

УДК 523.985+523.37

Эволюционные характеристики профиля линии H_{α} в одном из узлов вспышки 2В/Х6.9 и полуэмпирические модели вспышечной хромосферы

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

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
a.babin36@gmail.com

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Анализируется эволюция H_{α} -профилей одного вспышечного узла в течение белой вспышки 9 августа 2011 г. балла 2В/Х6.9. В начале импульсной фазы на стадии быстрого роста яркости появляется эмиссионный H_{α} -профиль с протяженными крыльями, сильной красной асимметрией и центральным обращением, которое исчезает во время максимума потока мягкого рентгеновского излучения. Спектры также показывают наличие сильных, направленных вниз движений в начале импульсной фазы, которые уменьшаются со временем. Эмиссионные крылья H_{α} -профилей расширены эффектом Штарка. Наблюдается временная корреляция между кривой развития H_{α} -излучения и временным профилем потока микроволнового излучения. Эти результаты, согласно модели (Кэнфилд и др., 1984), могут указывать на то, что H_{α} -эмиссия в этом узле является следствием нагрева вспышечной хромосферы потоком нетепловых электронов с последующим усилением давления в короне.

Для трех моментов рассчитаны полуэмпирические модели вспышечной хромосферы исследуемого узла на основании наблюдаемых профилей линии H_{α} с учетом того, что непрерывное излучение у этого узла отсутствует. Получено, что для объяснения наблюдаемых особенностей необходимо предположение о наличии в структуре вспышки субтелескопических элементов с большой интенсивностью линии H_{α} (до 8–15 единиц непрерывного спектра). Яркие детали вспышки занимают 8–12 % общей площади, а остальная часть имеет небольшую яркость. Усредненная картина такой структуры дает профиль линии H_{α} с протяженными крыльями и близкое к нулю (менее 1 %) непрерывное излучение. Асимметрия и смещение профилей линии H_{α} объясняется наличием лучевых скоростей. В отличие от моделей узлов с непрерывной эмиссией, рассчитанные модели вспышки имеют ту особенность, что здесь нет глубокого (до температурного минимума) прогрева хромосферы, а в верхней хромосфере имеется область большой плотности ($\log N_h = 14–15$) толщиной 40–60 км.

EVOLUTIONARY CHARACTERISTICS OF H_{α} LINE PROFILES IN A KERNEL OF THE 2В/Х6.9 FLARE AND SEMI-EMPIRICAL MODELS OF THE FLARE CHROMOSPHERE, *by A.N. Babin, E.A. Baranovsky, A.N. Koval.* The time evolution of the H_{α} line in a flare kernel during the 2011 August 9 white-light flare of importance 2В/Х6.9 was investigated. At the rising stage of the impulsive phase the H_{α} emission line with a central reversal, extended emission wings and strong red asymmetry arises but changes to a single-peaked profile at the time of soft X-ray maximum. There is an evidence for Stark broadening of the H_{α} emission wings. The temporal correlation between H_{α} light curve and time profile of microwave emission flux is found. These results, according to Canfield et al`

Эволюционные характеристики профиля линии H_{α} ...

(1984) model, indicate that the H_{α} profiles from this kernel are a consequence of the flare chromosphere heating by the nonthermal electrons and the coronal pressure grows subsequently with the time. The spectra also show the strong downward motion at the start of the impulsive phase which is noticeably reduced in the future.

The semi-empirical models of the flare chromosphere in a knot are calculated for three moments on the basis of the observed profiles of H_{α} line and with regard to the absence of continuous emission. It was obtained that for explanation of the observed details it is necessary to suppose that the flare has a subtelescopic structure with small bright elements that have intensity of H_{α} 8–15 units of continuum and occupy 8–12 % of knot area, but the rest of the flare has low intensity. The averaged profile of such structure has broad wings and the continuous intensity is about 1 %. Asymmetry and displacement of H_{α} profiles are explained by the presence of radial velocities. The atmospheric structure of the investigated flare knot differ from the ones of kernels with continuum emission: there is no deep heating of the chromosphere (including temperature minimum region), but there is a region of high density ($\log N_H = 14-15$) with thickness of 40–60 km in the upper chromosphere.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, модели атмосферы

1 Введение

Мы продолжаем анализ спектральных и монохроматических наблюдений белой вспышки 9 августа 2011 г. балла 2В/Х 6.9 — самой мощной вспышки 24-го цикла солнечной активности. В предыдущих работах была исследована морфология, эволюция, спектральные особенности и энергетика излучения данной вспышки в оптическом континууме (Бабин и Коваль, 2014) и рассчитаны полуэмпирические модели атмосферы вспышечных узлов белого свечения (Бабин и др., 2016).

