

УДК 523.985.3

Исследование структуры атмосферы белой вспышки 9 августа 2011 г.

А.Н. Бабин, Э.А. Барановский, А.Н. Коваль

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, 298409
a.babin36@gmail.com

Поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

Аннотация. Получены полуэмпирические модели трех ядер, излучающих в континууме во время предимпульсной и импульсной фазы белой вспышки 9 августа 2011 года. Модели ядер белой вспышки рассчитаны на основании наблюдений яркости континуума в области 6579 Å, профилей линии H_{α} и фотосферных линий железа. Вычисления показали, что для согласования вычисленных и полученных из наблюдений профилей и величины непрерывной эмиссии импульсных ядер белой вспышки необходимо увеличение температуры как в нижней хромосфере, так и в верхней фотосфере. Для предимпульсной фазы вычисления показывают, что наиболее эффективный нагрев расположен в фотосфере глубже, чем в импульсной, а нагрев хромосферы незначительный. Спектральные данные и результаты модельных расчетов указывают на то, что эмиссию исследуемых ядер белой вспышки трудно объяснить нагревом энергией, переносимой из короны в нижележащие глубокие слои атмосферы.

INVESTIGATION OF THE ATMOSPHERIC STRUCTURE FOR THE 2011 AUGUST 9 WHITE-LIGHT FLARE, *by A.N. Babin, E.A. Baranovsky, A.N. Koval.* We derived some semi-empirical atmospheric models for three white-light flare (WLF) kernels at the time of pre-impulsive and impulsive phases of the 2011 August 9 flare. The model calculations are based on the observations of the continuum emission at 6579 Å and profiles of H_{α} and FeI photospheric lines. In order to explain the observational brightness of the continuum and line profiles the semi-empirical models of the impulsive WLF kernels require the temperature increase in the lower chromospheric and upper photospheric layers. For the pre-impulsive kernel of WLF the model results show that the most effective heating should be located in the deeper photospheric layers than for the impulsive kernels, but the chromosphere is not strongly heated. Spectral features and model results indicate that the emission of these WLF kernels are difficult to explain by the canonical heating mechanisms that transport the energy from the corona down to deeper atmospheric layers.

Ключевые слова: Солнце, белые вспышки, модели атмосферы

1 Введение

В последнее время достигнут значительный прогресс в исследовании вспышек. Выяснилось, что излучение вспышек в оптическом континууме (белые вспышки) не является столь редким явлением, как считалось ранее (Метьюс и др., 2003). Исходя из различия в эмиссии, наблюдаемой в разных

вспышках, было установлено, что существует два класса белых вспышек. Первый соответствует наиболее ярким образованиям, для которых наблюдается хорошее соответствие максимума свечения в континууме с максимумами излучения в жестком рентгене и микроволновом радиоизлучении. В спектре часто наблюдается увеличение контраста в сторону коротких длин волн и бальмеровский скачок, бальмеровские линии очень сильные с протяженными крыльями. Второй класс показывает слабую зависимость величины контраста от длины волны, бальмеровский скачок отсутствует или очень слабый, бальмеровские линии слабые и узкие, временная связь с импульсной фазой отсутствует (Мачадо и др., 1986; Фанг и Динг, 1995). Эти различия в спектральных характеристиках могут отражать различия в физических условиях в двух типах белых вспышек. Необходимо детальное исследование спектров белых вспышек, чтобы построить полную модель атмосферных слоев, ответственных за наблюдаемое излучение. Однако до настоящего времени только для нескольких белых вспышек имеются хорошие спектральные данные, особенно для импульсной фазы, необходимые для расчетов моделей вспышки, которые объясняли бы как наблюдаемую интенсивность излучения в континууме, так и интенсивность линий (Мауас и др., 1990; Фанг и Динг, 1995; Динг и др., 1994; Бабин и др., 1998).

Для вспышки 9 августа 2011 г. получены спектральные данные для предимпульсного и импульсных ядер белого свечения, которые по своим временным и спектральным характеристикам принадлежат ко второму и первому типу белых вспышек соответственно. На основании анализа спектральных наблюдений континуума в области 6579 \AA , профилей линии H_α и профилей двух фотосферных линий железа рассчитаны не-ЛТР полуэмпирические модели для одного ядра белой вспышки в предимпульсной фазе и двух ядер в импульсной фазе для разных моментов времени.

