

УДК 523.98

Динамические процессы во вспышке на Солнце 26 июня 1999 г.

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
babin@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 30 сентября 2009 г.

Аннотация. Исследуются эволюционные и пространственные характеристики движений во вспышечной хромосфере вспышки балла 2В/М2.3 на основании анализа асимметрии эмиссии H_{α} -профилей. Рассматривается возможность согласования результатов наблюдений с теорией испарения хромосферы.

Спектральные H_{α} наблюдения вспышки, полученные на коронографе КГ-2 НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” с временным разрешением 5–10 с и пространственным разрешением до 1 угл. с, охватывают все стадии развития вспышки. Получены следующие результаты:

1. Асимметрия профиля H_{α} является общей характеристикой вспышечной эмиссии, независимо от ее интенсивности, принадлежности к разным структурным деталям и фазам развития вспышки.
2. Большинство H_{α} эмиссионных профилей во вспышечных областях показывает красную асимметрию. Однако в небольших локальных областях наблюдалась синяя асимметрия на всех стадиях развития вспышки.
3. В местах основного энерговыделения наблюдалась красная асимметрия, которая появилась до начала импульсной фазы и продолжала существовать после ее окончания. Т. е. источник энергии, ответственный за динамические процессы во вспышке, начинал действовать раньше и существовал дольше, чем НХР-эмиссия.
4. Вид асимметрии изменялся с фазой вспышки: преобладание интенсивности красного крыла (при несмещенном или слабо смещенном ядре линии) в предимпульсной, в начале импульсной и постепенной фазах. В максимуме импульсной фазы практически симметричные контуры с протяженными крыльями были смещены в целом в красную сторону спектра, то есть происходило опускание всего излучающего объема со скоростью несколько десятков км/с. Такой вид асимметрии не может быть объяснен динамической моделью хромосферной конденсации (Кенфилд и Гайлей, 1987).
5. Профили H_{α} во время импульсной фазы не показывают признаков нагрева хромосферы потоком нетепловых электронов (Кенфилд и др., 1984).
6. Время направленных вниз движений и изменение скорости движений со временем не согласуются с моделью динамики хромосферной конденсации (Фишер, 1989).
7. Морфологические особенности поля скоростей также не согласуются с теорией испарения хромосферы, так как наибольшие разнонаправленные скорости были зарегистрированы в верхушках вспышечных петель, а не в местах основного энерговыделения.

Мы приходим к заключению, что исследуемая вспышка показывает спектральные особенности, которые не согласуются со стандартной моделью испарения хромосферы.

DYNAMICAL PROCESSES IN THE 26 JUNE 1999 FLARE ON THE SUN, *by A.N. Babin and A.N. Koval*. The evolutional and spatial characteristics of the motions in the flaring chromosphere indicated by the H_{α} line asymmetry during the development of the flare 2B/M2.3, on June 26, 1999 have been investigated. The possibility to reconcile the observational results with the theory of the explosive chromospheric evaporation has been considered too.

The spectral H_{α} flare observations were made with the coronagraph KG-2 of the Crimean Astrophysical Observatory with the temporal resolution 5-10 s and the spatial resolution up to 1 arcsec that covered all stages of the flare development. The following results have been obtained:

1. The asymmetry of the H_{α} profiles is the most general signature of flare emission independently of its intensity, belonging to different structural elements of flare and phases of flare development.
2. The most of the H_{α} emission profiles in flare regions showed red asymmetry. However a blue asymmetry was founded in a few small local regions that appeared during all phases of the flare development.
3. At the sites of main energy deposition the conspicuous red asymmetry appeared before the HXR rise and lasted after the end of the HXR spikes. So the energy source which is responsible for dynamical processes in the flare started before and lasted longer then the impulsive HXR emission.
4. The character of the H_{α} line red asymmetry changed with the phase of flare: predominance of the red wing intensity (while the line center has no shift or small shift) before and in the beginning of impulsive as well as gradual phase, and shift to the red of symmetric broad-wing emission as a whole during the maximum of impulsive phase. The shift corresponds to the downward motion of the H_{α} emitting regions with about uniform bulk velocity of several tens km/s. These observations are not consistent with the dynamical model of chromospheric condensation (Canfield and Gayley, 1987).
5. During impulsive phase the H_{α} profiles did not display the signature of chromospheric heating by the beam of nonthermal electrons (Canfield, Gunkler and Ricchiazzi, 1984).
6. The lifetime of the observed downward velocities and the slowing-down time of the downflows are not consistent with simulated evolution of downward moving chromospheric condensation (Fisher, 1989).
7. The morphological properties of the velocity fields contradict to the model of explosive chromospheric evaporation. The most Doppler-shifted emission streaks were detected near the tops of the flare loops but not at their footpoints, which are the places of main energy deposition.

Finally, we must conclude that the flare we have analyzed shows spectral signatures that do not appear to be consistent with the standard evaporation model.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, движение хромосферного вещества

1 Введение

В последние годы активно исследуются движения на разных уровнях атмосферы Солнца, так как они являются важным аспектом вспышечного процесса и наблюдаются как в период накопления энергии, так и во время ее реализации. Особое значение имеют движения, наблюдаемые в самом вспышечном веществе, так как они могут иметь прямое отношение к механизму выделения энергии. Однако до сих пор четко не установлена картина развития движений вспышечного вещества в течение вспышки и не предложена ее однозначная интерпретация. Спектральным проявлением движений вспышечного вещества является асимметрия линий излучения во вспышках.

При исследовании движений вспышечного хромосферного вещества чаще всего используется водородная линия H_{α} . Вследствие большой оптической толщи линии различные части контура представляют различные глубины в солнечной атмосфере, что дает возможность исследовать движения на разной высоте. С другой стороны, согласно теоретическим расчетам (Кэнфилд и др., 1984; Кэнфилд и Гайлей, 1987) форма профиля сильно зависит от физических условий в области вспышки и механизмов нагрева хромосферы.

Асимметрия профиля линии H_{α} во вспышках является основной особенностью спектра вспышки. На это впервые обратил внимание Вальдмайер (1941). Выполненные впоследствии спектральные и монохроматические наблюдения показали, что в 80 % вспышек наблюдается красная асимметрия. Отмечалось также появление синей асимметрии в самом начале вспышки (Швестка и др., 1962; Танг, 1983). Согласно Швестке и др. (1962) асимметрия не изменяет положение центра эмиссионной линии, а только делает одно из крыльев более интенсивным и протяженным.

В разное время предлагался ряд моделей для объяснения красной асимметрии линии H_{α} . Эллисон (1949), а за ним и другие (Швестка, 1951; Казачевская и Северный, 1958), связывали асимметрию с ослаблением эмиссии в синем крыле движущимся вверх облаком поглощающего вещества. В дальнейшем, когда асимметрия эмиссии была обнаружена не только в линиях водорода, но и в линиях гелия и металлов, исследователи пришли к выводу, что асимметрия возникает в самой вспышечной области (Джефферис и др., 1959; Северный, 1959; Фритцова, 1960; Банин, 1965; Коваль, 1976; Ичимото и Курокава, 1984). Поэтому она должна быть тесно связана с процессами, происходящими во вспышке, и учитываться при построении модели вспышки. Балларио (1963) и Банин (1964) пытались объяснить асимметрию особой вспышечной моделью, в которой вспышечное вещество течет вдоль петли. Однако многие вспышки, в которых наблюдалась асимметрия, по форме существенно отличались от петельной модели Балларио и Банина. Кроме того, было обнаружено, что наблюдается также другой вид асимметрии, когда эмиссионный профиль сдвинут в целом, что указывает на движение всего излучающего объема (Ичимото и Курокава, 1984; Бабин и Коваль, 1985).

