

УДК 523.98

Морфологические, эволюционные и спектральные особенности и энергетика белой вспышки 26 июня 1999 г.

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 14 января 2005г.

Аннотация. Анализируются H_{α} монохроматические и спектральные (655.5 – 658.2 нм) наблюдательные данные вспышки 26 июня 1999 г. балла 2В/М2.3, которая дала излучение в оптическом континууме. Оптические наблюдения получены с временным разрешением 5-10 сек при хорошем качестве изображений. Исследуется морфология и эволюция вспышки в H_{α} , положение, временное развитие, спектр и энергетика ядра, давшего излучение в белом свете. Проведено сравнение кривых развития вспышки в H_{α} , оптическом континууме, мягком и жестком рентгеновском излучении (по данным GOES и YONKON) и микроволновом радиоизлучении 2.95 ГГц (по наблюдениям станции Зименки, Нижний Новгород).

В развитии H_{α} вспышки четко определяются четыре стадии: а) стадия хромосферного предвестника, б) предимпульсный нагрев, в) импульсный нагрев, г) фаза затухания. Короткоживущие H_{α} яркие узелки, появившиеся в активной области за несколько минут до начала вспышки, – хромосферные предвестники вспышки, – были расположены на значительном расстоянии от места основного энерговыделения в импульсной фазе. Наблюдается хорошее соответствие кривых развития предвспышечных H_{α} узелков и хода со временем излучения мягкого рентгена (коронального предвестника). Основные очаги вспышки были расположены в области выхода нового магнитного потока. В начале развития вспышки три структуры разного размера и ориентации были вовлечены во вспышечный процесс. Постепенное усиление интенсивности вспышечных узлов происходило до появления импульсных всплесков, указывая на предимпульсный нагрев хромосферы. Кривая развития жесткого рентгеновского излучения содержала несколько импульсных всплесков. С каждым из них связаны изменения конфигурации основных H_{α} вспышечных узлов, импульсные усиления их яркости и одновременное разгорание новых узлов и узелков, расположенных на большем или меньшем расстоянии от них. Ядро вспышки, давшее излучение в континууме, было расположено в месте пересечения двух вспышечных петель: начальной и вновь вспыхнувшей. Излучение в континууме было зарегистрировано через 3.5 мин после начала вспышки, и его максимум совпадал по времени с третьим всплеском излучения жесткого рентгена в диапазоне энергий 33 – 53 keV, который не был самым мощным. Наблюдалось хорошее соответствие кривой развития вспышки в континууме с ходом излучения постепенного компонента жесткого рентгеновского излучения в области энергий 14 – 23 keV. Непрерывное излучение было неполяризовано. Полная протяженность эмиссионных крыльев линии H_{α} в месте излучения континуума достигала 2.6 нм, полуширина профиля составляла 0.6 нм. Происходило опускание излучающего объема с лучевой скоростью 30 км с⁻¹. Мощность излучения вспышки с единицы площади в континууме в области λ 658.0 нм $E = 1.1 \cdot 10^7$ эрг см⁻² с⁻¹ нм⁻¹ была того же порядка величины, что и у очень мощных вспышек 7 августа 1972 г. и 15 июня 1991 г., хотя вспышка по своему излучению в H_{α} , мягком и жестком рентгене и микроволновому

излучению не принадлежала к классу самых энергичных вспышек.

MORPHOLOGICAL, EVOLUTIONAL AND SPECTRAL PECULIARITIES AND ENERGETICS OF THE WHITE LIGHT FLARE OF 26 JUNE 1999, *by A.N. BABIN and A.N. KOVAL*. We analyse H_{α} monochromatic and spectral (655.5-658.2 nm) observational data for the 1999 June 26 2B/M2.3 solar flare, which showed an optical continuum emission. Optical observations were obtained with a time resolution 5 – 10 s under good seeing. We investigate a morphology and evolution of the H_{α} flare, location, temporal behaviour, spectrum and energetics of the white light flare (WLF) kernel. Time histories of flare in H_{α} , optical continuum, soft X-rays (from GOES), microwaves at 2.95 GHz (from Zimenky) and hard X-rays (from Yohkoh) are compared.

Four stages of the flare development distinctly obtained from the analysis: a) stage of chromospheric precursor, b) preimpulsive heating, c) impulsive heating, d) decay phase. The transient H_{α} bright points seen in the precursor phase some minutes before the start of the flare were quite distant from the main energy release site of the impulsive phase. Intensity light curves of the H_{α} bright points are in a good agreement with the soft X-rays time profiles of the coronal precursor. Flare was erupting inside the region of new magnetic flux emergence. Three structures of different size and orientation were involved in the flaring process at the early stage. A gradual intensity enhancement of the flare kernels takes place before the impulsive spikes appearance indicating the preimpulsive heating of the chromosphere. The hard X-rays profile reveals multiple impulsive features, which are temporally associated with the change of the configuration and impulsive brightening of the main flare H_{α} kernels and simultaneous flaring of new kernels and loops, which were quite distant from main impulsive kernels. WLF emission is observed at the place of the intersection of preexistent and new flaring H_{α} loops. It peaks within third hard X-ray spike, which is not the largest one. The light curve of the WLF kernel is correlated to the time profile of 14 – 23 keV hard X-ray gradual component. The continuum emission is unpolarized. The H_{α} emission profile has a broad emission wings (overall extension of about 2.6 nm, halfwidth 0.6 nm) and central reversal. The descent of the emission volume with a line-of-sight velocity 30 km/s takes place. This event, while not the most powerful of flares, does have the emission rate in continuum at 658.0 nm $E=1.1 \cdot 10^7 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{nm})$, that compares well with large 1991 June 15 and 1972 August 7 white light flares.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, механизмы нагрева

1 Введение

Появление свечения в оптическом континууме во время солнечных вспышек еще недавно считалось редким явлением. В 1989 г. небольшой патрульный телескоп во время максимума солнечной активности зарегистрировал за год всего 15 случаев свечения вспышек в оптическом континууме. Возможно, это связано с малым размером излучающего объема (несколько угловых секунд) и небольшой продолжительностью свечения – от нескольких десятков секунд до нескольких минут (Нейдиг, 1989). Традиционно считалось, что видимые в белом свете вспышки относятся к самым мощным двухленточным событиям. Однако с улучшением качества наблюдений было обнаружено, что многие вспышки рентгеновского класса X излучают в оптическом континууме (Хадсон и др., 1992; Нейдиг и др., 1993а; Хадсон и др., 1994).

До сих пор не выяснены как механизм возбуждения излучения в оптическом континууме, так и глубина, из которой излучение исходит. В большинстве случаев предполагается, что источник непрерывной эмиссии расположен довольно глубоко в солнечной атмосфере: в нижней хромосфере или верхней фотосфере (Нейдиг, 1989). Бабиным и др. (1998) показано, что наблюдаемое усиление яркости континуума в сторону коротких длин волн во вспышке 15 июня 1991 г. можно объяснить, если источником непрерывного излучения является горячий слой с температурой свыше 30000 К, расположенный на оптической глубине больше единицы (в нижней фотосфере).

Увеличение яркости континуума создает ряд трудностей при построении моделей вспышек и определении механизмов переноса энергии в нижние слои хромосферы и фотосферу. Классические формы переноса энергии из вспышечной короны в хромосферу, а именно, теплопроводность и пучок нетепловых электронов, привлекаемые для объяснения свечения в оптическом континууме, встречаются со значительными трудностями (Матхенк и др., 1998).

Вспышка 26.06.1999, давшая эмиссию в оптическом континууме, представляет особый интерес, так как по своим наблюдательным параметрам отличается от традиционных белых вспышек. Это была компактная вспышка рентгеновского класса М, которая произошла в довольно простой конфигурации пятен в области выхода нового магнитного потока. В настоящей статье представлены результаты анализа монохроматических и спектральных наблюдений вспышки 26.06.1999. Наблюдения получены с хорошим временным и пространственным разрешением, что дает возможность изучить морфологию и эволюцию вспышки и выяснить, каким образом и на какой стадии ее развития формируется область, давшая излучение в оптическом континууме.

2 Наблюдения и анализ

Исследуемая вспышка (оптический балл 2В, рентгеновский класс М2.3) произошла вблизи центра солнечного диска (координаты N23, E03) в активной области NOAA 8598. Согласно Solar Geophysical Data (1999) вспышка началась в 05:08 UT и достигла максимума в 05:12 UT. На коронографе КГ-2 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» фотографические поляризационные наблюдения активной области были начаты в 04:50 UT. Использовалась оптическая система, позволяющая одновременно получать четыре изображения спектра в области H_{α} во втором и третьем порядках дифракционного спектрографа через анализаторы линейной поляризации, плоскости поляризации которых различались на 45 градусов (Бабин, Коваль, 1987). Наблюдался спектральный участок 655.5 – 658.2 нм во втором порядке и 655.7 – 657.4 нм в третьем. Одновременно со спектрами при помощи камеры РФК-5 и H_{α} фильтра регистрировалось изображение Солнца на щели спектрографа. Это позволяло отождествлять положение щели спектрографа в активной области при каждой экспозиции и изучать морфологические особенности вспышки. Диаметр изображения Солнца на щели спектрографа около 12 см. Качество изображений было хорошее, что позволило получить на лучших кадрах пространственное разрешение около 1 угл. сек. Наблюдения охватывают предвспышечную, начальную, импульсную и частично послемаксимальную фазу вспышки (04:50 – 05:15.5 UT). Спектрограммы и H_{α} снимки во время вспышки получались с интервалом 5 – 10 с.

Область NOAA 8598 была западной частью большого активного комплекса, состоящего из нескольких групп пятен, которые находились на разной стадии развития. Вспышка произошла к северу от ведущего пятна N-полярности в том месте, где по наблюдениям магнитных полей пятен в КраО 26 июня происходил выход нового магнитного потока в виде небольших пятен как северной, так и южной полярности. Структура магнитного поля в месте выхода нового магнитного потока, как следует из картины хромосферных волоконцев, была сложной. Перед вспышкой в этой части активной области наблюдалось несколько систем волоконцев и большое волокно, которое своим западным концом вклинивалось в эту сложную систему волоконистых структур. Схематическое изображение волоконистых структур в активной области, видимых в H_{α} в 04:50 – 05:04 UT, представлено на рис. 1.

3 Основные особенности структуры и развития вспышки

По структуре вспышку можно отнести к классу компактных, в которых вспыхивают уже существующие низко расположенные петли и системы петель. В отличие от двухленточных у них не наблюдается заметных макроскопических движений вспышечных лент. Согласно Дживеди и др. (1984) компактные вспышки балла $\geq 1В$ встречаются довольно редко.

По характеру развития вспышка представляла собой сложный процесс энерговыделения, охвативший большую часть активной области. В развитии вспышки можно выделить четыре стадии

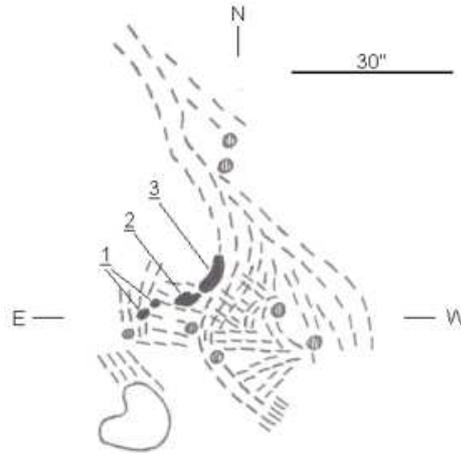


Рис. 1. Схематическое изображение структуры хромосферных волокон к северу от ведущего N-пятна активной области NOAA 8598 (контур тени пятна – слева внизу), предвспышечных уярчений (узелки со штриховкой) и основных вспышечных узлов 1, 2, 3

энерговыведения, которые четко видны в H_{α} излучении: 1) хромосферный предвестник вспышки; 2) предимпульсный нагрев основных вспышечных узлов; 3) импульсный нагрев хромосферы; 4) послеприпульсная фаза. Рассмотрим особенности H_{α} излучения в каждом из выделенных периодов.

3.1 Хромосферный предвестник вспышки

Яркие образования, появившиеся в H_{α} в нескольких местах активной области в 05:01 UT, явились первым свидетельством ее неустойчивости. Это были узелки небольшого размера и средней яркости. Положение предвспышечных уярчений в 05:01 – 05:04 UT отмечено на рис. 1. Эти источники H_{α} эмиссии располагались на заметном расстоянии друг от друга и от местоположения основных вспышечных узлов в импульсной фазе. Сопоставление с предвспышечной структурой хромосферных волокон в активной области показывает, что предвспышечные уярчения появились в местах укоренения нескольких систем волокон. Некоторые из этих уярчений быстро угасали, другие существовали на протяжении всего периода наблюдений, образуя небольшие, относительно слабые эмиссионные волокна. Спектральные наблюдения показали, что в этих эмиссионных узелках наблюдалось несколько видов излучения в H_{α} : симметричная эмиссия с короткими крыльями, эмиссия с синей или красной асимметрией, односторонние эмиссионные выбросы в синюю или красную сторону спектра, а также эмиссия типа усов с синей асимметрией. Для некоторых основных H_{α} уярчений были построены световые кривые. Определим, являются ли эти уярчения хромосферным предвестником вспышки.

Ранее Вебб(1985), а также Мачадо и др. (1988) при анализе наблюдений, полученных на Skylab и SMM, обнаружили существование корональных предвестников вспышек, проявляющихся в излучении мягкого рентгена. Наблюдения показали, что перед началом многих вспышек появляется кратковременное усиление излучения в мягком рентгене за несколько минут до начала вспышки. Пространственное совпадение между корональными предвестниками и основными местами выделения энергии во вспышке всегда частичное. Согласно наблюдениям GOES во вспышке 26.06.1999 в излучении мягкого рентгена наблюдался корональный предвестник. Сравним временной ход излучения хромосферных предвспышечных уярчений в H_{α} и коронального предвестника в мягком рентгене. На рис. 2 представлены световые кривые нескольких узелков предвспышечных уярчений в H_{α} и поток мягкого рентгеновского излучения в полосе 0.5–4.0 Å по наблюдениям GOES. Как видим, световые кривые излучения хромосферных слоев согласуются с SXR световой кривой. Не наблюдается запаздывание максимума свечения хромосферной эмиссии относительно корональной.

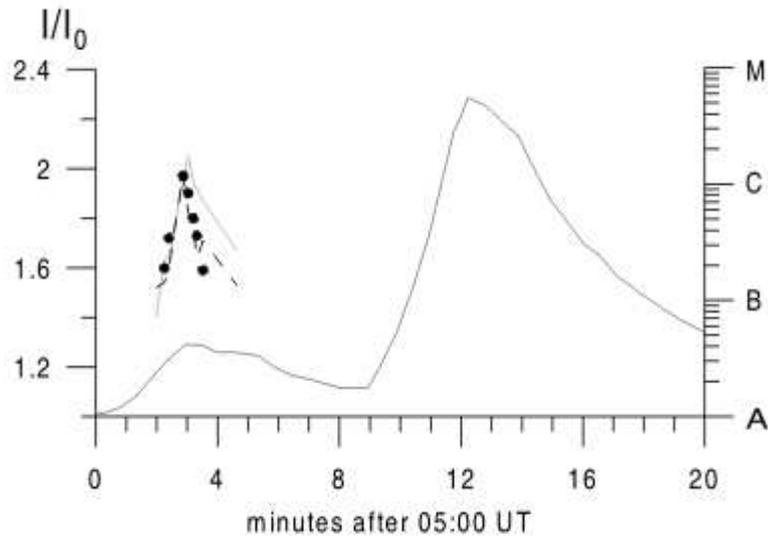


Рис. 2. Световые кривые трех предвспышечных уярчений в H_{α} (в интервале 2-5 минут, левая шкала; I_0 – интенсивность соседней невозмущенной хромосферы) и поток мягкого рентгеновского излучения в полосе 0.5-4Å по наблюдениям GOES (правая шкала)

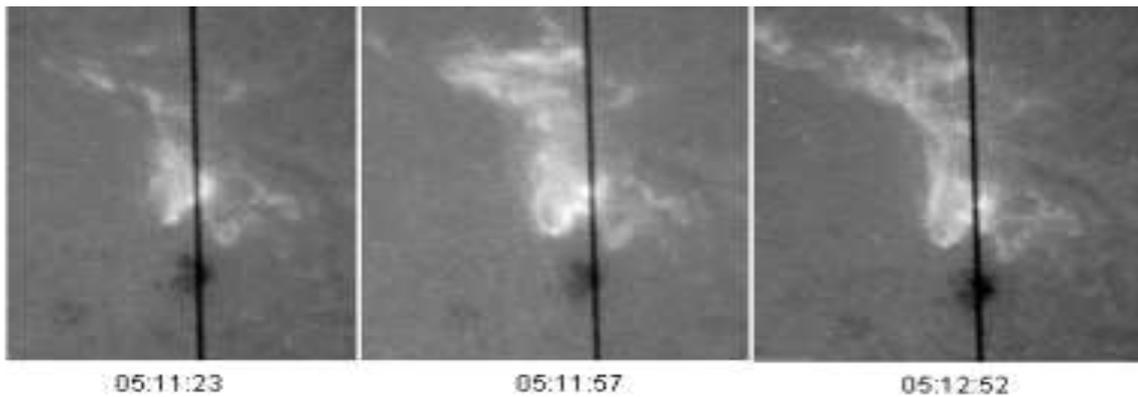


Рис. 3. Фильтрограммы вспышки 26.06.1999 в начальной, импульсной и послеперимпульсной фазах (вертикальная линия – щель спектрографа)

3.2 Предимпульсный нагрев хромосферы

Из-за проходящих облаков наблюдения на КГ-2 были прерваны в 05:04:39 и возобновлены в 05:10:31 UT. В это время в активной области уже начала разгораться вспышка. На рис. 3 приведены фотографии вспышки в начальной, максимальной и послемаксимальной фазах развития в свете линии H_{α} . Изображения вспышки на первых кадрах показывают, что во вспышечный процесс были вовлечены три структуры. Они имели разный размер и разную ориентацию, но располагались на очень близком расстоянии друг от друга. Зарисовки расположения вспышечных узлов в разные моменты времени представлены на рис. 4. Была проведена фотометрическая обработка H_{α} изображений вспышки и построены кривые яркости вспышечных узлов. При фотометрировании на каждом кадре измерялось самое яркое место данного узла.

На рис. 5 приведены H_{α} световые кривые трех основных вспышечных узлов, излучение в мягком и жестком рентгене, а также отмечен момент микроволнового всплеска. Как видно из рис. 5, в 05:10:31 UT, когда были возобновлены наблюдения на КГ-2, интенсивность излучения в центре

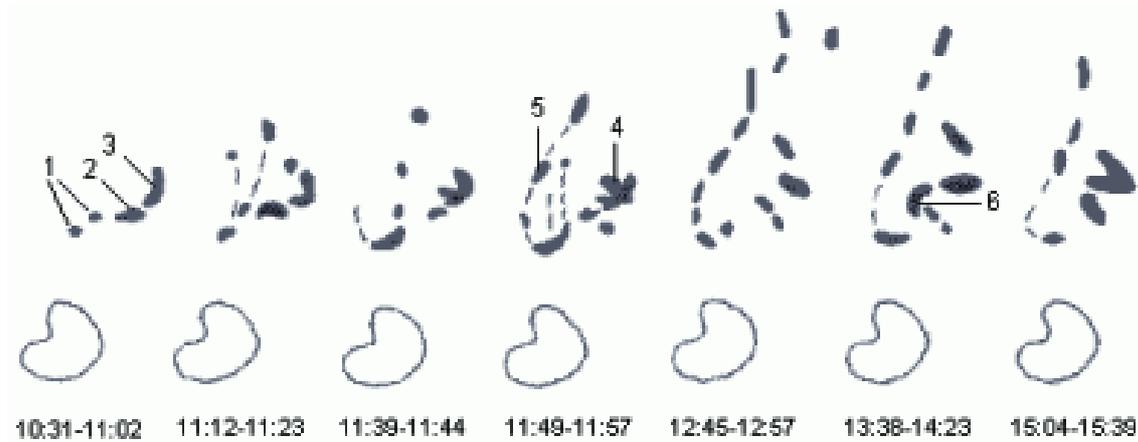


Рис. 4. Зарисовки основных вспышечных узлов относительно ведущего N-пятна в указанные промежутки времени (минуты и секунды после 05:00 UT)

линии H_{α} вспышечных узлов уже достигла заметной величины, оставаясь на этом уровне или слабо увеличиваясь на протяжении 40 сек до импульсного HXR всплеска. SXR световая кривая по данным GOES (см. рис. 2) показывает, что связанное со вспышкой усиление излучения в мягком рентгене началось в 05:09 UT, т.е. примерно за 2.5 мин до появления импульсного жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, анализ приведенных на рис. 2 и рис. 5 данных показывает, что нагрев хромосферы и короны предшествовал импульсной фазе вспышки, определяемой появлением всплесков в микроволновом и жестком рентгеновском излучении.

3.3 Импульсный нагрев хромосферы

Связанное со вспышкой жесткое рентгеновское излучение в канале L (14 – 23 keV) и в канале M2 (33 – 53 keV) по данным YОНКОН представлено на рис. 5. Как видно из временного профиля HXR в области энергий 14 – 23 keV, на медленно меняющийся компонент накладываются 6 всплесков, которые наблюдаются как во время подъема, так и спада интенсивности потока. В канале M2 (33 – 53 keV) HXR излучение состоит из трех коротких (продолжительностью до 10 сек) импульсных всплесков разной интенсивности. Согласно классификации Баи и Стуррока (1989) такие кривые развития HXR характерны для тепловых HXR вспышек. Для тепловых HXR вспышек нет четкого разделения между импульсным и постепенным тепловым компонентом, который представляет тормозное излучение плазмы с температурой порядка $30 \cdot 10^6$ К.

Развитие вспышки в H_{α} излучении во время импульсной фазы можно разделить на три периода. Первый период, 5:11:12 – 5:11:30 UT, связан с первым импульсным всплеском HXR. Происходит импульсное усиление яркости основных вспышечных узлов 1, 2, 3, а также вспыхивают новые узелки к северу от узла 1 и к северо-востоку от узла 3, а также петли, связывающие их с узлами 1 и 2. Узлы 2 и 3 заметно изменяют форму. В 5:11:30 UT новые узелки и петли практически угасли.

Второй период, 5:11:39 – 5:12:00 UT, связан с более мощными HXR всплесками. В это время наблюдаются существенные изменения в основных вспышечных узлах. В 5:11:39 UT узел 1 разгорается в юго-восточном направлении. Происходит скачкообразное изменение положения максимума свечения в узле 2 на 1.5 угл. сек. В узле 3 начинает ярчать область в 1.5 угл. сек от его южного основания. Анализ H_{α} снимков показал, что это разгорается новый вспышечный узел 4, ориентированный перпендикулярно к уже существующему узлу 3. К 5:11:57 UT, момент, близкий к максимуму вспышки, эмиссия нового узла стала преобладающей. В месте пересечения нового узла 4 и прежнего узла 3 в 5:11:57 – 5:12:33 UT зарегистрировано свечение в оптическом континууме. Кроме отмеченных изменений в основных вспышечных узлах, в 5:11:44 – 5:11:57 UT вспышка быстро распространяется

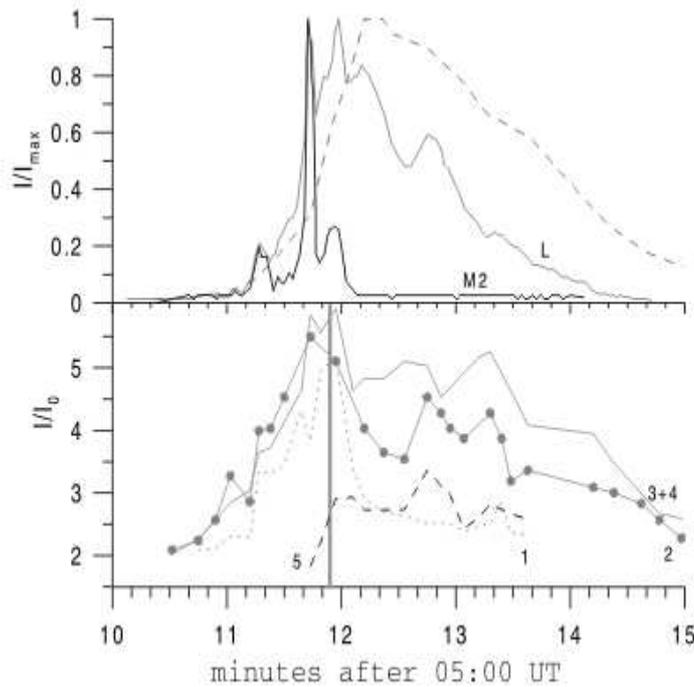


Рис. 5. Световые кривые SXR (GOES – штриховая кривая) и HXR (YONKOH) в каналах L и M2 (наверху), а также вспышечных H_{α} узлов 1 – 5 (внизу), здесь же вертикальной линией отмечен момент максимума радиоизлучения 2.95 ГГц (Зименки)

в северном направлении от узла 1. Вспыхивает яркая цепочка узелков и петель, соединяющих их. Также вспыхивает небольшой узел к юго-западу от узла 2 (см. рис. 4).

Третий период, 5:12:06 – 5:14:23 UT, – период спада интенсивности потока излучения жесткого рентгена в области энергий 14–23 keV, как следует из рис. 5, не был монотонным. В этот период в H_{α} излучении наблюдаются пульсации яркости основных вспышечных узлов и возгорание новых узелков и петель. Разгорается узелок к северо-востоку от узла 3+4 и узелок и петля к северу от узла 1 (5:12:06 – 5:12:22 UT). В 5:13:20 – 5:13:30 UT появляется новый узел 6 к юго-востоку от узла 4, ориентированный почти перпендикулярно к нему. В 5:14:23 UT этот узел стал самым ярким. В этот же период изменяется ориентация узла 4. Как показывает сравнение кривых развития, индивидуальные пики в излучении жесткого рентгена могут быть идентифицированы с индивидуальными пиками H_{α} световых кривых вспышечных узлов.

Суммируя результаты исследования морфологии и временного развития вспышки в линии H_{α} в течение импульсной фазы, можно сказать, что с каждым импульсным всплеском в жестком рентгене связаны изменения конфигурации основных вспышечных узлов и импульсный рост их яркости. Происходит также одновременное разгорание узелков, расположенных на большем или меньшем удалении от них. Наблюдаемые внезапные сдвиги максимумов свечения в узлах, изменение их конфигурации, разгорание новых узлов с другой ориентацией указывают на то, что выделение энергии происходило в тонкоструктурных элементах, которые включались во вспышечный процесс не одновременно, а на временной шкале порядка десятка секунд. С другой стороны, наблюдались одновременные (в пределах временного разрешения) уярчения основных узлов и узелков, расположенных на заметном расстоянии (см. рис. 5), что может указывать на то, что в активной области действовал какой-то механизм, приводящий к одновременному выделению энергии в различных вспышечных структурах.

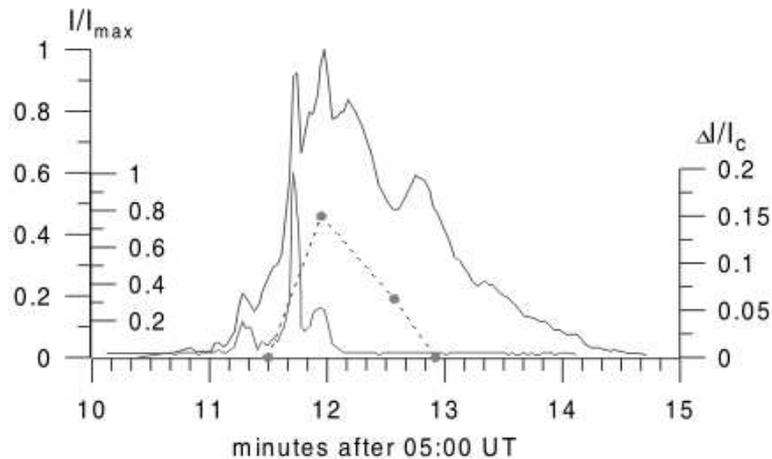


Рис. 6. Изменение контраста вспышки в континууме со временем (пунктир, правая шкала) и световые кривые HXR в каналах L и M2 (левая шкала)

3.4 Послемаксимальная фаза

В послемаксимальной фазе вспышечный процесс захватил большую часть активной области. Ярчали все новые удаленные структуры. Хотя предвспышечный нагрев хромосферы происходил в местах, удаленных от области основного выделения энергии, в послеимпульсный период появились слабые эмиссионные образования, соединяющие вспышечные и предвспышечные очаги эмиссии, что указывает на их взаимосвязь. Интересным явлением было вспышечное уярчение структур волокна, начавшееся одновременно со вспышкой и распространившееся затем почти по всей его длине, и связь основных узлов вспышки с этими структурами. Результаты спектральных наблюдений вспышки будут представлены в отдельной статье. Здесь мы хотим отметить, что на протяжении всех стадий развития вспышка характеризовалась эруптивными выбросами светящейся плазмы. Направление движений было как в синюю, так и в красную сторону спектра. Размер области, из которой исходил выброс, ограничивался несколькими угловыми секундами.

4 Особенности свечения вспышки в оптическом континууме

Преыдущие исследования показали (Хадсон и др., 1992), что имеется три основных типа непрерывной эмиссии: импульсная, постепенная и диффузная в виде движущегося фронта. Наши наблюдения позволяют определить временное развитие излучения в оптическом континууме и путем сравнения с HXR и микроволновым радиоизлучением определить, к какой фазе вспышки, импульсной или постепенной, оно относится. Световая кривая вспышки в континууме представлена на рис. 6, где для сравнения приведено излучение вспышки в жестком рентгене. Из сопоставления этих кривых развития видно, что максимум свечения в континууме совпадает по времени с одним из максимумов излучения в жестком рентгене и примерно на 20 сек (см. рис. 5) предшествует максимуму излучения в мягком рентгене ($0.5 - 4.0 \text{ \AA}$). Следовательно, мы можем классифицировать непрерывное излучение этой вспышки как импульсное.

Отметим некоторые морфологические особенности источника излучения в континууме.

1. С большой степенью вероятности мы можем утверждать, что в данном вспышечном узле наблюдался только один источник непрерывного излучения в западной его части в месте пересечения начальной и вновь вспыхнувшей вспышечной петли. В промежутке времени 5:11:17 – 5:14:47 UT было получено 8 спектрограмм восточной части узла и 6 спектрограмм его средней части. На этих спектрограммах не было обнаружено непрерывного излучения. Часто во вспышках наблюдаются два или более источника излучения в белом свете, расположенных по обе стороны от линии раздела

полярностей магнитного поля. Этот наблюдательный факт давал возможность предполагать, что белые вспышки являются местами укоренения вспышечных петель в фотосферу (Швестка, 1970; Слоним, Коробова, 1975).

2. Ядро непрерывной эмиссии располагалось в области выхода нового магнитного потока. Непрерывное излучение исходило из области вспышки, расположенной у внешней границы небольшого пятна. Ранее было показано (Мак Интош, Донелли, 1972; Швестка, 1970; Слоним, Коробова, 1975; Нейдиг, Кливер, 1983), что наиболее предпочтительным местом появления белых вспышек является внутренняя граница полутени больших пятен магнитного класса δ .

3. Максимальная плотность потока микроволнового радиоизлучения вспышки по наблюдениям станции Зименки (Нижний Новгород) на частоте 2950 МГц составляла 310 SFU (Solar Geophys. Data, 1999). Согласно статистическим исследованиям характерная плотность потока микроволнового излучения для белых вспышек составляет 3500 SFU (Нейдиг, Кливер, 1983).

4. Контраст непрерывного излучения по отношению к соседнему невозмущенному непрерывному спектру $\Delta I/I_c$ в области длин волн λ 658.0 нм составлял 0.15 в 05:11:57 UT.

5. Время жизни источника непрерывного излучения, определенное по полуширине кривой развития, составляет около 60 сек.

6. Размер области, излучающей континуум, определенный по фотометрическим разрезам спектрограммы перпендикулярно направлению дисперсии в момент максимума свечения, равнялся 3 угл. сек.

7. Узел H_α , совпадающий с источником непрерывного излучения, являлся самым ярким и испытывал повторные пульсации яркости. Сравнение кривых развития H_α и оптического континуума показывает, что их максимумы совпадают. Такой же результат получен ранее другими исследователями белых вспышек (Де Мастус, и Стовер, 1967; Мак Интош, Донелли, 1972; Слоним, Коробова, 1975).

8. Непрерывное излучение было зарегистрировано через 3.5 мин после начала вспышки и совпадало по времени с третьим НХР всплеском, мощность которого в диапазоне 33 – 53 keV примерно в 4 раза ниже, чем второго всплеска, не связанного с излучением в оптическом континууме. С другой стороны, ход кривой развития белой вспышки хорошо коррелирует с излучением медленно меняющегося компонента, наблюдаемого в диапазоне энергий 14 – 23 keV.

9. Анализ одновременно полученных с анализатором линейной поляризации четырех изображений спектра, плоскости поляризации которых отличаются на 45° , показал, что непрерывное излучение вспышки не поляризовано (в пределах точности фотографического метода). Отсутствие поляризации говорит о том, что непрерывное излучение вспышки не является синхротронным излучением релятивистских электронов, которое впервые было рассмотрено Северным (1957) в качестве источника непрерывного излучения вспышек.

Несмотря на временное совпадение с одним из НХР всплесков, особенности непрерывного излучения, отмеченные в пунктах 1, 8, 9, трудно согласовать со стандартной моделью белой вспышки, полагающей, что излучение в континууме во время импульсной фазы вызвано нагревом нижней хромосферы нетепловыми электронами. Исследованию связи между излучением в жестком рентгене и белыми вспышками в последнее время уделяется много внимания с точки зрения выяснения вопроса, является ли их свечение результатом переноса энергии из короны в нижнюю хромосферу нетепловыми частицами, или действует другой механизм (Нейдиг, Кейн, 1993; Сильвестер, Сильвестер, 2000; Нейдиг и др., 1993b; Кейн и др., 1985; Риян и др., 1983). В этих работах отмечаются трудности в согласовании наблюдательных данных со стандартной моделью белой вспышки. Так, анализ наблюдений белой вспышки 1 июня 1980 г. (Риян и др., 1983) приводит авторов к заключению, что большая часть (73%) наблюдавшегося в этой вспышке излучения в белом свете не могла быть произведена энергичными частицами.

Сравнение морфологических особенностей пяти белых вспышек, наблюдения которых получены в оптическом континууме и на УОНКОН (в мягком и жестком рентгеновском излучении), показало, что эти эмиссии пространственно разнесены и, возможно, относятся к разным объемам плазмы. Наблюдается лучшая корреляция излучения в континууме с излучением жесткого рентгена в области энергий 14 – 30 keV (Сильвестер Сильвестер, 2000). На основании исследования временного соот-

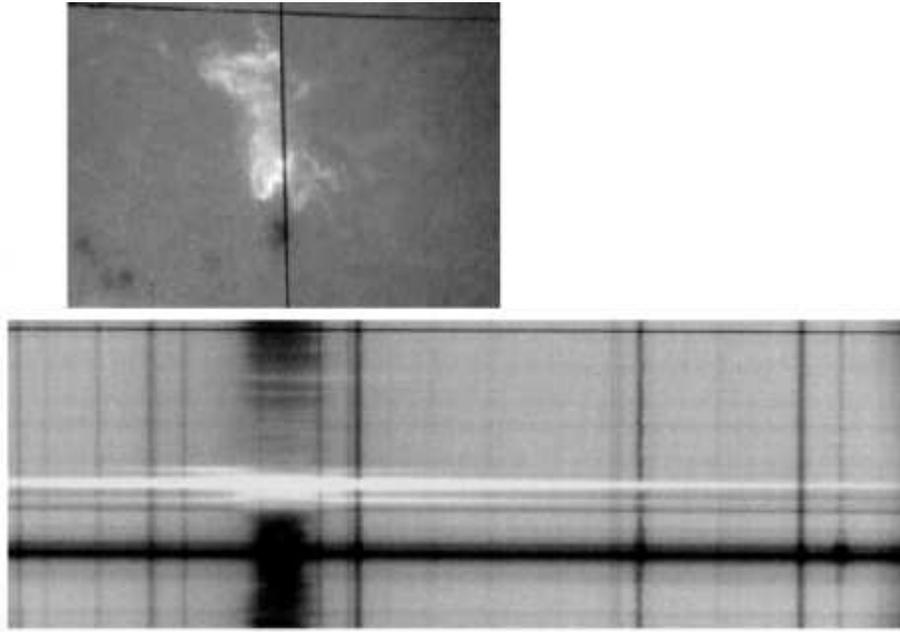


Рис. 7. Спектрограмма вспышки в момент максимума белого свечения (05:11:57 UT) и соответствующий H_{α} снимок от щели спектрографа

ветствия и энергетики излучения в континууме и жестком рентгене во вспышке 24 апреля 1981 г. (Кейн и др., 1985) авторы делают вывод о том, что если энергия из короны переносится электронами с энергией > 25 keV, тогда импульсный источник излучения в белом свете должен представлять собой сверхплотную область, расположенную несколько выше уровня невозмущенной хромосферы с плотностью водорода 10^{14} см $^{-3}$. В исследуемой нами вспышке непрерывное излучение исходило из места пересечения уже существующего и нового вспышечного узла.

5 Спектр белой вспышки и энергетика

Ядра вспышек, излучающие непрерывную эмиссию, по спектральным характеристикам можно разделить на два класса (Мачадо и др., 1986), физическая природа свечения которых, по-видимому, различна. Первый тип – это наиболее яркие образования с сильными бальмеровскими линиями с центральным обращением. Ко второму типу относятся ядра с усилением континуума, но слабыми узкими бальмеровскими линиями.

По своим спектральным характеристикам вспышка 26.06.1999 г. должна быть отнесена к первому типу белых вспышек. На рис. 7 представлен спектр ядра вспышки, излучающего континуум, в момент, близкий к максимуму. На рис. 8 приведены фотометрические записи спектра белой вспышки и соседней невозмущенной фотосферы. В месте свечения континуума профиль линии H_{α} имеет центральное обращение и очень протяженные крылья. Полная протяженность эмиссионных крыльев достигает 2.6 нм. Профиль H_{α} симметричный, но сдвинут в красную область спектра на 0.065 нм, что указывает на опускание излучающего объема с лучевой скоростью 30 км с $^{-1}$. Яркость эмиссионных пиков достигает 2.9 интенсивности непрерывного спектра невозмущенной фотосферы. Полуширина профиля 0.6 нм. Такие же особенности спектра были обнаружены нами у одной из самых мощных белых вспышек 15 июня 1991 г. (Бабин, Коваль, 1993).

Оценим энергетические характеристики вспышки. Из фотометрических разрезов спектра, полученного в 5:11:57 UT, в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии, в области 658.0 нм была определена интенсивность непрерывной эмиссии и ее контраст. Предполагая, что контраст не

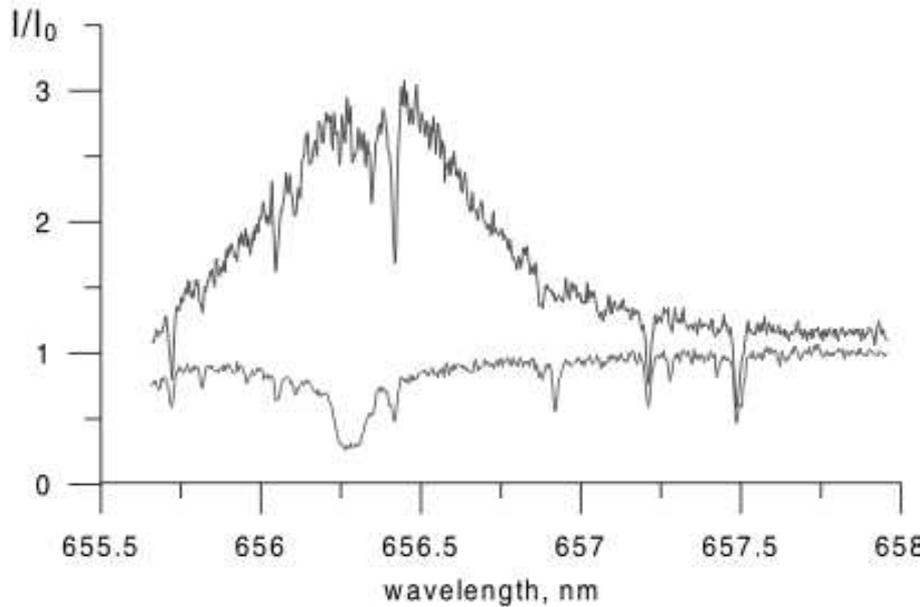


Рис. 8. Фотометрическая запись спектра ядра вспышки, излучающего континуум, и соседней невозмущенной фотосферы

зависит от угла зрения, и используя данные Макаровой и др. (1991), мы определили E – мощность излучения в континууме единицы площади ядра белой вспышки в этом спектральном диапазоне, которая представлена в таблице. Для сравнения в ней же приведены данные об излучении в континууме во вспышках 7 августа 1972 г. (Раст, Хегвер, 1975) и 15 июня 1991 г. (Бабин и др., 1998).

Таблица 1. Данные о белых вспышках

Дата	λ , нм	E , эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{нм}^{-1}$
07.08.1972	590.0	$(0.8 - 1.4) \cdot 10^7$
15.06.1991	658.0	$1.5 \cdot 10^7$
26.06.1999	658.0	$1.1 \cdot 10^7$

Из сравнения видно, что несмотря на то, что по H_{α} , рентгеновскому и микроволновому излучению вспышка не принадлежала к классу наиболее сильных явлений, мощность излучения в оптическом континууме с единицы площади, которая является наиболее важной величиной при определении механизма нагрева, была того же порядка, что и у самых мощных белых вспышек.

6 Заключение

Проведены анализ оптических наблюдений в H_{α} белой вспышки 26.06.1999, полученных с высоким временным и пространственным разрешением, и сравнение с излучением в жестком и мягком рентгене.

1. Все особенности энергосвободения во время вспышки прослеживаются в H_{α} излучении.
2. Вспышка происходит не в изолированной магнитной структуре, а представляет собой растянутый во времени сложный процесс энергосвободения, который охватывает большую часть активной области. Появление хромосферного предвестника, H_{α} уярчений, на значительном удалении

от импульсных узлов указывает на то, что нестабильность магнитного поля активной области начиналась вдали от мест основного энерговыделения. Основные вспышечные узлы находились в области выхода нового магнитного потока. Нагрев хромосферы и короны начался до импульсной фазы вспышки. Исходя из постепенного уярчения вспышечных узлов в H_{α} и усиления излучения в мягком рентгене, можно предположить, что нагрев хромосферы в предимпульсной фазе осуществлялся теплопроводностью.

3. Исследование морфологии и эволюции H_{α} уярчений во время импульсной фазы показало, что импульсное выделение энергии происходило в тонкоструктурных элементах вспышечных узлов, которые включались во вспышечный процесс не одновременно, а на временной шкале порядка десятка секунд. Хорошее временное соответствие между всплесками жесткого рентгена и импульсными уярчениями H_{α} узлов указывает на то, что во время импульсной фазы имели место несколько случаев ускорения электронов, которые производили излучение в жестком рентгене и импульсный нагрев хромосферы. Уярчение удаленных хромосферных структур и структур волокна, а также проявляющиеся связи этих структур с импульсными узлами вспышек говорит о том, что вспышечный процесс в активной области носил глобальный характер.
4. Излучение вспышки в оптическом континууме имело ряд особенностей: один источник непрерывной эмиссии, отсутствие поляризации, временное совпадение максимума свечения с более слабым всплеском жесткого рентгена (канал M2, 33 – 53 keV), хорошее соответствие световой кривой ходу излучения постепенного компонента жесткого рентгеновского излучения в области энергий 14 – 23 keV). Эти особенности трудно согласовать со стандартной моделью белой вспышки, в которой предполагается, что излучение в континууме вызвано нагревом нижней хромосферы нетепловыми электронами.
5. Мощность излучения в оптическом континууме с единицы площади в исследуемом спектральном интервале составляла $1.1 \cdot 10^7$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$ и была близка к той, которая наблюдалась у самых сильных белых вспышек, хотя по рентгеновскому и микроволновому излучению вспышка не отличалась от обычных средних вспышек.

Может оказаться, что при наблюдении вспышек с высоким временным и пространственным разрешением количество вспышек с излучением в оптическом континууме существенно возрастет. И тогда еще больше усложнятся энергетические проблемы стандартной модели белых вспышек.

Авторы благодарны сотрудникам НИРФИ (Нижегород, Россия) за предоставление данных о микроволновом радиоизлучении 2.95 ГГц для вспышки 2В/М2.3 и А.В. Тибейкину за помощь в расшифровке данных наблюдений жесткого рентгеновского излучения на ЮНКОН.

Литература

- Бабин А.Н., Барановский Э.А., Коваль А.Н., Калман Б., Герлеи О. // Кинематика и физика небес. тел. 1998. Т. 14. N. 4. С. 330.
- 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. 1993. Т. 88. С. 60.
- Баи и Стуррок (Bai T. and Sturrock P.A.) // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1989. V. 27. P. 421.
- Вебб (Webb D.F.) // Solar Phys. 1985. V. 97. P. 321.
- Де Мастус и Стовер (DeMastus H.L. and Stover R.) // Publ. Astron. Soc. Pac. 1967. V. 79. P. 615.
- Двиеди и др. (Dwivedi B.N., Hudson H.S., Kane S.R. and Svestka Z.) // Solar Phys. 1984. V. 90. P. 331.
- Кейн и др. (Kane S.R., Love J.J., