

УДК 523.985.3

Изменение состояния низкотемпературной плазмы в процессе мощной солнечной вспышки

К. В. Аликаева, Э. А. Барановский, П. Н. Полупан

Прослежено изменение профилей линий H_{α} и H_{β} в процессе развития мощной двухленточной солнечной вспышки 16 мая 1981 г., включая ее начальную стадию.

Физические условия в хромосфере и фотосфере вспышечной области определялись путем сравнения наблюдаемых и теоретических профилей H_{α} и H_{β} . Теоретические профили рассчитаны для ряда моделей вспышек, различающихся температурой, турбулентной ($12-18 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$) и лучевой скоростями. Скорости «турбулентности» в хромосферных слоях в 3—4 раза выше, чем в фотосферных. В начальной фазе наблюдается подъем вещества со скоростью до 30 км/с, а в максимуме и на спаде вспышки — опускание со скоростью 5—10 км/с. Температура в области свечения H_{α} и H_{β} выше, чем в невозмущенной атмосфере на 500—1100 К. Наблюдаемая эмиссия в далеких крыльях ($\Delta\lambda > 0.2 \text{ нм}$) может быть объяснена наличием тонких более горячих слоев в верхней фотосфере.

THE VARIATIONS OF LOW-TEMPERATURE MATTER DURING STRONG SOLAR FLARE, by Alikaeva K. V., Baranovskij E. A., Polupan P. N.—The variations of the H_{α} and H_{β} profiles are studied in the spectra of strong two-ribbon solar flare on May 16, 1981 during its development including the initial phase. Physical conditions in the chromosphere and the photosphere of flare region are determined comparing the observed H_{α} and H_{β} profiles with theoretical ones. The latter ones are calculated for a number of models with various temperatures, turbulent and radial velocities. The turbulent velocities in chromospheric layers are 3-4 times higher than in photospheric ones. In the initial phase of the flare the upward motion of the matter with velocities $\sim 30 \text{ km/s}$ is observed in both flare knots. At maximum and post-maximum phase the downward motion of the matter with velocities 5-10 km/s occurs. The temperature in the H_{α} and H_{β} emitting region exceeded the one in the undisturbed atmosphere by 500-1100 K. The observed emission in far wings of the lines ($\Delta\lambda > 0.2 \text{ nm}$) may be explained by the presence of thin hotter layers in the upper photosphere.

Введение. Спектральные наблюдения в линиях водорода, охватывающие все стадии солнечной вспышки, позволяют судить об изменениях физического состояния и динамике хромосферной плазмы в процессе развития вспышки. Из-за малой продолжительности импульсной фазы вспышек изменения профилей водородных линий в этой стадии изучены недостаточно. Поэтому выводы о преобладании «красной» асимметрии и сдвигов в длинноволновую сторону водородных линий, многократно отмеченные в литературе [14—16], относятся главным образом к стадиям максимума и затухания вспышек. Однако в тех случаях, когда наблюдения охватывали и начальную стадию вспышек, удавалось обнаружить «синюю» асимметрию в бальмеровских линиях [15]. Это свидетельствует о подъеме вещества, часто отождествляемом с испарением хромосферы в начальной фазе вспышек. Теоретические расчеты также предсказывают резкие изменения состояния хромосферной плазмы в начальной стадии вспышек [4, 13]. Из-за ограничений, вводимых при решении задачи о гидродинамическом отклике низкотемпературной части вспышек, возникает вопрос, насколько точно эти расчеты описывают состояние хромосферного и фотосферного вещества. Установление по наблюдениям более полной картины развития вспышечного процесса позволит построить такую модель низкотемпературной части вспышки, которая будет лучше согласована с наблюдениями. В этом отношении представляет интерес бальмеровский спектр мощной двухленточной вспышки 16 мая 1981 г. (начало 0810 UT, главный максимум в 0842 UT), наблюдения которой охватывают все стадии развития, включая предвспышечную.

Наблюдения. Спектральные и с H_{α} -фильтром наблюдения выполнены на горизонтальном солнечном телескопе ГАО АН УССР по программе ГСМ (наблюдатель Н. Н. Кондрашова). Точность наблюдаемых профилей оценивалась по профилям линий невозмущенного Солнца и составляет $\leq 2-3\%$. Профили H_{α} и H_{β} получены для узлов А и Б, расположенных в N- и S-лентах вспышки, где, согласно [12], наблюдались большие градиенты продольного магнитного поля и сильное трансверсальное поле.

