.* 2000, vol. 33, pp. 57–37.

Mariska J.T., Feldman U., Doschek G.A. Measurements of extreme-ultraviolet emission-line profiles near the solar limb. *Astrophys. J.* 1978, vol. 226, pp. 698–705.

Mariska J.T., Feldman U., Doschek G.A. Nonthermal broadening of extreme ultraviolet emission lines near Solar limb. *Astron. Astrophys.* 1979, vol. 73, pp. 361–363.

Mason H.E., Monsignori Fossi B.C. Spectroscopic diagnostic in the VUV for solar and stellar plasmas. *Astron. Astrophys. Rev.* 1994, vol. 6, pp. 123–173.

Mohan A., Landi E., Dwivedi B.N. On the extreme-ultraviolet/ultraviolet plasma diagnostics for nitrogen-like ions from spectra obtained by SOHO/SUMER. *Astrophys. J.* 2003, vol. 582, no. 1, pp. 1162–1171.

Parenti S., Landi E., Bromage B.J.I. SOHO-ULYSSES spring 2000 quadrature: coronal diagnostic spectrometer and SUMER results. *Astrophys. J.* 2003, vol. 590, no. 1, pp. 519–532.

Peter H. Analysis of transition-region emission-line profiles from full-disk scans of the Sun using the SUMER instrument on SOHO. *Astrophys. J.* 1999, vol. 516, no. 1, pp. 490–504.

Schmelz J.T., Reames D.V., von Steiger R., Basu S. Composition of the solar corona, solar wind, and solar energetic particles. *Astrophys. J.* 2012, vol. 755, no. 1, p. 33–40. DOI: [10.1088/0004-637X/755/1/33](https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/1/33).

Warren H.P. Measuring the physical properties of the solar corona: results from SUMER/SOHO and TRACE. *Sol. Phys.* 1999, vol. 190, pp. 363–377.

Warren H.P., Warshall A.D. Temperature and density measurements in a quiet coronal streamer. *Astrophys. J.* 2002, vol. 571, no. 1, pp. 999–1007.

Warren H.P. A solar minimum irradiance spectrum for wavelengths below 1200 \AA . *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005, vol. 157, no. 1, pp. 147–173.

Warren H.P., Brooks D.H. The temperature and density structure of the solar corona. I. Observations of the quiet Sun with the EUV imaging spectrometer on Hinode. *Astrophys. J.* 2009, vol. 700, no. 2, p. 762–773. DOI: [10.1088/0004-637X/700/1/762](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/762).

Wilhelm K., Lemaire P., Dammasch I.E., et al. Solar irradiances and radiances of UV and EUV lines during the minimum sunspot activity in 1996. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 334, p. 685–702.

Young P.R., Landi E., Thomas R.J. CHIANTI: an atomic database for emission lines. II. Comparison with the SERTS-89 active region spectrum. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 329, p. 291–314.

Young P.R., Del Zanna G., Mason H.E., Dere K.P., Landi E., Landini M., Doschek G.A., Brown Ch.M., Culhane L., Harra L.K., Watanabe T., Hara H. EUV emission lines and diagnostics observed with Hinode/EIS. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2007, vol. 59, p. S857–S864.

Zirin H., Baument B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun. *Astrophys. J.* 1991, vol. 370, no. 1, p. 779–783.

Как цитировать эту статью

Криссинель Б.Б. Интенсивность эмиссионных линий короны спокойного Солнца: сравнение расчетных и наблюдательных данных. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 1. С. 14–27. DOI: [10.12737/szf-41201802](https://doi.org/10.12737/szf-41201802).