2 Характеристики вспышки и наблюдения

Вспышка 9 августа 2011 г. оптического балла 2В, рентгеновского класса X6.9 произошла в активной области NOAA 11263 вблизи NW-лимба, координаты N17W69. Согласно наблюдениям GOES, вспышка началась в 7:48 UT, достигла максимума в 8:05 UT и продолжалась около полутора часов. Это была самая мощная рентгеновская вспышка 24 цикла солнечной активности, она сопровождалась потоком энергичных протонов, также было зарегистрировано излучение в оптическом континууме. Вспышка показала характеристики супергорячей тепловой вспышки, это была самая горячая вспышка за период с 2000 по 2012 гг.: температура в максимуме достигала значений свыше 30 МК (Шарыкин и др., 2014; Кашапова и др., 2015).

Спектральные и H_α монохроматические фотографические наблюдения этой вспышки в период 7:53–8:39 UT получены на 53-см коронографе (КГ-2) Крымской астрофизической обсерватории, диаметр изображения Солнца на щели спектрографа 180 мм. Наблюдался спектральный участок $6549\text{--}6579 \text{ \AA}$ с дисперсией $0.58 \text{ \AA}/\text{мм}$, экспозиция 0.15 с, промежуток между экспозициями от 5 до 30 с. Были получены спектры наиболее ярких узлов вспышки. Одновременно со спектрами регистрировалось изображение Солнца на щели спектрографа через H_α -фильтр. Структура белой вспышки была сложной. Спектральные наблюдения показывают 5 ядер вспышки, которые излучали в оптическом континууме. Они располагались как в области полутени δ -пятна, так и в области “невозмущенной” фотосферы. Морфологические, эволюционные, спектральные характеристики и энергетика ядер белого свечения этой вспышки представлены в (Бабин, Коваль, 2014). Спектры двух импульсных ядер белого свечения и соответствующие изображения вспышки на щели спектрографа через H_α -фильтр, центрированный на линию H_α (и имеющий вторичные максимумы на $\pm 4 \text{ \AA}$), для двух моментов импульсной фазы представлены на рис. 1. Исследуемые ядра непрерывного излучения отмечены цифрами. Для представления эволюционных процессов во вспышке на рис. 2 приведены кривые развития этих ядер в линии H_α и временные изменения HXR-эмиссии в области 25–50 кэВ и 100–300 кэВ по наблюдениям RHESSI. Спектры исследуемых ядер непрерывного излучения получены примерно во время максимумов разных HXR-всплесков (см. таблицу).

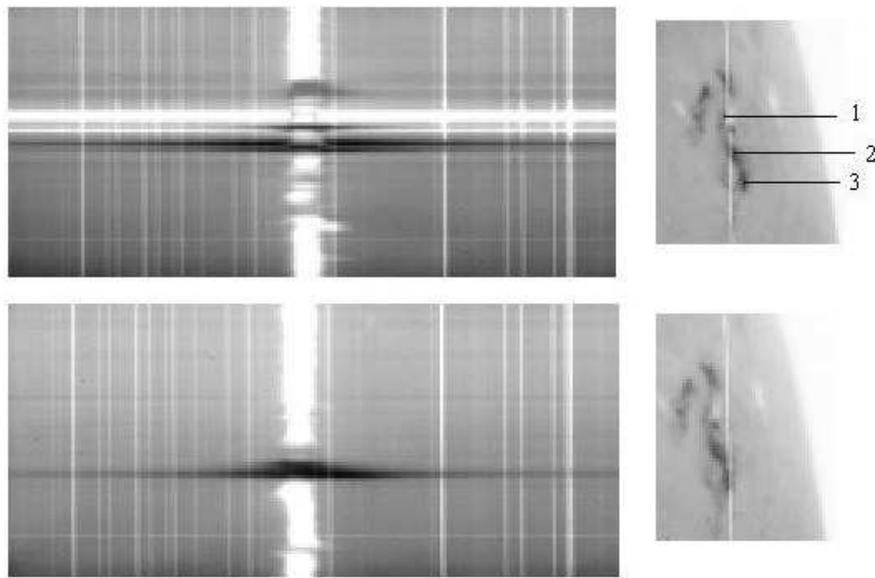


Рис. 1. Спектрограммы вспышечных узлов во время импульсной фазы вспышки и соответствующие снимки на щели спектрографа, вверху – 8:02:21 UT, внизу – 8:02:36 UT; 1, 2, 3 – исследуемые ядра непрерывного излучения (негативы)

Таблица 1.