Выделение энергии во вспышке происходило многократно и в разных местах [10, 11], вследствие чего предмаксимальная стадия имела сложный характер. Сопоставление с данными об импульсных радиовсплесках на 6 и 11 см [10] показывает, что каждому локальному усилению узлов A и B в H_{α} предшествовали такие радиовсплески. Щель спектрографа, как правило, проходила вблизи места проекции радиовсплеска на хромосферу, а в отдельные моменты совпадала с ним (0815, 0833 UT). Особенности развития данной вспышки, ее импульсной фазы подробно изложены в работах [5, 7, 10].

От многих других вспышек на диске эту вспышку отличают необычные двугорбые профили H_{α} и H_{β} (рис. 1, узел A ; рис. 2, узел B). Заметим, что и в субвспышке,

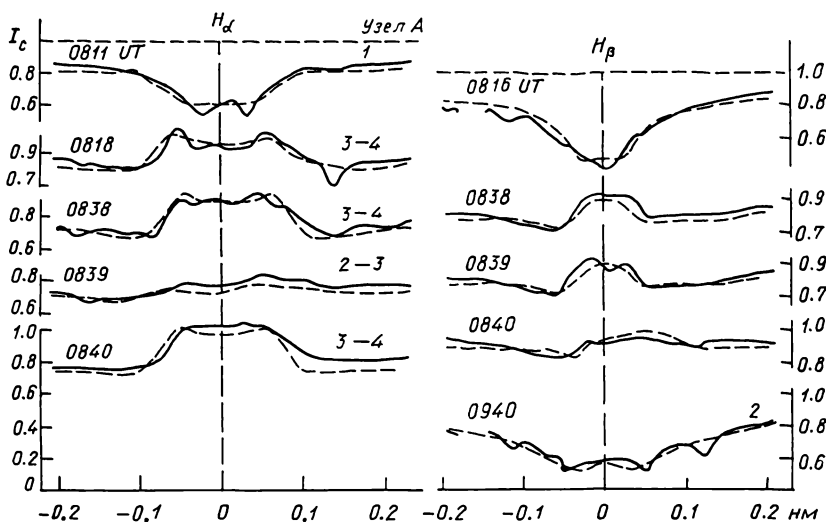


Рис. 1. Наблюдаемые (сплошная линия) и вычисленные (штриховая) профили линий H_{α} , H_{β} для узла A вспышки ЗВ

которая возникла в этом же активном комплексе и инициировала мощную вспышку, наблюдались аналогичные профили. В процессе развития этой вспышки изменялись величина и знак асимметрии, протяженность крыльев, относительные интенсивности «синего» и «красного» пиков профилей [4]. Поскольку области формирования линий H_{α} и H_{β} , их ядер и крыльев охватывают хромосферные и фотосферные слои, то различия физических условий и макроскопических движений в этих слоях обуславливают сложную форму профилей.

Перед вспышкой, в месте ее возникновения (узел B , 0745 UT), уже наблюдался небольшой сдвиг линии H_{α} в «синюю» сторону и ее усиление. Протяженность крыльев невелика, около 0.15 нм. Следовательно, перед вспышкой несколько изменились физические условия лишь верхних слоев. В соседнем флоккулярном узле, не затронутом впоследствии вспышкой, профиль H_{α} в 0734 UT был симметричным, без существенных изменений.

Хотя вспышечные узлы развивались не синхронно, характер изменений спектра в них одинаков. В начальной фазе в обоих вспышечных узлах (0814 UT в узле A , 0822 UT в узле B) проявлялось усиление «синих» крыла и пика, т. е. на всех глубинах образования линий преобладали восходящие движения. Спустя 3—4 мин в глубоких слоях произошли изменения. Это проявилось в том, что при более интенсивном «синем» пике линии H_{α} явно наблюдается усиление «красного» крыла. Вблизи локальных максимумов интенсивности узлов A и B произошла резкая (в течение 1 мин) смена знака асимметрии, что свидетельствует о нисходящих движениях на всех уровнях атмосферы. В максимуме и на стадии спада интенсивности наблюдалась только «красная» асимметрия. Одинаковый характер движений в обоих лентах в период быстрого развития вспышки (и наличие арочных структур на H_{α} -фильтрограммах) можно рассматривать как свидетельство первоначального подъема вещества и последующего его «стекания» вдоль магнитных петель.