Во многих отношениях спектры белых вспышек первого типа (Фанг и Динг, 1999) фундаментально не отличаются от спектров узлов мощных вспышек, не излучающих в континууме (Нейдиг, 1989). Однако чтобы произвести излучение в континууме, нужны специальные условия во вспышечной атмосфере. Построение не-ЛТР полуэмпирических моделей атмосферы разных вспышечных узлов позволит установить различия в физических условиях в их атмосфере.

В настоящей работе мы исследуем яркий узел этой же вспышки, не излучающий в континууме. Критериями выбора вспышечного узла были: 1) хорошее качество изображений, 2) возможность проследить временную эволюцию определенного места вспышечного узла в основной период развития вспышки, 3) яркая H_{α} -эмиссия с протяженными крыльями, но нет излучения в континууме.

2 Результаты наблюдений

Вспышка балла 2В/Х6.9 произошла 9 августа 2011 г. в активной области NOAA 11263, координаты N17 W69. Согласно наблюдениям GOES, вспышка началась в 7:48 UT и достигла максимума в 8:05 UT. Наблюдения спектров вспышки в области 6549–6579 Å получены на 53-см коронографе Крымской астрофизической обсерватории с временным разрешением 5–30 сек в интервале времени 7:53:26–8:39 UT. Одновременно со спектрами регистрировалось изображение вспышки на щели спектрографа через H_{α} -фильтр.

На рис. 1 приведены изображения вспышки на щели спектрографа и спектр вспышки вблизи максимума развития. Из рис. 1 видно, что щель спектрографа пересекала три ярких узла вспышки, два из которых излучали в континууме, а один нет. Для исследования в данной рабо-

те был выбран узел А, расположенный в полутени δ -пятна между ядрами противоположной полярности.

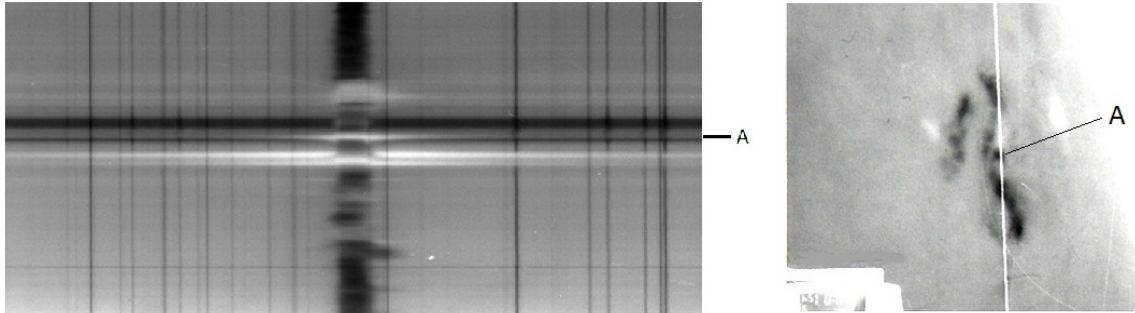


Рис. 1. Спектрограмма вспышки в области H_{α} в 8:02:21 UT (позитив) и соответствующее изображение на щели спектрографа (негатив), А – исследуемый узел вспышки

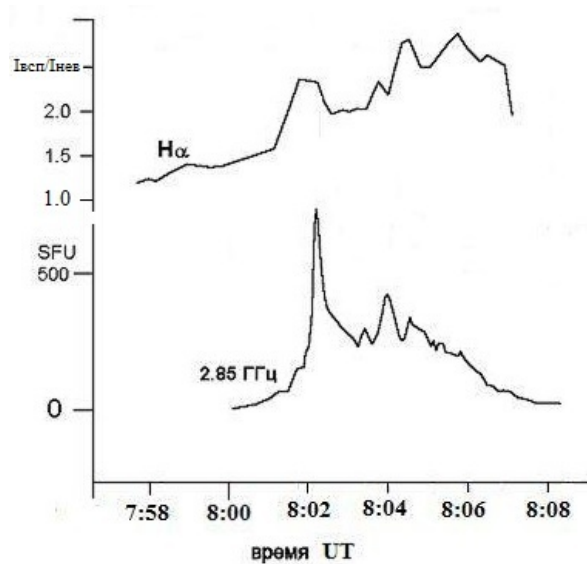


Рис. 2. Изменения яркости узла А в линии H_{α} и микроволновое радиоизлучение на 2.85 ГГц