В настоящее время для объяснения асимметрии эмиссии вспышек широко привлекается теория испарения хромосферы, которая является важным элементом стандартной модели вспышки. Согласно стандартной модели, вспышка является результатом быстрой реализации свободной магнитной энергии в короне в верхушке магнитной петли. Выделяемая энергия идет на ускорение электронов и ионов до высоких энергий, прямой нагрев и движение плазмы. Распространяясь вдоль магнитной петли, потоки нетепловых электронов и теплопроводности проникают в хромосферу и производят ее нагрев. При этом происходят гидродинамические процессы, которые были названы испарением хромосферы (Ньюперт, 1968).

Теория предсказывает два вида хромосферного испарения (Фишер и др., 1985) в зависимости от мощности потока поступающей энергии. Если поток довольно низкий, происходит умеренный нагрев хромосферы, который уравнивается радиативным охлаждением. При этом хромосферное вещество медленно поднимается вверх, то есть происходит мягкое испарение хромосферы. Если поток поступающей энергии становится больше 10^{10} эрг/см²с, хромосферная плазма очень быстро нагревается до корональных температур (10^7 К), и происходит взрывное испарение хромосферы. Основной особенностью этого процесса является одновременное, направленное вверх движение плазмы, нагретой до корональных температур, и направленное вниз движение хромосферной плазмы во время импульсной фазы вспышки. Движущаяся вниз область была названа хромосферной конденсацией (Костюк и Пикельнер, 1974; Сомов и др., 1981; Лившиц и др., 1981; Фишер и др., 1985). С точки зрения этой модели излучение хромосферной конденсации ответственно за появление красной асимметрии в хромосферных линиях, а сдвинутый в синюю сторону компонент, наблюдаемый в линиях мягкого рентгеновского излучения (Антонучи и др., 1980), представляет нагретую до корональных температур плазму, которая испаряется в корону.

Новые возможности в исследовании вспышек, в том числе и выяснении причин возникновения асимметрии эмиссии, появились в последние годы благодаря спектральным наблюдениям с высоким временным и пространственным разрешением. Они позволяют изучить изменения профилей хромосферных линий во время импульсной фазы и сравнить их с излучением в мягком и жестком рентгене, а также с теоретическими расчетами, показывающими реакцию хромосферы на импульсное поступление энергии (Ичимото и Курокава, 1984; Кэнфилд и Гунклер, 1985; Вьюльсер и Марти, 1989; Кэнфилд и др., 1990; Де ла Божардьё и др., 1992; Джи и др., 1994; Кауззи и др., 1996).

Исследования последних лет показали, что ряд наблюдательных фактов как в оптическом, так и в рентгеновском диапазонах, не могут быть однозначно объяснены в рамках простой модели испарения хромосферы. Нужны надежные данные о временной и пространственной структуре вспышки и

движениях в этих структурах. Если в цитируемых выше работах временное разрешение было достаточно высоким (от 20 с до 1 с), то в большинстве из них пространственное разрешение недостаточно высокое (размер пиксела 2.5–3 угл. сек). А как показали Ичимото и Курокава (1984), сдвинутые в красную сторону спектра эмиссионные детали вспышки в линии H_{α} имеют размеры около 1 угл. сек и меньше. Поэтому при изучении движений вспышечного вещества точность полученных результатов, а также их физическая интерпретация, сильно зависит от разрешения тонкой структуры вспышки.

Целью настоящей работы является изучение эволюционных и пространственных характеристик движений во вспышечной хромосфере на основании анализа асимметрии эмиссии H_{α} -профилей на разных стадиях развития вспышки балла 2В/М2.3 и рассмотрение возможности согласования наблюдений с теорией испарения хромосферы.

2 Наблюдения

Исследуемая вспышка балла 2В/М2.3 произошла в активной области NOAA 8598 вблизи центра солнечного диска (N23 E03). Она началась в 5:09 UT и достигла максимума в 5:12 UT (Solar-Geophysical Data, 1999).

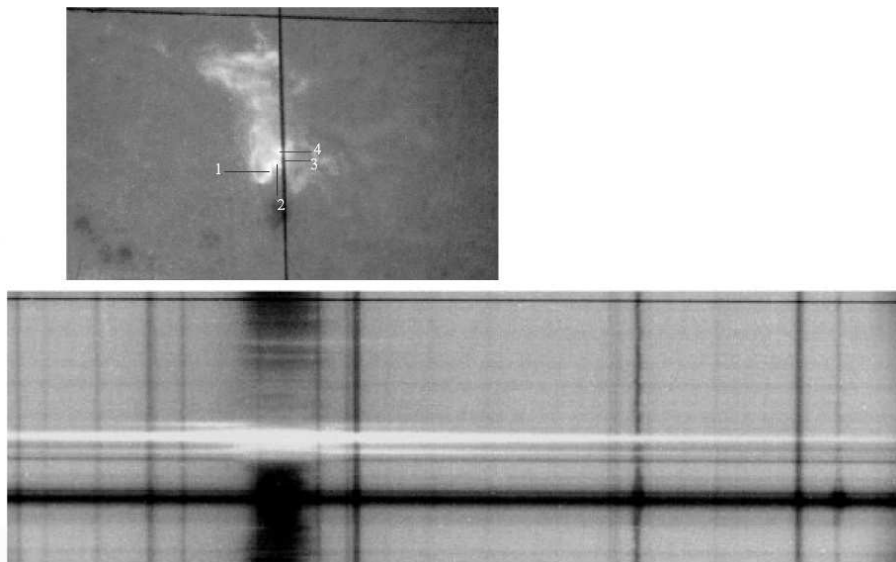


Рис. 1. Спектрограмма вспышки в момент максимума белого свечения и соответствующее H_{α} изображение на щели спектрографа (5:11:57 UT)

На коронографе КГ-2 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» фотографические спектральные наблюдения активной области были начаты в 4:50 UT. Использовалась оптическая система, позволяющая получать четыре изображения спектра в области линии H_{α} во втором и третьем порядках дифракционного спектрографа через анализаторы линейной поляризации (Бабин и Коваль, 1987). Наблюдался спектральный участок 6555–6582 Å во втором порядке и 6557–6574 Å в третьем при дисперсии 1.0 Å/мм и 0.58 Å/мм соответственно. Экспозиции для H_{α} -спектров были 0.1 с, диаметр изображения Солнца на щели спектрографа около 12 см. Одновременно со спектрами, при помощи камеры РФК-5 и H_{α} -фильтра, регистрировалось изображение вспышки на щели спектрографа, что давало возможность отождествить положение щели в активной области при каждой экспозиции. При этом часть света использовалась для визуального контроля.

Качество изображений позволяло получить на лучших кадрах пространственное разрешение меньше 1 угл. сек. Наблюдения охватывают предвспышечную, начальную, импульсную и частично постепенную фазы вспышки. Всего получено 40 спектрограмм, 8 из которых относятся к фазе хромосферного предвестника вспышки, 4 – к предимпульсной фазе, 22 спектрограммы получены во время импульсной фазы и 6 – в постепенной. Спектрограммы во время вспышки получались с интервалом 5–10 с. Пример исследуемых спектрограмм и изображение вспышки в линии H_{α} в момент максимума представлены на рис. 1. Морфологические, эволюционные и спектральные особенности, а также энергетика белой вспышки изучены ранее (Бабин, Коваль, 2005).

По структуре вспышку можно отнести к классу компактных, в которых вспыхивают уже существующие хромосферные структуры и системы петель (Дживеди и др., 1984). Вспышка начиналась с уярчения трех небольших узлов, которые располагались на близком расстоянии, но имели разный размер и ориентацию. Эти три первоначальных вспышечных узла 1, 2, 3 и появившийся позднее узел 4 (рис. 1) были основными центрами выделения энергии. В месте пересечения узла 3 и 4 в 5:11:57–5:12:33 UT было зарегистрировано свечение в оптическом континууме. При наблюдениях мы получали спектры наиболее интенсивных вспышечных узлов, удаленных узлов вспышки и вершины вспышечной петли, чтобы изучить действие вспышечного нагрева хромосферы и получить более полные сведения о временном и пространственном характере асимметрии H_{α} -профилей в исследуемой вспышке.