Физические условия. Для определения физических условий в хромосфере и фотосфере вспышечной области мы сравниваем наблюдаемые профили H_{α} и H_{β} с теоре-

тическими. Обоснование выбора модели вспышки изложено в [2]. Теоретические профили рассчитаны для моделей вспышек, представленных на рис. 3, и для промежуточных моделей. Штриховой кривой обозначен ход температуры в невозмущенной хромосфере по модели [17]. Модели различаются по температуре (кривые 1—5, рис. 3), турбулентной и лучевой скоростям (рис. 4). Ход плотности с глубиной для всех моделей взят одинаковый (кривая n_H , рис. 3). Плотность водорода в модели составляет

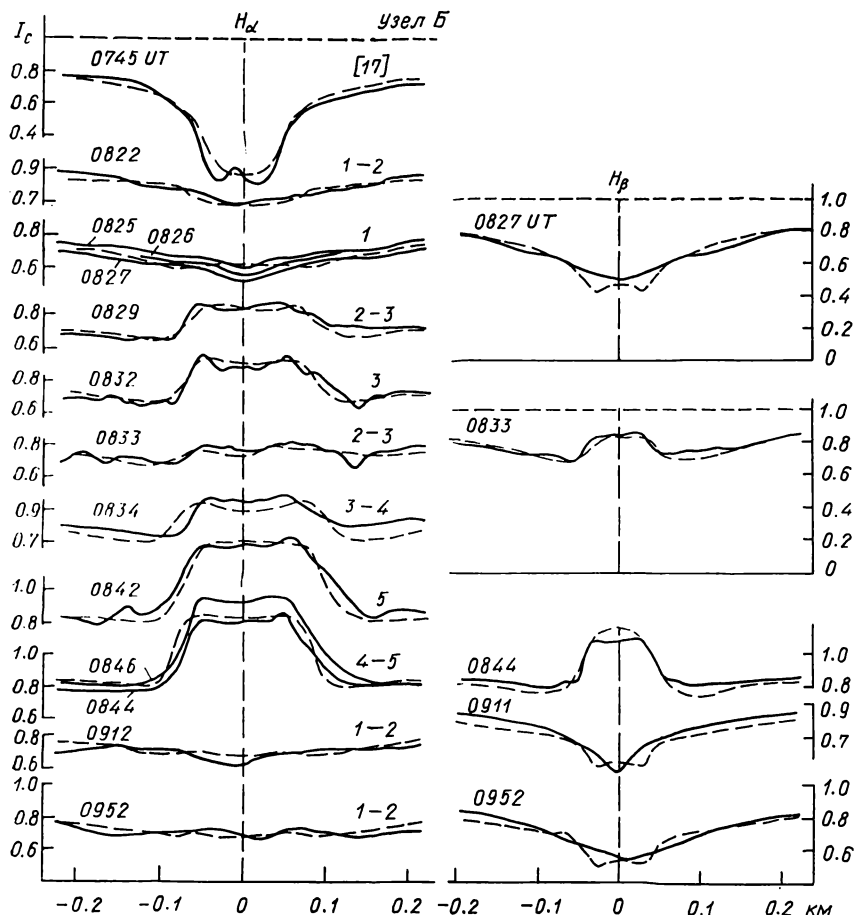


Рис. 2. То же для узла Б этой же вспышки. Для 0745 UT теоретический профиль рассчитан по модели невозмущенной хромосферы [17]

около 10^{13} см $^{-3}$ на глубине образования ядра L_α и около 10^{15} см $^{-3}$ на глубине образования ядер H_α и H_β . Такие высокие по сравнению с невозмущенной областью значения плотности для моделей вспышек получены [2] на основании изучения профилей линий лаймановской и бальмеровской серий. В частности, заключение, что в области образования линий H_α и H_β плотность должна быть не менее 10^{15} см $^{-3}$, получено [2] по величине бальмеровского декремента для этих линий.