На рис. 2 приведена кривая развития этого узла в линии H_{α} и для сравнения поток микроволнового радиоизлучения на частоте 2.85 ГГц по данным Кацивели (КрАО). В микроволновом излучении вспышка имела четко выраженный постепенный и импульсный компоненты. Постепенное усиление яркости узла в H_{α} началось до и продолжалось во время слабого усиления потока микроволнового излучения до появления основного импульсного всплеска. Таким образом, постепенный нагрев хромосферы происходил до основного выделения энергии во время импульсной фазы. Во время импульсной фазы яркость узла испытывала вариации как и микроволновое излучение.

На рис. 3 приведены H_{α} -профили в узле для четырех моментов времени t_1 (8:01:31 UT), t_2 (8:02:11 UT), t_3 (8:02:20 UT), t_4 (8:04:36 UT), которые представляют различные фазы вспышки. По рис. 3 можно проследить эволюцию H_{α} -профиля во вспышечном узле А. В самом начале импульсной фазы (начало быстрого роста яркости, t_1) мы наблюдаем профиль с центральным обращением, протяженными крыльями (до 10 \AA) и сильной красной асимметрией, проявляющейся в усилении яркости красного крыла, и небольшим сдвигом всего профиля в красную

Эволюционные характеристики профиля линии H_α ...

сторону спектра. Сдвиг профиля соответствует опусканию излучающего объема в целом со скоростью около 15 км/сек. Усиление яркости красного крыла вызвано наложением излучения вещества, движущегося с лучевой скоростью около 150 км/сек. Во время максимума импульсного всплеска (t_2, t_3) глубина центрального обращения уменьшилась, яркость центральной части профиля увеличилась, красная асимметрия значительно уменьшилась. В момент t_4 , который соответствует максимуму потока мягкого рентгеновского излучения, наблюдается профиль H_α без самообращения.

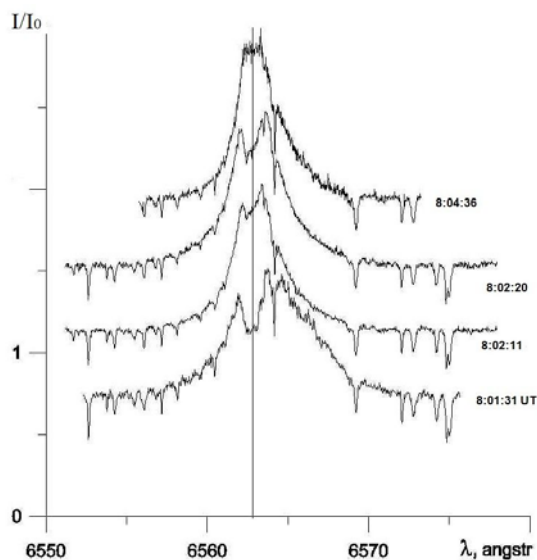


Рис. 3. Профили линии H_α в узле А в разные моменты вспышки. I_0 – невозмущенный континуум, локальный континуум $\sim 0.75 I_0$ (узел А в полутени пятна). Контурсы разнесены по вертикали на $\sim 0.4I_0$

Как показали теоретические расчеты (Кэнфилд и др., 1984), форма H_α -профилей очень чувствительна к физическим условиям и механизмам нагрева хромосферы. Только при нагреве хромосферы мощным потоком нетепловых электронов с энергиями выше 20 Кэв и низком корональном давлении образуется H_α -профиль с протяженными штарковскими крыльями и самообращенным ядром. И только при высоком давлении в короне (≥ 100 дин/см²) образуются сильные необращенные эмиссионные профили. Отсутствие обращения не исключает наличия нетепловых электронов, но указывает на высокое давление в короне.

Если интерпретировать наблюдаемую форму профилей H_α в рамках этой модели, то форма профилей в моменты t_1-t_4 указывает на нагрев хромосферы потоком нетепловых электронов и увеличение коронального давления со временем, что проявляется в более узком и необращенном профиле линии H_α в момент t_4 .