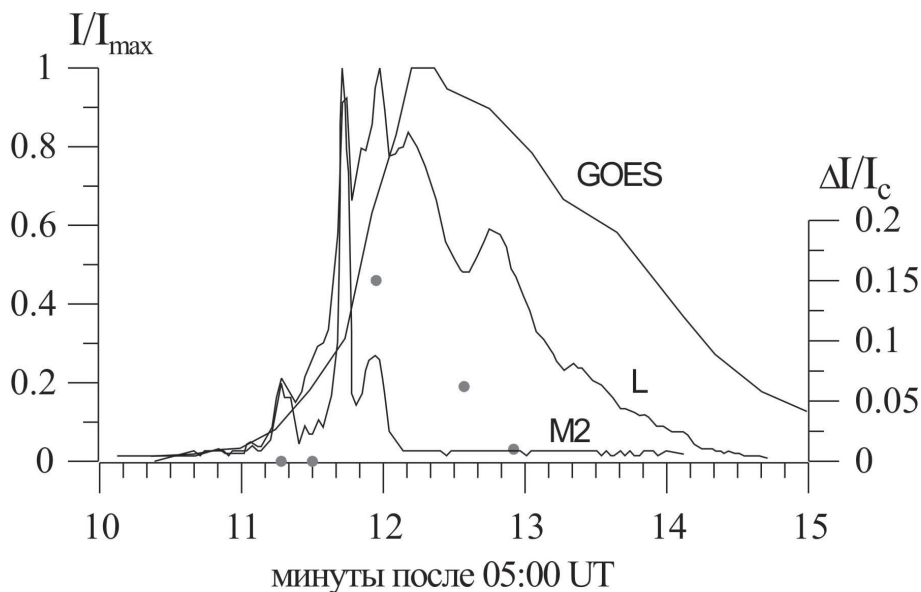


Рис. 2. Временные профили НХР (YONKON, каналы L (14–23 keV) и M2 (33–53 keV)), SXR (0.5–4.0 Å, GOES-10) и контраста вспышки в континууме (точки, правая шкала)

По характеру развития вспышка представляла собой сложный процесс энерговыделения. Связанное со вспышкой мягкое (0.5–4.0 Å) и жесткое рентгеновское излучение в канале L (14–23 keV) и в канале M2 (33–53 keV) представлены на рис. 2. Временные НХР-профили показывают 6 всплесков, которые накладываются на постепенный компонент. На фазе роста постепенного компонента всплески продолжительностью до 10 с наблюдаются во всех энергетических каналах, а на фазе спада только в канале L.

3 Фотометрическая обработка спектров

Фотометрия спектров проводилась при помощи микрофотометра МФ-4 и двухкоординатного сканирующего микрофотометра МФ-2 с последующей компьютерной обработкой результатов измерений по программе SPE С.Г. Сергеева. На каждом спектре, который соответствовал данному положению щели спектрографа, фотометрировались наиболее существенные вспышечные возмущения в линии H_{α} . Наблюдаемые интенсивности H_{α} -профилей выражались в единицах локального континуума.

Для изучения асимметрии были построены разностные профили, которые получались путем вычитания из полученного из наблюдений контура профиля H_{α} в невозмущенном месте активной области. Совмещение профилей по длине волны проводилось по атмосферным линиям. Если движения, вызывающие асимметрию, возникают во вспышечной плазме, то разностный профиль будет лучше отражать эти движения. Однако сама процедура вычитания невозмущенного профиля из полученного из наблюдений оправдана лишь в том случае, если вспышка не изменяет вид профиля в нижележащей атмосфере. Это вносит неопределенности в определение H_{α} разностных профилей, особенно в центральной части профиля. При анализе асимметрии профилей был использован метод бисекторов. Асимметрия профиля количественно оценивалась величиной смещения бисектора линии относительно положения центра невозмущенной линии, и по этому смещению определялись лучевые скорости движения вещества во вспышечной хромосфере.

4 Результаты фотометрии и их анализ

Согласно временному ходу жесткого и мягкого рентгеновского излучения, в наших наблюдениях можно выделить четыре фазы развития вспышки: фаза предвестника (5:00:00–5:07:00 UT), предимпульсная фаза (5:10:31–5:11:10 UT), импульсная (5:11:12–5:13:00 UT) и постепенная фаза (5:13:00–5:15:00 UT). Рассмотрим профили H_{α} и их изменение на каждом этапе развития вспышки.

4.1 Хромосферный предвестник вспышки

С 5:00:00 UT наблюдалась заметная предвспышечная активность, которая проявлялась в возгорании точечных узелков, расположенных как в непосредственной близости, так и вдали от будущих мест основного энерговыделения. Максимумы кривых развития яркости узелков совпадали по времени с максимумом потока излучения рентгеновского предвестника вспышки (Бабин и Коваль, 2005). Таким образом, нагрев короны и хромосферы происходил одновременно.

Характерные примеры профилей линии H_{α} в предвспышечных узелках приведены на рис. 3. Анализ профилей показывает, что практически все они асимметричны. Наблюдается несколько видов излучения в H_{α} : эмиссия в центре линии с короткими крыльями, эмиссия с протяженными крыльями (до 3.5 \AA) с четко выраженным преобладанием интенсивности синего или красного крыла, односторонние эмиссионные выбросы и эмиссия типа усов. При этом одновременно в пределах одного узелка наблюдаются существенно различающиеся профили. В большинстве случаев сдвиг бисекторов в центральной части профиля и в крыле различен, а в некоторых случаях имеет даже разное направление (см. рис. 3). Определенные по доплеровскому сдвигу бисекторов, лучевые скорости заключены в пределах 0–16 км/с в ядре линии и 1–21 км/с в крыле, независимо от направления движений.

4.2 Предимпульсная фаза

Из-за проходящих облаков наблюдения на КГ-2 были прерваны в 5:04:39 UT и возобновлены в 5:10:31 UT. В это время в активной области уже разгорались три основных вспышечных узла. На протяжении 40 с до начала первого импульсного всплеска было получено 4 спектрограммы этих вспышечных узлов. Рассмотрим полученные из наблюдений и разностные (вспышка минус невозмущенный) H_{α} -профили вспышечной эмиссии, которая являлась доминирующей по яркости и

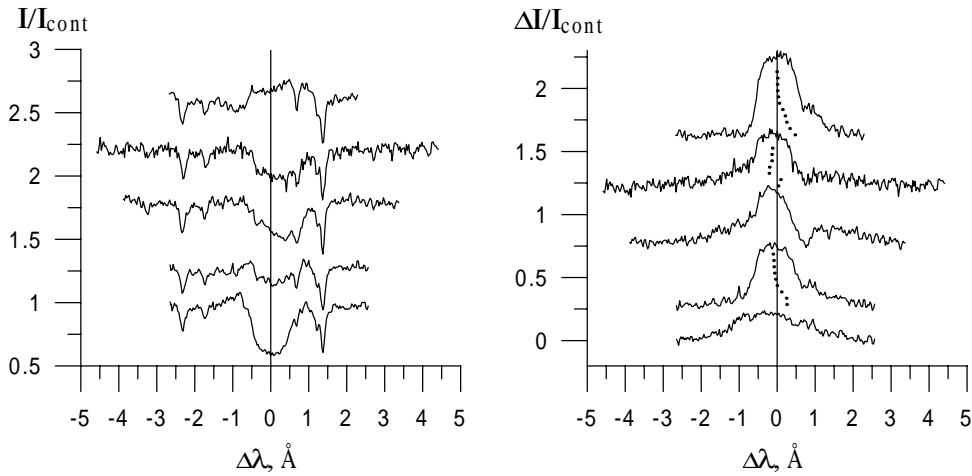


Рис. 3. Примеры профилей линии H_{α} в ярких узелках в фазе предвестника вспышки; слева – полученные из наблюдений, справа – разностные (наблюдения минус невозмущенный контур), точки – бисекторы. На всех рисунках профили произвольно разнесены по оси ординат

протяженности крыльев, в трех вспышечных узлах (рис. 4). Полученные из наблюдений профили асимметричны с сильным центральным обращением. Центральное обращение не смещено, а красное крыло заметно ярче и протяженнее синего. Протяженность эмиссионных крыльев достигает 4–5 Å. Бисектор разностных профилей не вертикальный и его смещение от центра невозмущенной линии увеличивается при переходе от ядра к крылу. Лучевые скорости излучающего вещества 0–10 км/с в ядре линии и 15–32 км/с в крыле.