Узел №	Время UT	$\Delta I/I_H$, % наблюд.	$\Delta I/I_H$, % вычисл.	C_{6579} %	C_{4100} %
1	7:56:48	5	2	4.5	4
2	8:02:10	27	14	26	26
2	8:02:21	20	13	20	16
3	8:02:36	14	9	14	13
2	8:04:26	10	8	11	9

3 Вычисление моделей атмосферы ядер белой вспышки

При расчетах полуэмпирических моделей белых вспышек в основном использовалась только наблюдаемая величина непрерывного излучения без сравнения с наблюдаемыми профилями линий. Только для нескольких белых вспышек при расчетах использовался как непрерывный, так и линейчатый спектр (Мауас и др., 1990; Динг и др., 1994; Бабин и др., 1998). Рассчитанные в нашей работе модели атмосферы ядер белой вспышки являются полуэмпирическими. Рассматривались одновременные наблюдения непрерывной эмиссии в области 6579 \AA , профили линии H_α и фотосферных линий железа 6574.2 \AA и 6575.0 \AA . Расчеты выполнены без каких-либо предположений о возможных механизмах нагрева. Модели характеризуются величинами температуры, плотности, турбулентной и лучевой скорости. Эти параметры, как функции глубины, определялись путем подбора таким образом, чтобы профили линий и величина непрерывного излучения, вычисленные по моделям, наилучшим образом соответствовали наблюдениям.

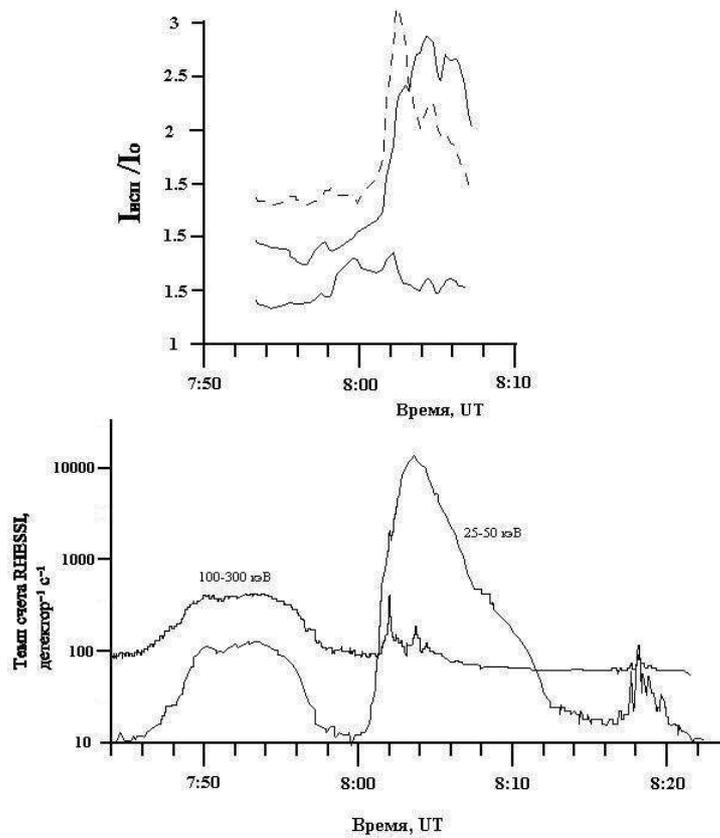


Рис. 2. Кривые развития исследованных ядер 1, 2, 3 (снизу вверх) в линии H_{α} и временные изменения HXR-эмиссии в области 25–50 кэВ и 100–300 кэВ по данным RHESSI