Мы также исследовали ход интенсивности в крыльях линии H_α на теоретически предсказанное (Кэнфилд и др., 1984) штарковское расширение. На рис. 4 представлены наблюдаемые разностные профили H_α в логарифмических осях: $\lg \Delta I_\lambda$ как функции $\lg \Delta \lambda$, где $\Delta I_\lambda = I_{\text{набл}} - I_{\text{нев}}$. Видно, что профили на расстоянии $\Delta \lambda > 2.5 \text{ \AA}$ могут быть представлены прямой линией с наклоном, близким к -2.5 , что указывает на расширение профилей эффектом Штарка. Протяженные H_α -крылья наблюдались в данном узле на протяжении импульсной фазы. Но импульсной фазе предшествовала фаза начального постепенного увеличения яркости H_α и мягкого рентгеновского излучения (см. рис. 2).

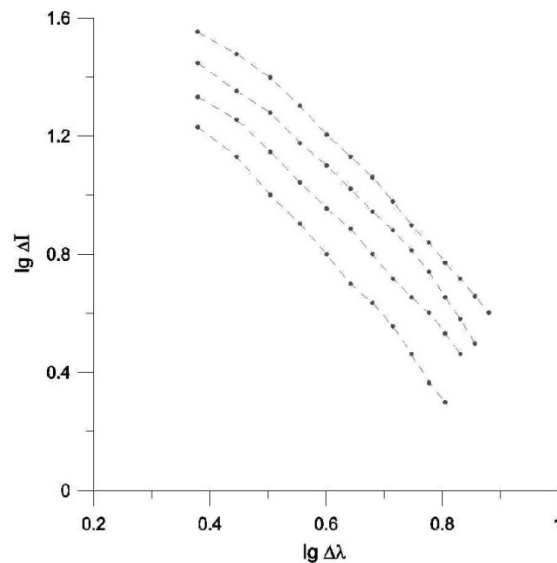


Рис. 4. Ход эмиссии ΔI в синем крыле профилей линии H_α в логарифмических осях в моменты t_1, t_3, t_2, t_4 (сверху вниз)

Сравнение наблюдаемых особенностей H_α -профилей в данном узле с профилями H_α в соседних узлах этой вспышки, излучающих в континууме (Бабин и Коваль, 2014), показало: 1) центральное самообращение контуров H_α выражено слабо по сравнению с контурами в ядрах белого свечения, 2) протяженность крыльев и полуширины меньше, 3) ход интенсивности в ядрах белого свечения в крыльях H_α -профилей не соответствует штарковскому, контуры расширены нетепловыми движениями со скоростями 150–300 км/сек. Такие различия профилей указывают на различия в физических условиях в атмосфере данных вспышечных узлов.

Чтобы исследовать структуру вспышечной атмосферы и ее изменение в течение вспышечного процесса, были рассчитаны не-ЛТР полуэмпирические модели вспышечной хромосферы исследуемого узла.

3 Вычисление моделей

Для расчета моделей были использованы наблюдаемые профили линии H_α . Линия H_α широко используется для построения моделей атмосферы вспышек, т. к. она образуется в широком диапазоне высот в солнечной атмосфере — от верхней хромосферы для центральной части профиля до верхней фотосферы в крыльях (Мачадо и др., 1980; Ган и Фанг, 1987). Модели задаются ходом с глубиной температуры, плотности, турбулентной и лучевой скорости. Вычисленные модели являются полуэмпирическими. Основным критерием при выборе таких моделей является согласие вычисленных и наблюдаемых профилей и величины непрерывного излучения. Вычисления выполнялись по не-ЛТР программе. Одновременное согласование профилей линии H_α и величины непрерывного излучения представляет определенные трудности. Интенсивность крыльев линии H_α и интенсивность непрерывного излучения в одинаковой мере зависят от условий в нижней хромосфере.

В исследуемом узле вспышки профили H_α интенсивные и с протяженными крыльями, но непрерывная эмиссия отсутствует. В процессе расчета моделей выяснилось, что нельзя получить наблюдаемые профили с помощью однокомпонентной модели хромосферы. Подбором моделей мы можем получить согласие вычисленных и наблюдаемых профилей линии H_α , но при этом

Эволюционные характеристики профиля линии H_{α} ...

величина непрерывной эмиссии оказывается порядка нескольких процентов, что противоречит наблюдениям.