Расчет теоретических профилей линий сделан посредством совместного решения уравнений переноса и стационарности для атома водорода с девятью уровнями и континуумом. При этом используется метод, основанный на решении интегрального уравнения для функции источников [8]. В вычислениях ионизации водорода в верхней хромосфере учитывалось влияние потока рентгеновского излучения и пучка быстрых электронов. Соответствующие потоки 16 Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$ и ~ 10 Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$ выбирались из соображений энергетического баланса — поглощенная энергия потока должна быть равна радиационным потерям хромосферных слоев. Этот вопрос подробно рассматривался в [2].

Программа расчета профилей составлена так, что в конечном результате получаем полные интенсивности в частотах линии — с учетом излучения в линии и непрерывного

излучения от всех слоев хромосферы и фотосферы. Таким образом, теоретические профили можно непосредственно сравнивать с наблюдаемыми — не требуется вычитания так называемой «подложки», т. е. профиля невозмущенной области. Следует заметить, что вычитание невозмущенного профиля из наблюдаемого для получения эмиссии только от вспышки всегда вносит неопределенность. При такой процедуре вычитания предполагается, с одной стороны, что эмиссии вспышки возникают только в хромосферных слоях, а фотосфера под вспышкой остается невозмущенной. С другой стороны, делаются какие-то предположения о величине оптической толщи вспышки. Однако фотосфера во время вспышек не остается невозмущенной [6], а определение оптической толщи

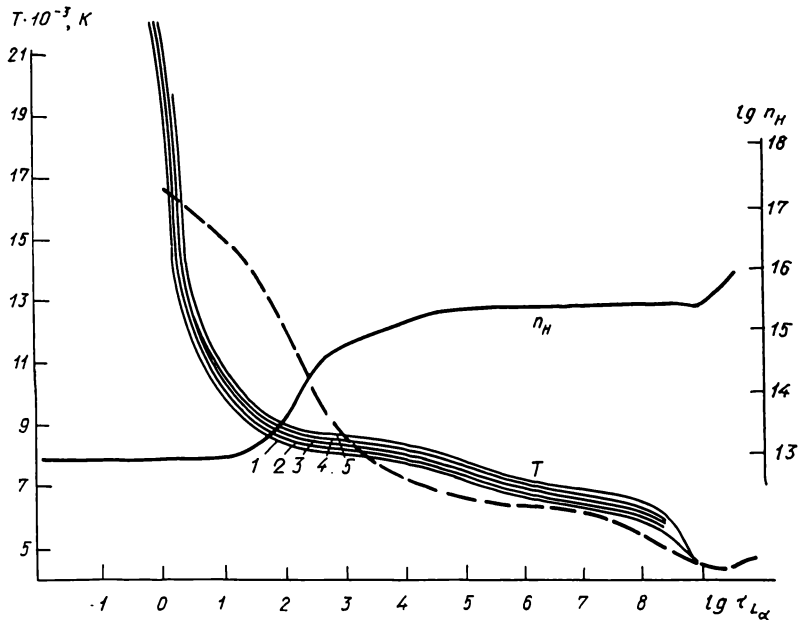


Рис. 3. Температура T (кривые 1—5) и плотность n_H в моделях вспышки

вспышки в частотах линии можно сделать только после построения ее модели. Критерием выбора температурной модели для каждого момента является наилучшее согласие теоретических и наблюдаемых профилей одновременно для двух линий H_{α} и H_{β} . В области преимущественного свечения H_{α} и H_{β} модели различаются на ~ 100 К. (рис. 3). Ошибка определения T составляет 50—100 К.

Сравнение теоретических и наблюдаемых профилей дано на рис. 1 и 2. Слева на рисунках указано время получения наблюдаемых профилей, справа — номер модели, по которой рассчитан теоретический профиль. Если использовалась промежуточная модель, то указаны номера обеих моделей. Все теоретические профили линии H_{β} (за исключением профиля в 0940 UT на рис. 1) получены по тем же моделям, что и профили H_{α} для ближайших моментов наблюдений. На рис. 1 и 2 они находятся рядом.

Диапазон изменений интенсивности вспышки в H_{α} (от 0.55 до 1.31) соответствует изменению температуры в процессе развития вспышки в пределах 500 К. Максимальным значениям интенсивности соответствует температурное распределение, при котором в области свечения H_{α} и H_{β} температура превышает значения для невозмущенной атмосферы на 900—1100 К (модель 5, рис. 3).