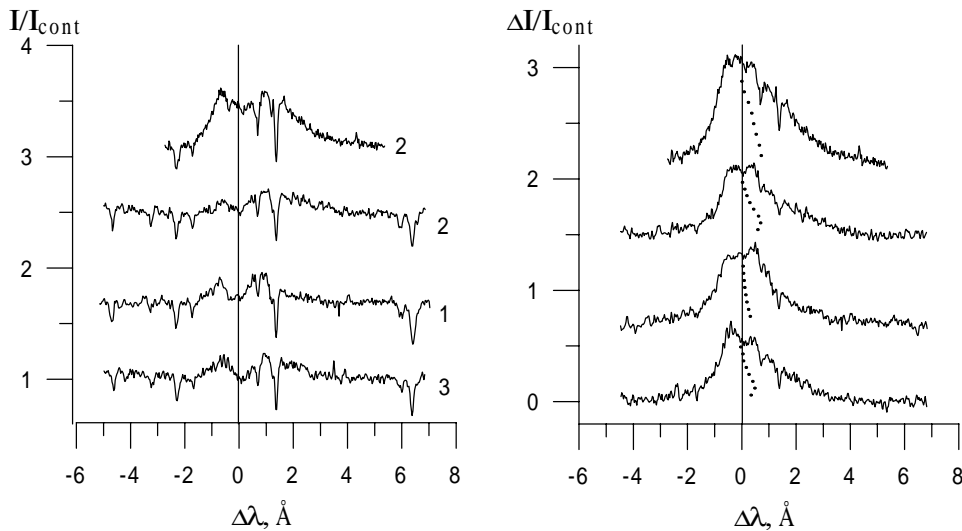


Рис. 4. Полученные из наблюдений и разностные профили H_{α} в основных вспышечных узлах в предимпульсной фазе

4.3 Импульсная фаза

Во время импульсной фазы наши наблюдения были, в основном, сконцентрированы на узлах 2, 3 и 4. Временная эволюция профилей линии H_α доминирующей эмиссии в этих узлах представлена на рис. 5–7. Как видим, профили линии H_α в разных узлах заметно различаются. В узле 2 полученные из наблюдений профили имеют центральное обращение в течение всего импульсного периода вспышки. Профили в узлах 3 и 4 без самообращения, но заметно различаются по форме и асимметрии. Центральные интенсивности превышают интенсивность континуума примерно в 2 раза, а полная протяженность крыльев во всех узлах достигает 16–22 Å.

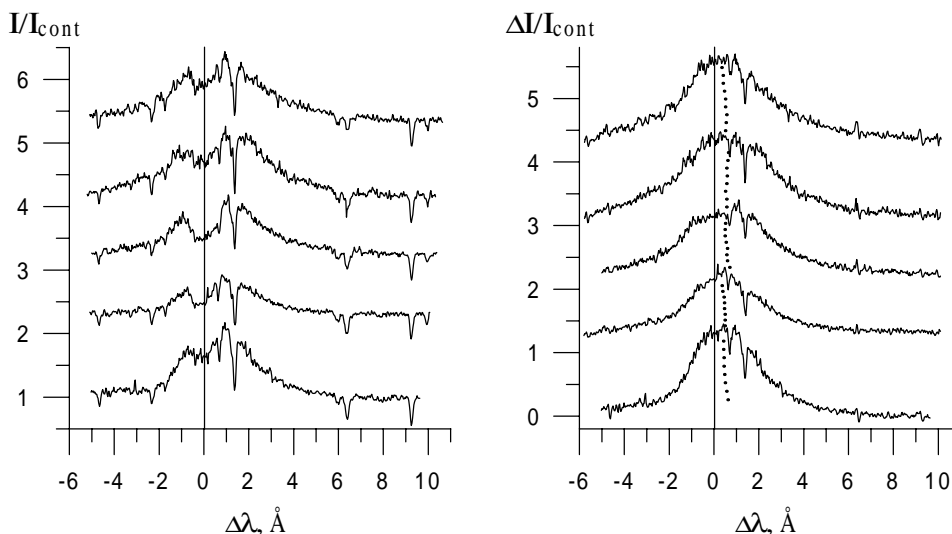


Рис. 5. Полученные из наблюдений и разностные профили H_α во вспышечном узле 2 в импульсной фазе с 5:11:12 UT по 5:11:49 UT (снизу вверх)

Сравним полученные профили линии H_α в импульсной фазе с теоретическими, рассчитанными в (Кэнфилд и др., 1984). Согласно расчетам, вид профиля H_α чувствителен к физическим условиям в хромосфере и механизму нагрева хромосферы. Только при нагреве хромосферы мощным потоком нетепловых электронов с энергиями свыше 20 keV и низком корональном давлении контуры H_α имеют самообращенное ядро и расширенные штарк-эффектом протяженные крылья. Чем мощнее поток электронов, тем больше протяженность крыльев. Только в случае высокого коронального давления над областью вспышки наблюдаются необращенные профили. Отсутствие центрального обращения не исключает нагрева хромосферы нетепловыми электронами, а лишь указывает на высокое давление во вспышечной короне.

Рассмотрим профили H_α в узле 2, которые показывают оба признака нагрева хромосферы мощным потоком нетепловых электронов, если исходить из теоретических расчетов: самообращение в ядре и протяженные крылья (7–9 Å). Полученные из наблюдений профили асимметричны: яркость максимума в красном крыле заметно превышает яркость максимума в синем. Бисектор профилей в крыле практически вертикальный и смещен в красную область спектра. Смещение бисекторов соответствует скоростям 35–50 км/с. Разностные профили также смещены в целом и симметричны относительно смещенного бисектора. Из этого следует, что происходит опускание всего излучающего объема с малым градиентом скорости внутри объема. Центральное обращение в полученных из наблюдений профилях или не смещено относительно центра невозмущенного профиля, или даже несколько смещено в синюю область спектра. Это говорит о том, что центральное обращение

возникает не в излучающем объеме, а вследствие поглощения излучения вспышки вышележащей хромосферой, которая не вовлечена в движения.