В настоящее время нет единого мнения относительно высоты расположения источника непрерывного излучения в солнечной атмосфере. Поэтому на первом этапе вычислений рассчитывалась чисто хромосферная модель с использованием невозмущенной фотосферы. Расчет моделей хромосферы ядер белой вспышки сделан на основании наблюдаемых профилей линии H_{α} . Соответствие вычисленных и наблюдаемых профилей линии H_{α} для двух ядер показано на рис. 3 и рис. 4. Однако при хорошем согласии вычисленных и наблюдаемых профилей линии H_{α} , рассчитанные интенсивности непрерывного излучения в данном случае были ниже наблюдаемых (они представлены в таблице, 4 и 3 столбцы). Попытки увеличить величину непрерывной эмиссии с помощью изменения моделей хромосферы приводили к тому, что нарушалось согласие вычисленных и наблюдаемых профилей линии H_{α} : вычисленный профиль получался более интенсивным, чем наблюдаемый.

Далее были выполнены расчеты в предположении изменения структуры фотосферных слоев, так как на это указывает ряд наблюдательных данных (Мачадо и Раст, 1974; Бабин и Коваль, 1993; Хиэй, 1982). Расчеты показали, что увеличение температуры на 200–500 К в отдельных слоях фотосферы дает заметное увеличение непрерывного излучения. Изменяя величину нагрева фотосферного слоя, можно согласовать вычисленную интенсивность континуума с наблюдаемой в области 6579 Å.

Чтобы исключить неоднозначность выбора модели фотосферы, было проведено сравнение вычисленных и наблюдаемых профилей нескольких фотосферных линий, расположенных в далеком крыле линии H_{α} . Вычисленные глубины линий железа 6574.2 Å и 6575.0 Å зависят от модели фотосферы – от глубины залегания горячего слоя. Наблюдаемые глубины этих линий в спектрах ядер

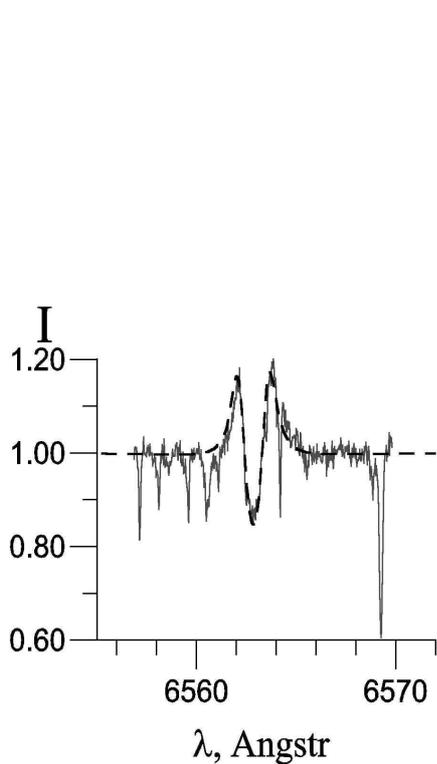


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых и вычисленных (штрихи) профилей линии H_{α} для ядра непрерывного излучения 1 в предимпульсной фазе

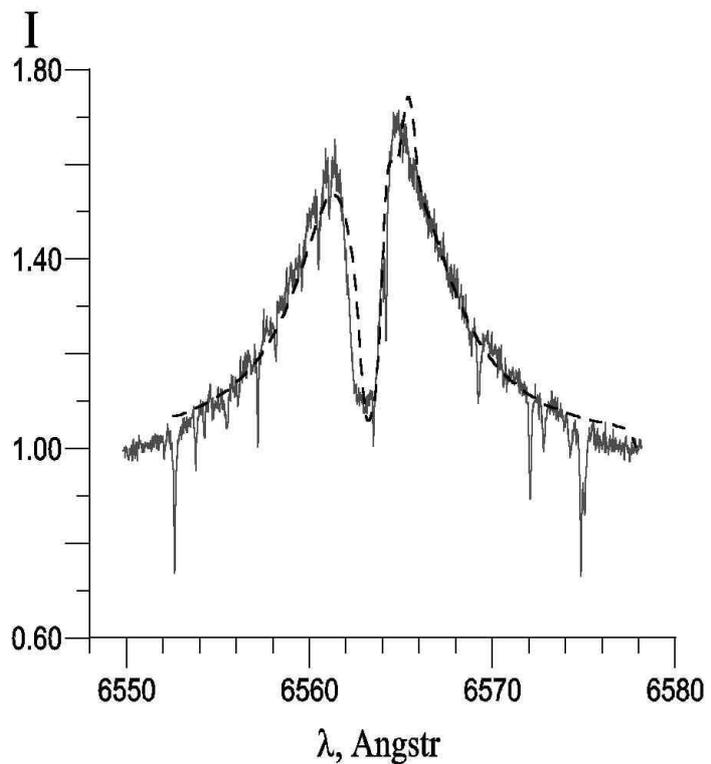


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для ядра 2 во время импульсной фазы 8:02:10 UT