Величина турбулентной скорости в моделях составляет 12—18 км/с в хромосферных слоях и уменьшается до 4—5 км/с в фотосфере. В случае асимметричных профилей соответствующие им теоретические профили рассчитывались с заданным полем лучевых скоростей. При этом некоторые теоретические профили являются результатом наложения двух или трех профилей, рассчитанных для различных значений лучевых скоростей. Наблюдаемые профили, соответствующие таким «составным» профилям, представляем как результат наложения спектров от соседних участков вспышки при недостаточно высоком пространственном разрешении. Так, теоретический профиль на рис. 1, 0818 UT,

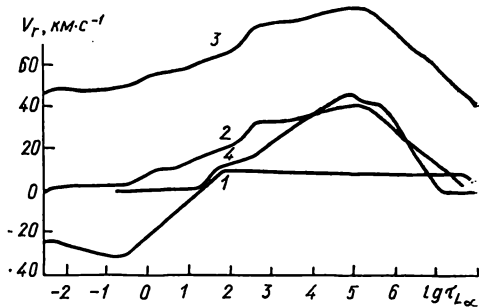
является результатом сложения двух профилей, один из которых рассчитан для модели без лучевых скоростей, а второй — для модели с полем лучевых скоростей, изображенном на рис. 4 (кривая 1).

Теоретические профили на рис. 1 UT 0838, 0839 (H_{β}) и на рис. 2, UT 0829, 0832, 0833 (H_{β}), 0834, 0842 также являются результатом сложения профилей без лучевых скоростей и профилей, рассчитанных для моделей, хромосферные слои которых движутся вниз со скоростью 5—10 км/с.

Теоретические профили линии H_{α} на рис. 1 0839 UT и рис. 2 0833 UT получены сложением профилей для двух моделей с лучевыми скоростями (кривые 2, 3 на рис. 4), а поле скоростей для момента 0840 UT представлено кривой 4 на рис. 4.

Из сравнения наблюдаемых профилей с теоретическими, рассчитанными для моделей с лучевыми скоростями, заключаем, что в начальной стадии вспышки происходит движение вещества вверх со скоростями до 50 км/с. В дальнейшем наблюдается только движение вниз со скоростями 5—10 км/с, а в отдельные моменты (0839 UT, узел А; 0833 UT, узел Б) скорости достигают 50—90 км/с.

Рис. 4. Лучевые скорости в моделях. Положительные значения соответствуют движению вверх



Около половины наблюдаемых профилей имеют протяженные эмиссионные крылья, простирающиеся значительно дальше 0.2 нм. Интерпретировать такие эмиссионные профили свечением только хромосферных слоев не удастся. Для объяснения эмиссии в далеких крыльях проведены расчеты эмиссионных профилей для моделей с повышенной температурой в области температурного минимума и в верхних слоях фотосферы и для моделей с дискретными тонкими горячими слоями в верхней фотосфере. Увеличение температуры на 200—900 К в фотосферных слоях объясняет необходимое увеличение эмиссии в далеких крыльях H_{α} и H_{β} , но такие модели дают также и непрерывную эмиссию порядка 15—25 %. Таким образом, модели с увеличением температуры верхней фотосферы пригодны только для вспышек с непрерывной эмиссией.

Модели с тонкими горячими слоями в фотосфере дают эмиссию в далеких крыльях бальмеровских линий без появления заметной эмиссии в непрерывном спектре. Модели с дискретными слоями предложены [3] для объяснения наблюдаемого бальмеровского декремента линий H_{β} — H_{13} . Сделаны расчеты [1] для модели с одним горячим слоем в фотосфере для интерпретации свечения вспышки в бальмеровском континууме.

Чтобы объяснить наблюдаемую эмиссию в далеких крыльях (рис. 1: 0811, 0819 UT; рис. 2: 0822, 0842, 0844, 0846 UT) наиболее подходящими оказались модели с 4 горячими слоями на глубинах $\tau_5 = 0.09, 0.166, 0.30, 0.44$ (τ_5 — оптическая глубина в непрерывном спектре для $\lambda = 500.0$ нм). Температура слоев равна 7600—7800 К, а оптическая толщина $\Delta\tau_5 = 8 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-4}$. Теоретический профиль H_{α} на рис. 2 (0822 UT) рассчитан с лучевыми скоростями (6÷50 км/с) в слоях на глубине $\tau_5 = 0.09$ и 0.166.