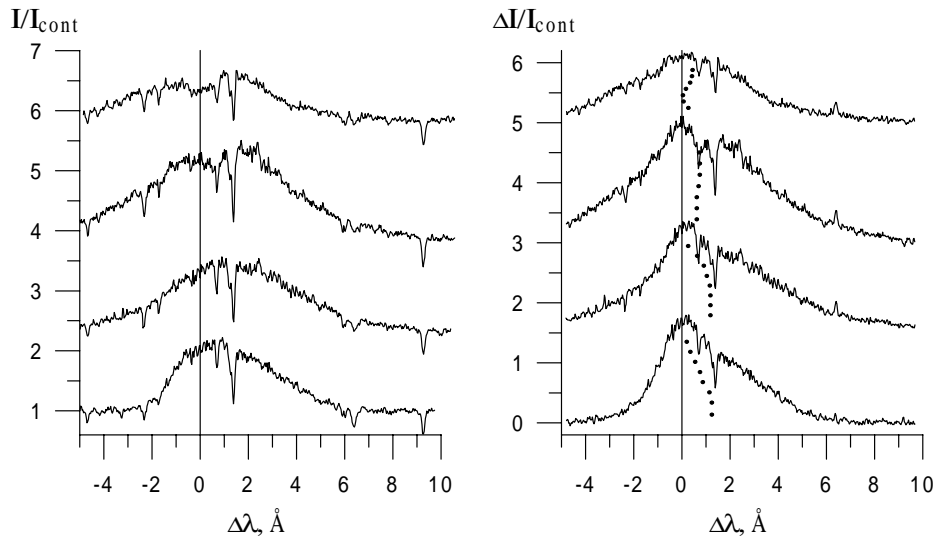


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для узла 3 (с 5:11:17 UT по 5:12:37 UT)

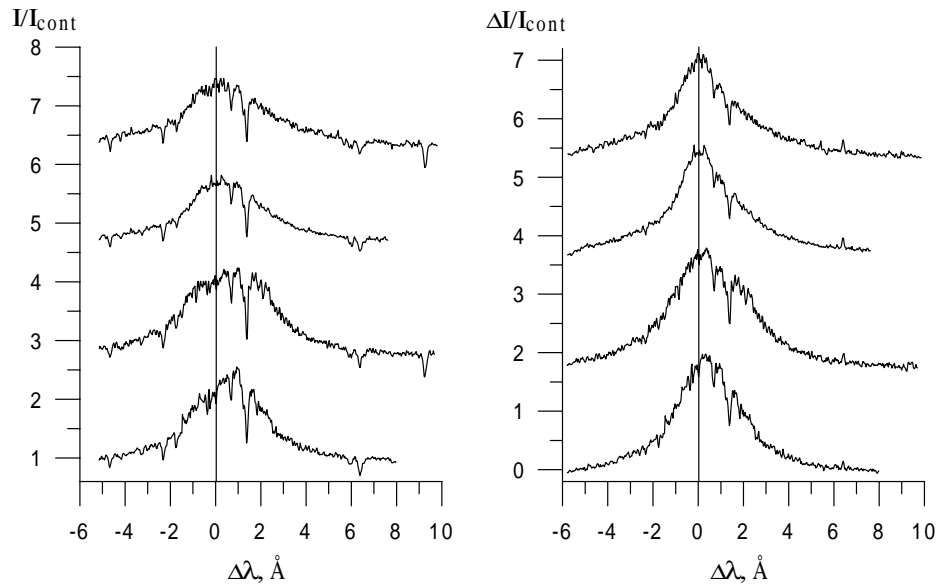


Рис. 7. То же, что на рис. 5, но для узла 4 (с 5:11:39 UT по 5:12:12 UT)

Впервые такие характерные особенности вспыхечных H_α -профилей с центральным обращением были обнаружены нами при исследовании H_α -спектров вспышки балла 2В/Х3.5 26 июля 1981 г. (Бабин и Коваль, 1985). Аналогичный вид профилей наблюдался в одном из вспыхечных узлов вспышки 1В/М1 11 января 1991 г. (Де ла Божардые и др., 1992). Такая картина не согласуется с динамической моделью (Кэнфилд и Гайлей, 1987) движущейся вниз хромосферной конденсации, образованной при нагреве хромосферы нетепловыми электронами.

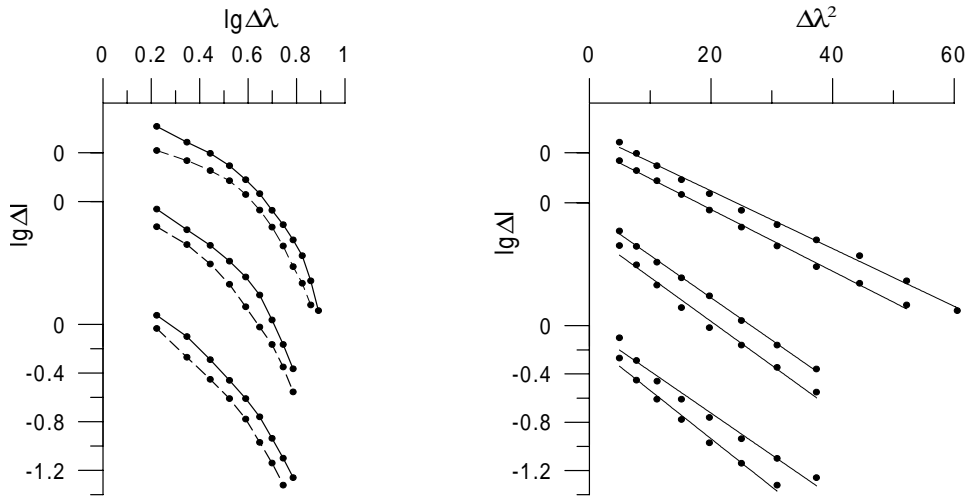


Рис. 8. Логарифмические профили H_α для трех вспыхечных узлов для двух моментов времени; слева – в штарковских осях, справа – в доплеровских осях

Вторым признаком нагрева хромосферы потоком нетепловых электронов, проявляющимся в профилях линии H_α , являются протяженные эмиссионные крылья, расширенные эффектом Штарка. Как уже отмечалось выше, протяженность эмиссионных крыльев в этих трех исследуемых узлах достигала 8–10 Å. Рассмотрим механизм расширения эмиссионных крыльев в импульсной фазе в этих узлах. В случае штарковского профиля при малой оптической толщине ($\tau \ll 1$), т. е. в крыле линии, зависимость $\Delta I/I_{cont}$ от $\Delta\lambda$ пропорциональна $\Delta\lambda^{-5/2}$. В этом случае $\lg(\Delta I/I_{cont})$ должен быть линейной функцией $\lg\Delta\lambda$ с угловым коэффициентом $-5/2$. На рис. 8 (слева) представлены примеры логарифмических профилей линии H_α в штарковских осях в трех вспыхечных узлах. Определение механизма расширения профилей проводилось с учетом движения излучающего узла: $\Delta\lambda$ отсчитывались от положения бисектора разностного профиля, при котором синее и красное крыло были наиболее симметричны. Из рис. 8 видно, что зависимость $\lg(\Delta I/I_{cont})$ от $\lg\Delta\lambda$ не является линейной. В некоторых участках $\lg\Delta\lambda$, где можно провести прямую, угловой коэффициент ее в большинстве случаев близок к 3. Поэтому мы приходим к заключению, что эффект Штарка не является основным механизмом расширения эмиссии линии H_α в данной вспышке.

Другим возможным механизмом расширения профилей является эффект Доплера. Если линии расширены эффектом Доплера, тогда для $\tau \ll 1$ $\lg(\Delta I/I_{cont})$ должен быть линейной функцией $\Delta\lambda^2$. Логарифмические профили H_α в доплеровских осях, представленные на рис. 9 справа, показывают линейную зависимость $\lg(\Delta I/I_{cont})$ от $\Delta\lambda^2$ для $\Delta\lambda > 2$ Å. Отсюда можно сделать вывод, что в местах основного энерговыделения данной вспышки во время импульсной фазы крылья профилей линии H_α расширены мощными макроскопическими движениями атомов со скоростями 150–200 км/с.