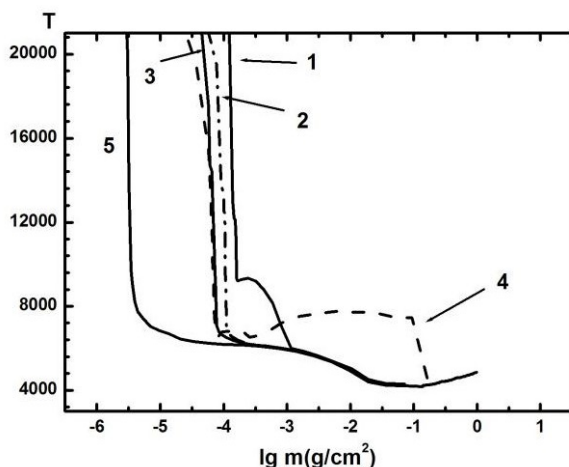


Рис. 5. Ход температуры с глубиной в моделях хромосферных элементов, которые дают профили H_{α} с большой интенсивностью для моментов t_1, t_3, t_4 (кривые 1, 2, 3). Кривая 4 – модель ядра этой же вспышки, излучающего в континууме (Бабин и др., 2016); 5 – невозмущенная хромосфера (Вернацца и др., 1981)

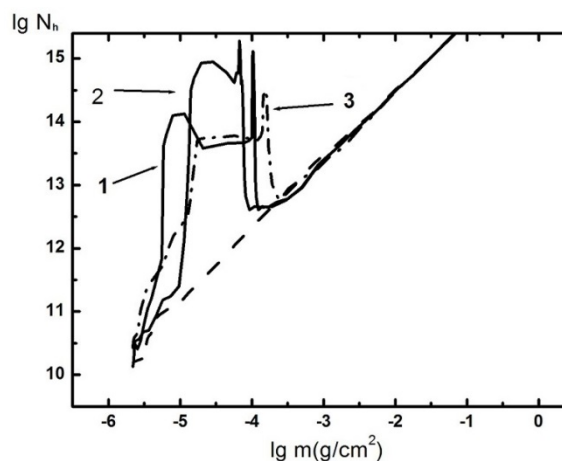


Рис. 6. Ход плотности с глубиной в моделях 1, 2, 3 из рис. 5. Штрихи – невозмущенная хромосфера

Профиль H_{α} с протяженными крыльями без непрерывной эмиссии мы получили с помощью двух или трехкомпонентной модели хромосферы. Предполагается, что вспышка имеет тонкую субтелескопическую структуру и что наблюдаемые H_{α} -профили являются результатом комбинации излучения ярких высоковозбужденных деталей вспышечного узла и менее возбужденных областей, в которых интенсивность H_{α} незначительна. Для согласования вычисленных и наблюдаемых профилей необходимо, чтобы в ярких деталях интенсивность линии H_{α} достигала 8–15 единиц непрерывного спектра. Такие яркие детали занимают около 10 % площади вспышечного узла. Большая интенсивность линии H_{α} получается при большой плотности хромосферы. В таких моделях хромосфера не прогревается до глубоких слоев, и величина непрерывной эмиссии оказывается малой. После усреднения профилей непрерывная эмиссия не превосходит одного процента.

На рис. 5 и рис. 6 показан ход температуры и плотности в моделях вспышечной хромосферы элементов, которые дают профиль H_{α} с большой интенсивностью. Для сравнения приведен также ход температуры в другом узле этой же вспышки, в котором наблюдалась непрерывная эмиссия около 14 % (Бабин и др., 2016). В модели 1 на рис. 5 наблюдается прогрев глубоких слоев хромосферы, но глубина прогрева значительно меньше, чем в модели 4, дающей непрерывную эмиссию. Лучевая скорость в модели 1 около 140 км/сек. Модель 1 на рис. 5 входит в расчеты профиля H_{α} только для первого момента наблюдений (t_1), когда профиль наиболее широкий и асимметричный. В моделях 2 и 3 глубокий прогрев хромосферы отсутствует. Лучевые скорости 65 км/сек и 35 км/сек соответственно. Во всех моделях плотность верхней хромосферы высокая ($N_h = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и есть два пика плотности (рис. 6). Толщина области с высокой плотностью составляет 40–60 км. На рисунках 7, 8, 9 приведено сравнение вычисленных и наблюдаемых профилей линии H_{α} для трех последовательных моментов развития вспышечного узла (поскольку профили для t_2 и t_3 мало различаются, профиль для t_2 отдельно не рассматривался).