непрерывного излучения в импульсной фазе меньше глубин невозмущенных профилей и несколько отличаются для разных моментов. Добиваясь согласия вычисленных и наблюдаемых профилей линий железа путем изменения глубины залегания горячего слоя в фотосфере, мы уточняем модель фотосферы. Изменяя при этом степень нагрева слоя, мы получаем согласие вычисленной и наблюдаемой величины непрерывной эмиссии в области 6579 \AA . Примеры согласования вычисленных и наблюдаемых профилей фотосферных линий показаны на рис. 5 и рис. 6. Вычисленные таким образом значения S -контраста непрерывного излучения в области 6579 \AA приведены в таблице (5-й столбец).

Непрерывная эмиссия наиболее ярких ядер белых вспышек в основном описывается как бело-голубая, то есть контраст непрерывного излучения увеличивается в область коротких длин волн (Нейдиг, 1983; Нейдиг, 1989; Барановский и Коваль, 1982; Бабин и др., 1998). Однако в некоторых случаях ход контраста непрерывного излучения с длиной волны довольно плоский (Бойер и др., 1985). Выполненные нами расчеты показали, что интенсивность непрерывного излучения в области коротких длин волн зависит от глубины залегания горячего слоя в фотосфере. Чем глубже расположен горячий слой, тем интенсивнее излучение в области 4100 \AA при фиксированной интенсивности в области 6579 \AA . Так, для ядра непрерывного излучения вспышки в 8:02:10 UT при расчетной величине эмиссии в области 6579 \AA 27 %, соответствующей наблюдаемой, эмиссия в области 4100 \AA может быть в пределах от 28 % до 49 % в зависимости от глубины залегания горячего слоя в фотосфере. Вычисленные величины S -контраста непрерывного излучения в области 4100 \AA для рассчитанных моделей белой вспышки 9 августа представлены в таблице (6-й столбец).

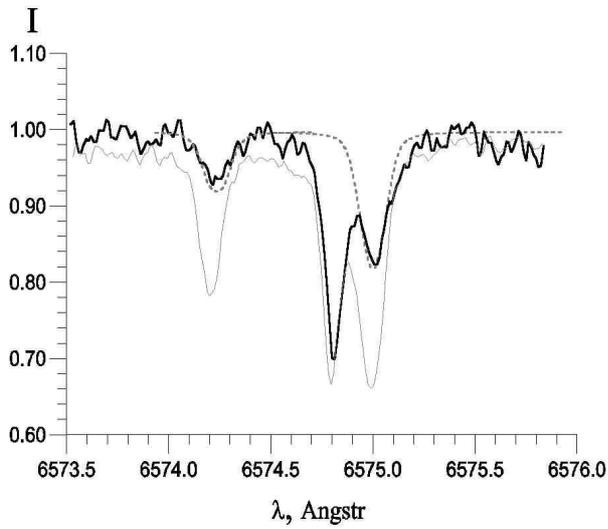


Рис. 5. Сравнение наблюдаемых и вычисленных профилей линий железа 6574.2 Å и 6575.0 Å для ядра 2 в 8:02:10 UT. Сплошные линии – наблюдения (вспышка и невозмущенная фотосфера), пунктир – вычисления

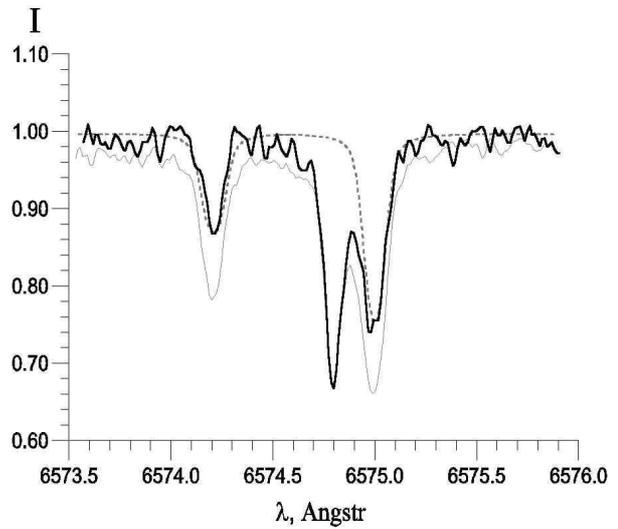


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для момента 8:02:36 UT

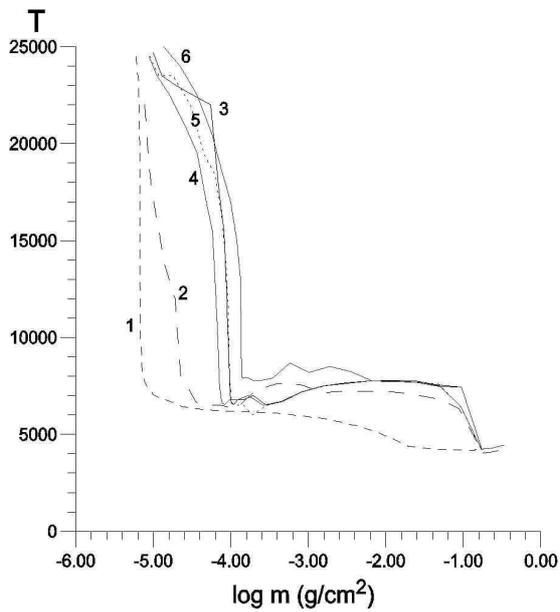


Рис. 7. Вычисленные модели хромосферы ядер вспышки, излучающих в континууме. Ход температуры с глубиной: 1 – невозмущенная хромосфера, 2 – предимпульсная фаза (эмиссия на полутени пятна), 3, 4, 5, 6 – импульсная фаза

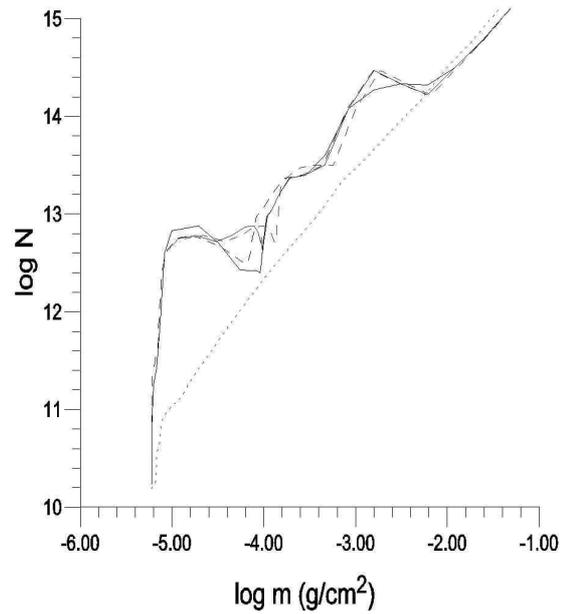


Рис. 8. Плотность хромосферных слоев вспышки. Пунктир – невозмущенная хромосфера

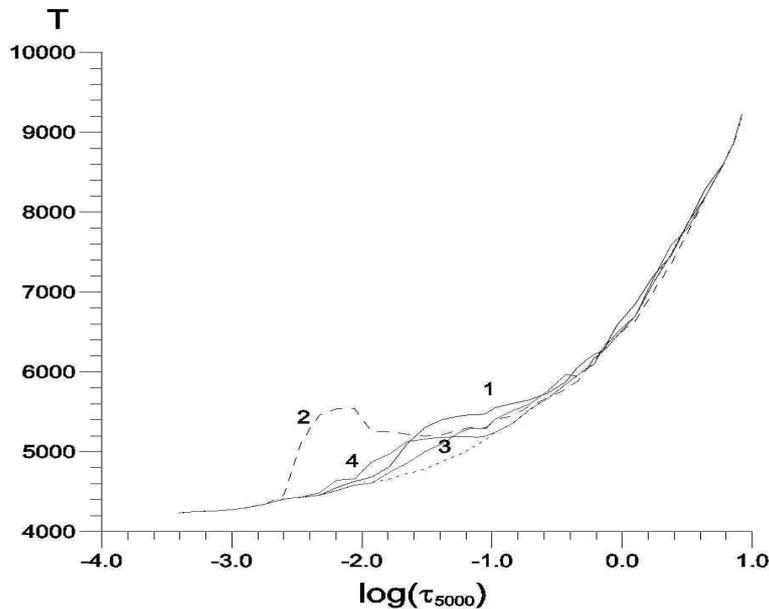


Рис. 9. Температура фотосферных слоев вспышки. Пунктир – невозмущенная фотосфера, 1, 2, 3, 4 – моменты импульсной фазы

4 Модели: результаты вычислений

На рис. 7 и рис. 8 представлены рассчитанные модели хромосферы ядер белой вспышки и для сравнения приведена модель невозмущенной хромосферы. Мы видим, что во время импульсной фазы вспышки прогреваются более глубокие и более плотные области хромосферы. Значительное увеличение температуры (на 1000–1800 К) происходит в нижней хромосфере и в области температурного минимума. Прогрев этой области вызывает появление широких эмиссионных крыльев в линии H_{α} и эмиссию в непрерывном спектре. Ход плотности с глубиной (рис. 8) немонотонный: образуются как бы отдельные конденсации с увеличением плотности на 1–1.5 порядка по сравнению с невозмущенной хромосферой. Рассчитанные лучевые скорости неоднородны по глубине и максимальны в области температур 8000–10000 К, достигая значений 60–70 км/сек. Различия моделей для разных моментов импульсной фазы невелики, что соответствует небольшому различию наблюдаемых профилей H_{α} . Можно только отметить более глубокий прогрев хромосферы для момента 8:04:26 UT. В предимпульсной фазе (7:56:48 UT) хромосфера нагрета значительно меньше.

Ход температуры в фотосферных слоях вспышки приведен на рис. 9. Глубина залегания горячего слоя в фотосфере рассчитывалась исходя из наблюдаемых профилей линий железа 6574.2 Å и 6575.0 Å, которые показывают значительное уменьшение глубины в спектре импульсных ядер непрерывного излучения. Для объяснения наблюдаемых профилей этих линий в импульсной фазе необходимо поместить горячий слой в фотосфере достаточно высоко. Рассчитанные по этим моделям интенсивности непрерывной эмиссии в области 4100 Å примерно равны интенсивностям в области 6579 Å, то есть ход контраста с длиной волны для данной вспышки довольно плоский. Так как соотношение интенсивностей непрерывной эмиссии в области длин волн 6579 Å и 4100 Å в основном определяется глубиной залегания горячего слоя в фотосфере, то его высокое расположение в фотосфере и определяет сравнительно малую величину интенсивности эмиссии в коротковолновой области спектра.

В предимпульсной фазе профили линий железа практически не отличаются от профилей вне вспышки. Из этого следует, что горячий слой в фотосфере в предимпульсной фазе находится глубже, чем в импульсной. Модели фотосферы для первых двух моментов импульсной фазы также

указывают на перемещение горячего слоя вверх. После этого нагрев фотосферы начинает уменьшаться. Таким образом, можно сделать заключение, что изменения в фотосфере во время вспышки начинаются с глубоких слоев и перемещаются вверх. Температура хромосферы возрастает при переходе от предимпульсной фазы к импульсной, а затем меняется очень мало.

5 Выводы

Рассчитаны не-ЛТР полуэмпирические модели для двух ядер, излучающих континуум в импульсной фазе вспышки 9 августа 2011 г., и одного ядра в предимпульсной фазе. При расчетах использовались наблюдаемые значения величины контраста непрерывной эмиссии в области 6579 \AA , профили линии H_{α} и фотосферных линий железа. Импульсные ядра по своим спектральным характеристикам относятся к первому типу белых вспышек, ядро в предимпульсной фазе – ко второму типу. Показано, что наблюдаемые особенности профилей H_{α} и интенсивности непрерывной эмиссии невозможно объяснить в предположении, что эмиссия образуется только в хромосфере. Модели хромосферы, дающие хорошее согласие профилей линии H_{α} , дают слишком малую непрерывную эмиссию. Для согласования вычисленных и наблюдаемых профилей и величин непрерывной эмиссии необходимо увеличить температуру как в хромосфере, так и в фотосфере. Вычисленные модели ядер белой вспышки в предимпульсной (тип II) и импульсной (тип I) фазах заметно различаются. В предимпульсной фазе хромосфера нагрета существенно меньше, а горячий слой в фотосфере находится глубже, чем в импульсной. В первые моменты импульсной фазы есть указания на перемещение горячего слоя фотосферы вверх.

Нагрев глубоких слоев вспышечной атмосферы трудно объяснить механизмами нагрева, которые переносят энергию из короны. Рядом авторов были высказаны предположения, что энергия может реализоваться также в нижней атмосфере и что могут действовать независимо два различных механизма, нагревающих атмосферу белой вспышки. Хромосфера нагревается одним из канонических механизмов – энергией, реализуемой в короне. Фотосфера же может быть нагрета энергией, возникающей в более глубоких слоях атмосферы. Это может быть джоулева диссипация электрических токов в областях с сильными и сложными магнитными полями (Мауас и др., 1990; Динг и др., 1994; Фанг и Динг, 1995; Динг и др., 1999; Флетчер и Хадсон, 2008).

С другой стороны, благодаря новым данным, полученным одновременно на нескольких космических аппаратах, и наземным наблюдениям, впервые определена высота источника излучения оптического континуума и связанного с ним источника НХР. Обнаружена их практически одинаковая высота над фотосферой ($\tau = 1$ для 5000 \AA), она оказалась неожиданно низкой и составила $305 \pm 170 \text{ км}$ и $195 \pm 70 \text{ км}$ для источника НХР и оснований белой вспышки соответственно (Оливерос и др., 2012).

Литература

- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1993. Т. 88. С. 60.
 Бабин, Коваль (Babin A.N., Koval A.N.) // Bull. Crim. Astrophys. Observ. 2014. V. 110. P. 100.
 Бабин А.Н., Барановский Э.А., Коваль А.Н., Калман Б., Герлеи О. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1998. Т. 14. С. 330.
 Барановский Э.А., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 35.
 Бойер и др. (Boyer R., Machado M.E., Rust D.M., and Sotirovski P.) // Solar Phys. 1985. V. 98. P. 255.
 Динг и др. (Ding M.D., Fang C., Gan W.Q., and Okamoto) // Astrophys. J. 1994. V. 429. P. 890.
 Динг и др. (Ding M.D., Fang C., Yun H.S.) // Astrophys. J. 1999. V. 512. P. 454.
 Кашапова Л.К., Мешалкина Н.С., Бабин А.Н. и др. // Труды 18 всероссийской ежегодной конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. 2015. С. 211.
 Мауас и др. (Mauas P.J., Machado M.E., and Avrett E.H.) // Astrophys. J. 1990. V. 360. P. 715.
 Мачадо и др. (Machado M.E., Avrett E.H., Falciani R., et al.) // The Lower Atmosphere of Solar Flares / Ed. Neidig D.F. 1986. NSO. Sunspot. NM. P. 483.

- Мачадо и Раст (Machado M.E. and Rust D.M.) // Solar Phys. 1974. V. 38. P. 499.
- Метьюс и др. (Matthews S.A., Van Driel-Gestelyi L., Hudson Y.S., Nitta N.W.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 409. P. 1107.
- Нейдиг (Neidig D.F.) // Solar Phys. 1983. V. 85. P. 285.
- Нейдиг (Neidig D.F.) // Solar Phys. 1989. V. 121. P. 261.
- Оливерос и др. (Oliveros J-C. M., Hurford G.J., et al.) // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 753. PL26.
- Фанг и Динг (Fang C. and Ding M.D.) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1995. V. 110. P. 99.
- Флетчер и Хадсон (Fletcher L. and Hudson H.S.) // Astrophys. J. 2008. V. 675. P. 1645.
- Хиэй (Hiei E.) // Solar Phys. 1982. V. 80. P. 113.
- Шарыкин И.Н., Струминский А.Б., Зимовец И.В. // Сборник тезисов докладов на 18 всероссийской ежегодной конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. 2014. С. 110.