Окончательно вопрос о механизме расширения профилей эмиссионных линий во вспышках до

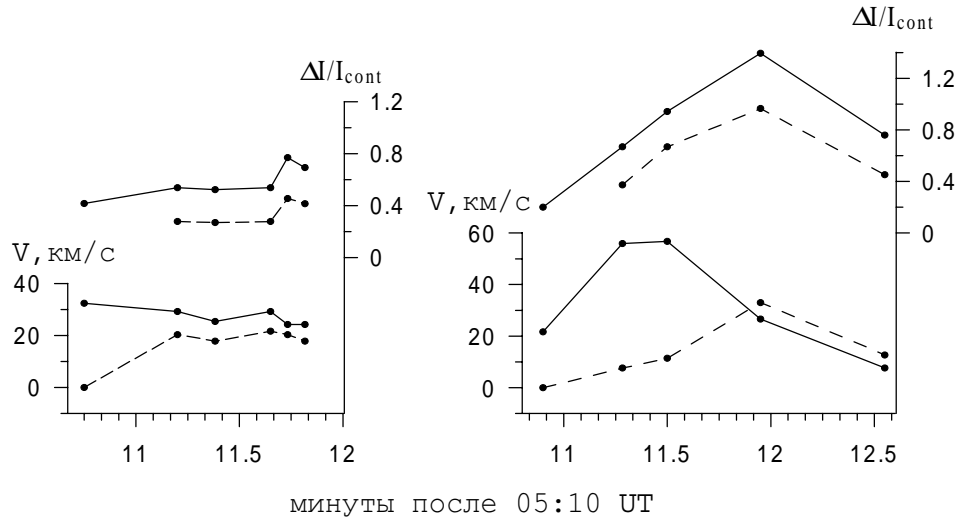


Рис. 9. Изменение скорости движения хромосферного вещества (сплошная – крыло линии, штриховая – ядро), а также интенсивности эмиссии в крыле на расстоянии 2 \AA (сплошная) и 3 \AA (штриховая) от положения смещенного бисектора. Слева – для узла 2, справа – для узла 3

сих пор не решен, так как для разных вспышек получаются разные механизмы расширения, в основном эффект Штарка или турбулентные движения, иногда с градиентом скорости по глубине (Швестка, 1960, 1961; Джефферис и др., 1959; Северный, 1959; Северный и Коваль, 1961; Банин, 1965; Банин и Коваль, 1985, 2002). Это может быть вызвано как различными физическими условиями в разных вспышках, так и наличием неразрешимых тонкоструктурных вспышечных элементов с эмиссиями, расширенными разным образом.

4.4 Динамика хромосферных движений

Рассмотрим изменения скорости движений вспышечного хромосферного вещества со временем, полученные из асимметрии профилей линии H_{α} , в предимпульсной и импульсной фазах вспышки. Мы использовали положения бисекторов в далеких крыльях и в ядре линии для определения скорости как функции времени. В профилях, сдвинутых в целом в красную сторону спектра, которые в основном наблюдаются вблизи максимума импульсной фазы, сдвиг бисектора не зависит от уровня интенсивности в линии. В тех спектрах, в которых бисектор не вертикальный, мы брали максимальный сдвиг.

Изменение скорости движения хромосферного вещества со временем во вспышечных узлах 2, 3 и 4, а также изменение интенсивности эмиссии в крыльях на расстоянии 2 \AA и 3 \AA от положения смещенного бисектора представлены на рис. 9–10. Как видно из рисунков, динамика лучевых скоростей в трех узлах вспышки различается. Также различается ход изменения величины скорости со временем, определенной для крыла и ядра линии. В узле 2 (рис. 9) скорости в крыле были наибольшими в предимпульсной фазе (32 км/с – первая точка на графике) и медленно уменьшались во время импульсной фазы до 24 км/с . Не наблюдалось зависимости между величиной скорости в крыле и интенсивностью крыла. Скорость в ядре линии увеличилась от 0 в предимпульсной фазе до 20 км/с в начале импульсной фазы и оставалась примерно такой же в течение двух импульсных всплесков.

В узле 3 в начале импульсной фазы скорость в крыле увеличивалась с 22 км/с до 57 км/с одновременно с увеличением интенсивности крыла, но достигла максимального значения на 25 с

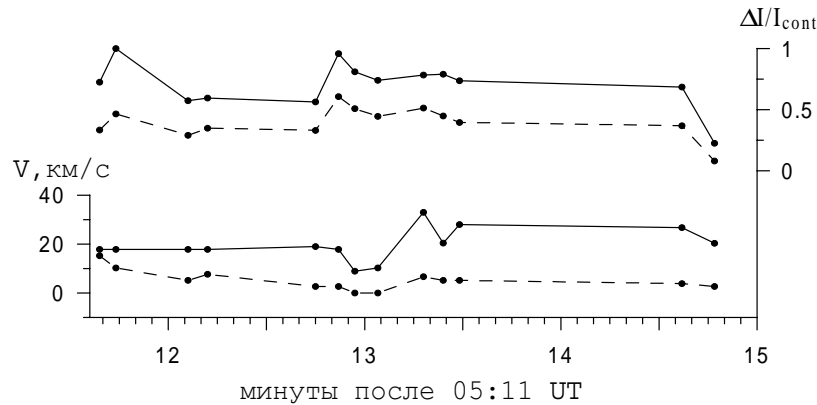


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но для узла 4

раньше, а в момент максимума интенсивности крыла резко уменьшилась до 27 км/с. В ядре линии ход изменения скорости соответствовал ходу изменения яркости. Скорость увеличилась от 0 в предимпульсной фазе до 33 км/с в момент максимума интенсивности, а в конце импульсной фазы уменьшилась до 8 км/с.

Узел 4 мы не будем подробно анализировать, так как он разгорелся на более поздней стадии развития вспышки, испытывал пульсации яркости и изменение формы, что может указывать на возгорание новых вспышечных элементов.

Сравним полученную нами картину эволюции движений хромосферного вещества в местах основного энерговыделения с теоретическими расчетами динамики хромосферной конденсации, образованной вследствие взрывного испарения хромосферы во время импульсной фазы (Фишер, 1989). Согласно расчетам, время жизни конденсации, когда скорость направленных вниз движений падает до нуля, равно примерно одной минуте. Промежуток времени, за который скорость конденсации уменьшается в два раза от ее максимального значения, зависит от величины максимальной скорости и, например, $t_{1/2} = 4$ с для $V_{\max} = 100$ км/с и $t_{1/2} = 8$ с для $V_{\max} = 50$ км/с.

В анализируемой нами вспышке только в узле 3 наблюдались заметные изменения скорости во время импульсной фазы. Максимальная скорость направленных вниз движений, определенная по крылу линии, была 57 км/с. Время, за которое скорость уменьшилась до 27 км/с (почти в 2 раза) равно 27 с, что примерно в 3.5 раза больше предсказанного теорией. Максимальная скорость, определенная для ядра линии, уменьшилась от 33 км/с до 13 км/с за 36 с вместо 12 с, предсказанных теорией. В узле 2 максимальная скорость в крыле линии наблюдалась за 20 с до начала импульсной фазы вспышки. За 37 с во время импульсной фазы скорость изменилась от 29 км/с до 24 км/с.

Таким образом, анализ наблюдений показал, что как промежуток времени, на протяжении которого наблюдаются движения, так и картина изменения скорости со временем не согласуется с предложенной (Фишер, 1989) моделью динамики хромосферной конденсации. Несогласие результатов наблюдений с предложенной моделью отмечалось и другими авторами (Ичимото и Курокава, 1984; Де ла Божардье и др., 1992; Кэнфилд и др., 1990).