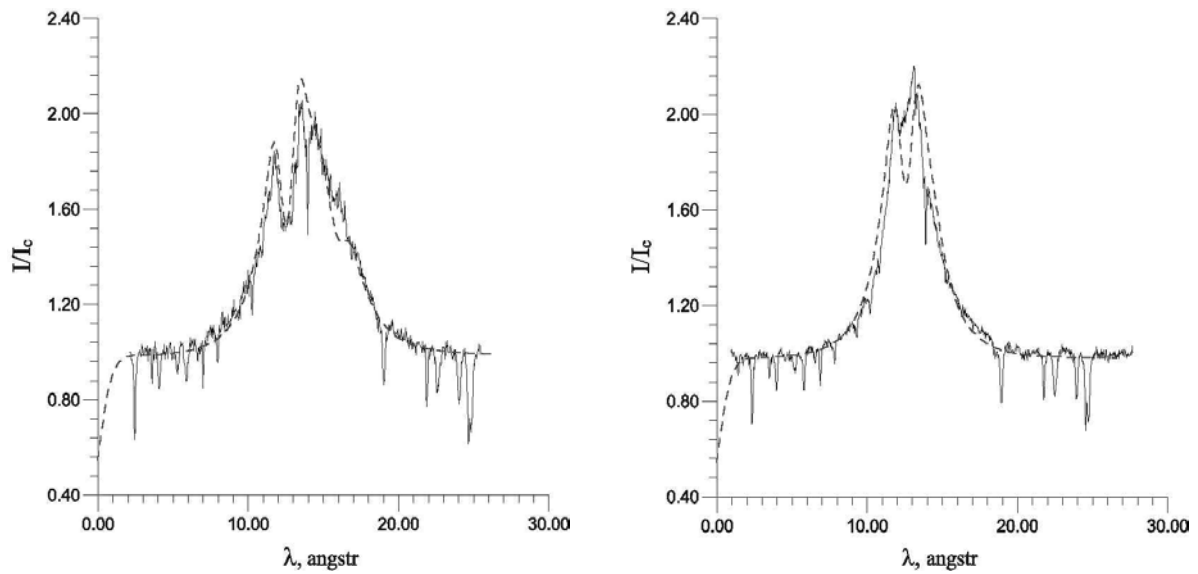


Рис. 7 и 8. Наблюденный (сплошная линия) и вычисленный (пунктир) профиль линии H_α для моментов наблюдений t_1 и t_3 . I_c – локальный континуум

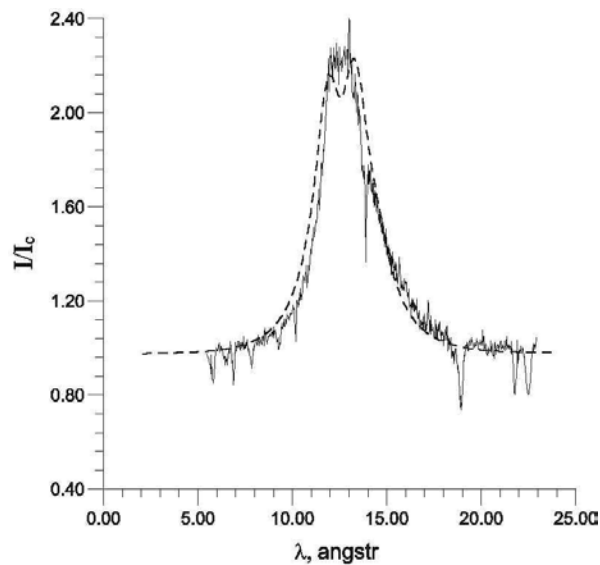


Рис. 9. То же, что на рис. 7, но для момента наблюдений t_4

Таким образом, исходя из расчетов и подбора моделей, мы приходим к заключению, что исследуемый узел вспышки имеет тонкую структуру и состоит из ярких элементов, имеющих субтелескопические размеры и занимающих 8–12 % площади узла. Сравнение моделей, рассчитанных для этих элементов вспышки, с моделями атмосферы ядер, излучающих в континууме, показало два основных различия. Первое заключается в различной глубине прогрева хромосферы, а именно, у ядер с непрерывной эмиссией прогрев достигает нижней хромосферы, а в узле, не излучающем в континууме, нагрев ограничивается верхней хромосферой. Второе различие – в исследуемом узле в верхней хромосфере образуется конденсация толщиной 40–60 км с плотностью до 10^{14} – 10^{15} см^{-3} .