Отметим, что модели вспышек, представленные на рис. 3, дают соотношение между величиной эмиссии в линиях L_{α} и H_{α} , близкое к наблюдаемому во вспышках [18] — $E_{L_{\alpha}}/E_{H_{\alpha}}$ лежит в пределах 0.5 ÷ 1.8.

Детальный анализ влияния моделей вспышечной области на профили H_{α} выполнен недавно в [9], из чего следует, что наблюдаемым во вспышке 16.05.1981 профилям в ядре H_{α} наиболее соответствуют модели, рассчитанные при исходных значениях потока ускоренных электронов $F_e \leq 10^2$ Дж·см⁻² с⁻¹. Таким образом, принятое в данной работе значение потока частиц высокой энергии согласуется с [9]. Кроме того, центральное обращение в линиях H_{α} — H_{β} может быть следствием невысокого коронального давления в области ускорения.

Сравним полученные модели вспышки с теоретическими расчетами гидродинамического отклика низкотемпературной части вспышек [4, 13]. Наиболее резкие изменения состояния хромосферной плазмы наступают в первые секунды после начала ускорения. Однако эти моменты практически недоступны спектральным наблюдениям. Поэтому выбраны модели, соответствующие моментам 60—160 с после начала нагрева хромосферы потоками ускоренных электронов. Основные характеристики этих моделей приведены в таблице.

Сравнительные характеристики различных моделей вспышек

Литературный источник	F_e , Дж·см ⁻² с ⁻¹	δ	Продолж. импульса, с	$\tau_{L\alpha}$	T , К	v_r
[13], A	$(2\div 4) \cdot 10^2$	6	2*	4,8	7800	$-8\div 0$
[13], B	$1.2 \cdot 10^3$	6	60	6,9	8500	$-14\div 100$
[13], C	$1.2 \cdot 10^3$	3	60	8,4	8500	$14\div 70$
[4]	10^3	3	5	5,8	8500	$19\div 32$
[4]	10^3	6	5	6,8	8500	~ 10
Данная работа, [2]	~ 10	5	—	3	7500	$-10\div 30$

Примечание. δ — показатель спектра электронов; $\tau_{L\alpha}$ — оптическая толщина L_α на границе переходного слоя ($T=8500$ К); T — температура на уровне, соответствующем $T=6500$ К в модели VAL [17]; v_r — диапазон изменения скорости в области свечения H_α и H_β . Звездочкой отмечена серия импульсов.

Из таблицы видно, что во всех приведенных теоретических моделях вспышки граница переходного слоя расположена гораздо глубже, чем это следует из полуэмпирической модели вспышки 16.05.1981. Ближе к наблюдениям модель A [13] для наименьшего значения потока ускоренных электронов и модель для жесткого спектра электронов [4]. Если предположить более низкое исходное значение потока F_e , то согласие с моделью вспышки 16.05.1981 может быть лучше. Все теоретические модели, кроме A [13], показывают, что спустя 1—2 мин после начала прогрева потоком ускоренных электронов в хромосфере преобладают движения вверх, что согласуется с нашими наблюдениями в начальные моменты вспышки.

Основные результаты и выводы. 1. Для двух узлов вспышки 3В получены профили линий H_α и H_β ряда моментов, включающего все стадии развития вспышки. 2. Рассчитаны модели хромосферной и фотосферной частей вспышки, удовлетворительно интерпретирующие наблюдаемые профили. 3. Плотность в моделях составляет около $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³ в области образования линий H_α и H_β . Интервал изменения температуры хромосферных слоев за время наблюдения вспышки — около 500 К. В максимумах температура превышает на 900—1100 К ее значение в невозмущенной атмосфере Солнца. 4. По характеру асимметрии профилей определены лучевые скорости. Движение вверх со скоростями до 50 км/с наблюдается только в начальные моменты, позже — движение вниз. Смена направления движение происходит в импульсной фазе. 5. Наблюдаемую эмиссию в далеких крыльях ($\Delta\lambda > 0.2$ нм) можно объяснить наличием тонких горячих слоев в верхней фотосфере. Температура слоев 7600—7800 К, а оптическая толщина в непрерывном спектре $\tau_5 = 8 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-4}$. 6. В полученной полуэмпирической температурной модели вспышки граница переходного слоя расположена выше, чем в существующих теоретических моделях.