4.5 Постепенная фаза вспышки

Примеры H_{α} -профилей вспышечной эмиссии в наиболее ярких узлах вспышки в постепенной фазе представлены на рис. 11. Из рисунка видно, что асимметрия в этот период появляется только в крыле линии, а центральная часть профиля остается несмещенной. Бисектор в крыле не вертикальный. Скорости движений, соответствующие максимальному смещению бисектора, 20–40 км/с. Наблюдения показывают, что в постепенной фазе вспышки, когда не наблюдалось усиления излучения в

жестком рентгене, а поток в мягком рентгене составлял 0.2 величины максимального потока, профили линии H_α были асимметричны. По сравнению с импульсной фазой яркость и протяженность крыльев заметно уменьшилась, а скорости движений вспышечной плазмы были того же порядка.

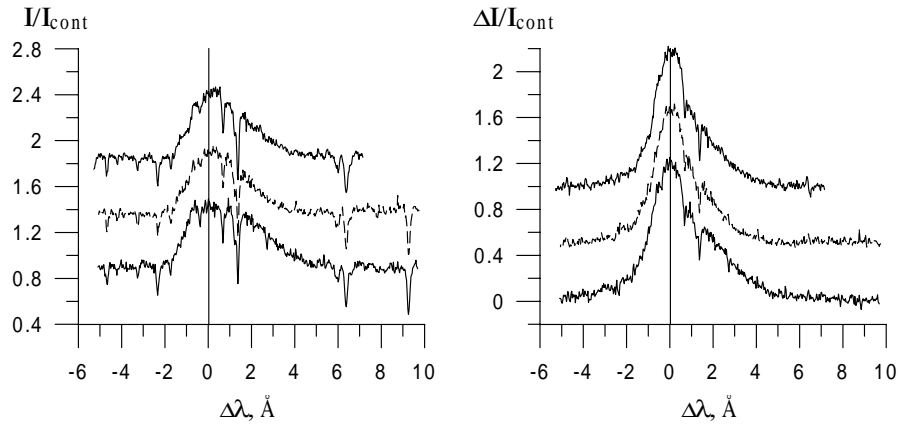


Рис. 11. Профили линии H_α в постепенной фазе вспышки (5:14:23–5:14:47 UT)

4.6 Удаленные вспышечные узлы и петли

Как показало исследование морфологии и временного развития вспышки в линии H_α (Бабин и Коваль, 2005), одновременно с импульсным ростом яркости основных вспышечных узлов происходило возгорание узелков, расположенных на заметном расстоянии от них, и петель, соединяющих узелки между собой и с основными вспышечными узлами. Примеры H_α -профилей в удаленных узелках во время импульсной фазы представлены на рис. 12. Характер асимметрии профилей в удаленных элементах вспышки такой же, как и в местах основного энерговыделения. Скорости движений вещества, определенные по положению бисектора в крыле, 15–40 км/с.

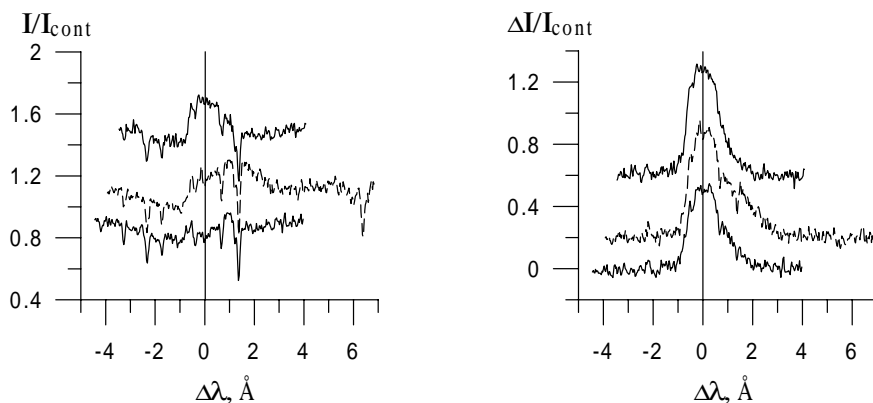


Рис. 12. Профили линии H_α в удаленных вспышечных узлах (5:11:49–5:12:45 UT)

Наиболее сдвинутые в красную или синюю область спектра эмиссионные образования были зарегистрированы на спектрах, когда щель пересекала верхушки вспыхивающих петель, которые представляли собой цепочку мелкоструктурных образований с усиленной яркостью (рис. 13). Скорости движений излучающего вещества в этих образованиях были заключены в пределах от -150 км/с до $+80$ км/с. Таким образом, наиболее смещенная эмиссия была локализована вблизи верхушек петель, а не у их оснований, как следовало бы ожидать в случае действия модели испарения хромосферы.

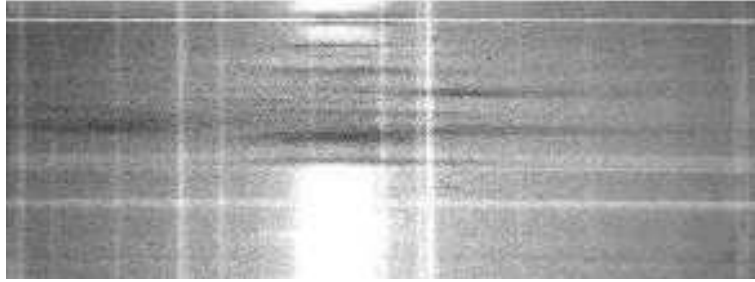


Рис. 13. Спектрограмма вспышки в 5:12:22 UT (негативное изображение). По сравнению с рис. 1 щель сдвинута примерно на половину расстояния до цифры 1

4.7 Синяя асимметрия

На всех стадиях развития в локальных областях вспышки наблюдалась синяя асимметрия профилей линии H_{α} . Она не замещалась красной асимметрией в том же месте, а наблюдалась одновременно с красной асимметрией в других местах вспышки. Примеры профилей линии H_{α} с синей асимметрией приведены на рис. 14.

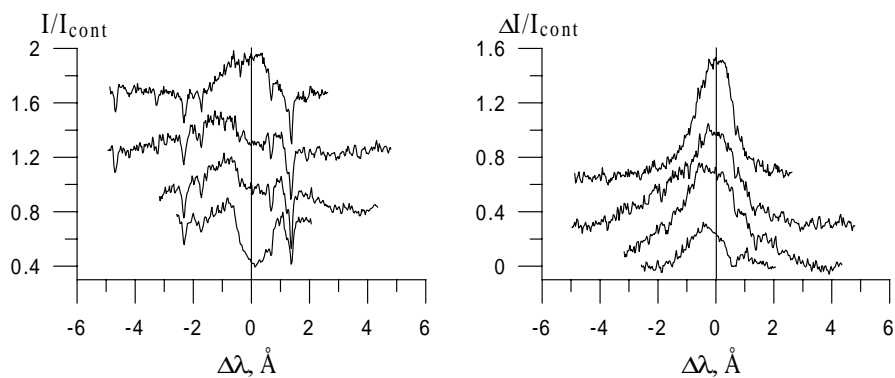


Рис. 14. Профили линии H_{α} в эмиссионных деталях вспышки с синей асимметрией на разных стадиях (снизу вверх: предвспышка, предимпульсная, импульсная и постепенная фазы)

5 Результаты и обсуждение

Наши наблюдения позволяют нам исследовать самую раннюю стадию развития вспышки и на основании анализа профилей линии H_{α} рассмотреть импульсный нагрев хромосферы и динамику лучевых скоростей в местах основного энерговыделения, удаленных узлах вспышки и в верхушке вспышечной петли. Проведено сравнение полученных из наблюдений профилей линии H_{α} в основных вспышечных узлах с профилями, рассчитанными Кэнфилд и др. (1984) для случая нагрева хромосферы нетепловыми электронами. Изучена динамика лучевых скоростей, полученных из асимметрии профилей линии H_{α} , и проведено сравнение результатов с теоретическими расчетами динамики хромосферной конденсации, образованной вследствие взрывного испарения хромосферы (Фишер, 1989). Получены следующие результаты.