Эволюционные характеристики профиля линии H_{α} ...

4 Выводы

Исследование временных и спектральных особенностей H_{α} -эмиссии узла вспышки балла 2В/Х6.9, не излучающего в континууме, показало:

1. Наблюдается временная корреляция между кривой развития H_{α} -излучения и потоком микроволнового излучения на частоте 2.85 ГГц.
2. Обнаружены эволюционные изменения формы профиля линии H_{α} . Профиль линии H_{α} с протяженными крыльями, центральным обращением и красной асимметрией появляется на стадии подъема основного микроволнового импульсного всплеска и позже заменяется профилем с протяженными крыльями, но без самообращения. Крылья профилей расширены эффектом Штарка. Если интерпретировать результаты наших наблюдений в контексте теоретических расчетов (Кэнфилд и др., 1984), то они указывают на то, что в данном вспыхивающем узле в начале импульсной фазы нагрев хромосферы производился потоком нетепловых электронов при низком корональном давлении, которое увеличивалось с развитием вспышки и достигло наибольшего значения во время максимума потока мягкого рентгеновского излучения.
3. Сильная красная асимметрия профиля в начале импульсной фазы указывает на присутствие сильных, направленных вниз движений, которые существенно уменьшаются во время основного импульсного всплеска.
4. Рассчитаны полуэмпирические модели хромосферы, объясняющие наблюдаемые профили линии H_{α} для трех последовательных моментов развития вспыхивающего узла. В процессе расчетов и подбора моделей мы пришли к заключению, что исследуемый узел вспышки имел тонкую субтелескопическую структуру и состоял из ярких элементов, занимающих 8–12 % площади вспыхивающего узла, и менее ярких областей. Модели хромосферы, рассчитанные для ярких элементов исследованного узла вспышки, существенно отличаются от моделей хромосферы ядер этой же вспышки, излучающих в континууме (Бабин и др., 2016). Основное различие заключается в глубине прогрева хромосферы: у ядер вспышки с непрерывной эмиссией прогрев достигает нижней хромосферы и температурного минимума, а в узле без непрерывной эмиссии нагрев ограничен областью верхней хромосферы с образованием здесь конденсации толщиной 40–60 км с плотностью 10^{14} – 10^{15} см⁻³. Лучевые скорости в моделях уменьшаются со временем от 140 км/сек до 35 км/сек.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что нагрев разных узлов вспышки обусловлен различными механизмами и что во время развития вспышки могут действовать несколько механизмов нагрева. Следует отметить, что анализ рентгеновского излучения данной вспышки (Шарыкин и др., 2014; Кашапова и др., 2014) указывает на наличие в ней сверхгорячего источника с температурой свыше 30 МК.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00221 А.

Литература

- Бабин и Коваль (Babin A.N. and Koval A.N.) // *Izv. KrAO*. 2014. V. 110. P. 100.
 Бабин и др. (Babin A.N., Baranovskii E.A., and Koval A.N.) // *Astron. Rep.* 2016. V. 60. N. 8. P. 768.
 Вернацца и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., and Loser R.) // *Astrophys. J. Suppl.* 1981. V. 45. P. 635.
 Ган и Фанг (Gan W.Q. and Fang C.) // *Solar Phys.* 1987. V. 107. P. 311.

- Кашапова Л.К., Мешалкина Н.С., Бабин А.Н., Коваль А.Н., Цап Ю.Т. // Труды 18 Всероссийской конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. СПб: ГАО РАН. 2014. С. 211.
- Кэнфилд и др. (Canfield R.C., Gunkler T.A., and Ricchiazzi P.J.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 282. P. 296.
- Мачадо и др. (Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., and Noyes R.W.) // *Astrophys. J.* 1980. V. 242. P. 336.
- Нейдиг (Neidig D.F.) // *Solar Phys.* 1989. V. 121. P. 261.
- Фанг и Динг (Fang C. and Ding M.D.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V. 110. P. 99.
- Шарыкин И.Н., Струминский А.Б., Зимовец И.В. // Сб. тезисов докладов на 18 Всероссийской ежегодной конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. 2014. С. 110.