1. Барановский Э. А. Бальмеровские линии в солнечных вспышках // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1983.—67.— С. 84—89.
2. Барановский Э. А. Модель верхней хромосферы и энергетический баланс в области солнечной вспышки // Там же.— 1984.—69.— С. 100—105.
3. Барановский Э. А., Коваль А. Н. К вопросу о непрерывной эмиссии вспышек // Там же.— 1982.—65.— С. 35—43.
4. Сомов Б. В., Спектор А. Р., Сыроватский С. И. Гидродинамика оптически прозрачной плазмы с распределенным источником нагрева // Тр. Физ. ин-та АН СССР.— 1979.—110.— С. 73—94.
5. Alikeeva K. V., Baranovsky E. A., Polupan P. N. The variations of physical state of the matter in the course of flare development in May, 1981 // Solar Maximum Analysis. Irkutsk Workshop, 1986.— P. 31—32.

6. *Alikaeva K. V., Kondrashova N. N., Polupan P. N., Redyuk T. I.* Photospheric layers of flares for May 14, 15, 1981 in AR 3106+3112 // Publ. Debrecen Observ.—1983.—5.—P. 177—184.
7. *Alikaeva K. V., Kikulin I. F., Polupan P. N.* Variation of H_{α} and H_{β} profiles during May 16, 1981 flare // Publ. Debrecen Observ.—1983.—5.—P. 217—222.
8. *Avrett E. H., Loeser R.* Formation of line and continuous spectra // *Smithson. Astrophys. Observ. Spec. Rep.*—1969.—N 303.—P. 98.
9. *Canfield R. C., Gunkler T. A., Ricchiazzi P. I.* The H_{α} spectral signatures of solar flare nonthermal electrons. Conductive flux and coronal pressure // *Astrophys. J.*—1984.—282, N 1.—P. 297—307.
10. *Farnik F., Kaastra J., Kalman B. et al.* X-ray, H_{α} and radio observations of the two-ribbon flare of May 16, 1981 // *Solar Phys.*—1983.—89, N 2.—P. 355—378.
11. *Ishkov V. N., Markeev A. K., Fomichev V. V. et al.* Peculiarities of the development of flare on May 16, 1981 as observed in optical, X-rays and radio waves // *Publ. Debrecen Observ.*—1983.—5.—P. 193—206.
12. *McConnel D., Kundu M. R.* VLA observations of a solar active region and coronal loops // *Astrophys. J.*—1983.—269, N 2.—P. 698—705.
13. *Nagai F., Emslie G.* Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares. I. // *Ibid.*—1984.—279, N 2.—P. 896—908.
14. *Schoolman S. A., Ganz E. D.* H_{α} flare spectra // *Solar Phys.*—1981.—70, N 2.—P. 363—374.
15. *Svestka Z.* Solar flares.—Dordrecht: Reidel Publ. Co., 1976.—399 p.
16. *Tang F.* Flare asymmetry as seen in offband H_{α} filtergrams // *Solar Phys.*—1983.—83, N 1.—P. 15—25.
17. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—45.—P. 635—725.
18. *Zirin H.* The L_{α}/H_{α} ratio in solar flares quasars and chromosphere // *Astrophys. J.*—1978.—222, N 3.—P. L105—L107.

Глав. астроном. обсерватория АН УССР, Киев
 Крым. астрофиз. обсерватория АН СССР, Научный
 Астроном. обсерватория Киев. ун-та им. Т. Г. Шевченко

Поступила в редакцию
 03.10.85

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 521.96(085)+521.35

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОРИЕНТИРОВКИ РАДИО И ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМ КООРДИНАТ / Дума Д. П., Иващенко Ю. Н.

(Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-86-39Р)

Предлагается способ установления связи между радио и оптической системами координат с помощью наблюдений высокоорбитальных ИСЗ, выполненных оптическими и радиоинтерферометрическими средствами. Вводится новая система комбинаций поправок к элементам орбиты ИСЗ, которая обеспечивает получение непосредственно углов поворота осей одной системы координат по отношению к другой. Выведены формулы для вычисления поправок к первоначально принятым приближенным значениям элементов относительной ориентировки радио и оптической систем координат. На примере модельных расчетов показано, что при точности наблюдений ИСЗ $0.3''$ углы ориентировки можно найти с точностью не хуже $0.1''$.