Асимметрия профиля H_{α} является общей характеристикой вспышечной эмиссии, независимо от ее интенсивности, принадлежности к разным структурным деталям и фазам развития вспышки.

На всех стадиях развития вспышки в локальных эмиссионных образованиях наблюдалась синяя асимметрия. Синяя асимметрия не замещалась красной асимметрией в том же месте, а существовала одновременно с красной асимметрией в другом месте вспышки.

В местах основного энерговыделения наблюдалась красная асимметрия, которая появилась до начала импульсной фазы. Характер асимметрии изменялся на разных стадиях развития вспышки. В предимпульсной и постепенной фазе вспышки асимметрия характеризовалась значительным преобладанием эмиссии красного крыла, в то время как центральная часть профиля была не смещена или слабо смещена. В максимуме импульсной фазы характер асимметрии изменился: наблюдались практически симметричные профили с протяженными крыльями, которые были смещены в целом в красную область спектра. Смещение профилей соответствовало опусканию всего излучающего объема со скоростью несколько десятков км/с. Центральное обращение профилей, если наблюдалось, было не смещено относительно положения невозмущенной линии, что говорит о том, что оно возникало не во вспышечном объеме, а в вышележащей хромосфере, которая не вовлечена в движения.

Ход интенсивности в крыльях линии не соответствовал штатковскому профилю. Контуры расширены нетепловыми движениями атомов со скоростями 150–200 км/с. Эти наблюдаемые особенности профилей линии H_{α} не согласуются с теоретическими профилями, рассчитанными для случая нагрева хромосферы пучком нетепловых электронов (Кэнфилд и др., 1984; Кэнфилд и Гайлей, 1987).

Исследование динамики движений хромосферного вспышечного вещества во время импульсной фазы показало, что время существования направленных вниз движений и изменение скорости движений со временем не согласуются с предложенной Фишером (1989) моделью динамики хромосферной конденсации. Согласно теоретическим расчетам модели испарения хромосферы (Фишер и др., 1985), конденсация образуется довольно высоко, в верхней хромосфере, поэтому ее движение должно в первую очередь проявляться в центре линии H_{α} , что не подтверждается наблюдениями.

Хромосферное испарение должно происходить в местах накопления энергии, которыми являются основания вспышечных корональных петель, видимых в H_{α} как вспышечные “kernels”. Однако сильно асимметричная эмиссия наблюдалась также во вспышечных элементах, удаленных от мест основного энерговыделения, а движения вещества с наибольшими скоростями были зарегистрированы в верхушке вспышечной петли.

НХR-эмиссия является временным индикатором импульсного нагрева и испарения хромосферы. В этом случае подъем вещества из хромосферы в корону и движение вниз хромосферной конденсации может продолжаться до тех пор, пока наблюдается НХR-эмиссия. В исследуемой нами вспышке красная асимметрия наблюдалась до импульсной фазы и в постепенной фазе вспышки. Это говорит о том, что динамические процессы во вспышечной плазме, а значит и ответственные за них источники энергии, существовали до импульсного выделения энергии и продолжали действовать после него.

Наблюдения показывают, что поле скоростей во вспышке очень сложное: в тонкоструктурных элементах вспышки существуют локальные доплеровские движения (Бабин и Коваль, 2009). Наблю-

даемая эмиссия в каждый момент может определяться наложением эмиссий неразрешаемых короткоживущих элементов с локальными доплеровскими скоростями, вклад которых в общую эмиссию изменяется со временем, что следует учитывать при построении физической модели вспышки.

6 Заключение

Наши результаты анализа H_{α} -спектров вспышки балла 2В/М2.3, полученных в предимпульсной, импульсной и постепенной фазах вспышки, показывают, что многие особенности H_{α} -профилей и динамики поля скоростей не согласуются со стандартным сценарием испарения хромосферы.

Литература

- Антонучи и др. (Antonucci E., Gabriel E.H., Feldman U., Doshek G.A., Kreplin R.V., Mariska J.T.) // *Astrophys. J.* 1980. V. 241. P. 1175.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1985. Т. 72. С. 142.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1987. Т. 77. С. 9.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2002. Т. 98. С. 27.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2005. Т. 101. С. 107.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2009. (в печати).
- Балларио (Ballario M.C.) // *Mem. Soc. Astron. Ital.* 1963. V. 34. №. 2–4.
- Банин В.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1964. Т. 33. С. 118.
- Банин В.Г. // *Солнечные данные.* 1965. №. 6. С. 47.
- Банин В.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965а. Т. 34. С. 252.
- Вальдмайер (Waldmeier M.) // *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung.* 1941. P. 197.
- Вюльсер, Марти (Wulser J-P., Marti H.) // *Astrophys. J.* 1989. V. 341. P. 1088.
- Двivedи и др. (Dwivedi B.N., Hudson H.S., Kane S.R., Svestka Z.) // *Solar Phys.* 1984. V. 90. P. 331.
- Де ла Божардые и др. (De la Beaujardiere J-F., Kiplinger A.L., Canfield R.C.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 401. P. 761.
- Джефферис и др. (Jefferies J.T., Smith E.v.P., Smith H.J.) // *Astrophys. J.* 1959. V. 129. P. 146.
- Джи и др. (Ji G.P., Kurokawa H., Fang C., Huang Y.R.) // *Solar Phys.* 1994. V. 149. P. 195.
- Ичимото, Курокава (Ichimoto K., Kurokawa H.) // *Solar Phys.* 1984. V. 93. P. 105.
- Казачевская Т.В., Северный А.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1958. Т. 19. С. 46.
- Кауззи и др. (Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L.A.) // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 306. P. 625.
- Костюк Н.Д., Пикельнер С.Б. // *Астрон. журн.* 1974. Т. 51. С. 1002.
- Кэнфилд и др. (Canfield R.C., Gunkler T.A., Ricchiazzi P.J.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 282. P. 296.
- Кэнфилд, Гунклер (Canfield R.C., Gunkler T.A.) // *Astrophys. J.* 1985. V. 288. P. 353.
- Кэнфилд, Гайлей (Canfield R.C., Gayley K.G.) // *Astrophys. J.* 1987. V. 322. P. 999.
- Кэнфилд и др. (Canfield R.C., Zarro D.M., Metcalf T.R., Lemen J.R.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 348. P. 333.
- Лившиц и др. (Livshits M.A., Badalyan O.G., Kosovichev A.G., Katsova M.M.) // *Solar Phys.* 1981. V. 73. P. 269.
- Нюперт (Neupert W.M.) // *Astrophys. J. (Letters).* 1968. V. 153. P. L59.
- Северный А.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1959. Т. 21. С. 131.
- Северный А.Б., Коваль А.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1961. Т. 26. С. 3.
- Сомов и др. (Somov B.V., Syrovatskii S.I., Spektor A.R.) // *Solar Phys.* 1981. V. 73. P. 145.
- Танг (Tang F.) // *Solar Phys.* 1983. V. 83. P. 15.
- Фишер (Fisher G.F.) // *Astrophys. J.* 1989. V. 346. P. 1019.
- Фишер и др. (Fisher G.F., Canfield R.C., McClymont A.N.) // *Astrophys. J.* 1985. V. 289. P. 425. P. 434.
- Фритцова (Fritzova L.) // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1960. V. 11. P. 177.
- Швестка (Svestka Z.) // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1951. V. 2. P. 100. P. 120.

Швестка (Svestka Z.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1960. V. 11. P. 167.

Швестка (Svestka Z.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1961. V. 12. P. 73.

Швестка и др. (Svestka Z., Kopecky M., Blaha M.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1962. V. 13. P. 37.

Эллисон (Ellison M.A.) // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1949. V. 109. P. 23.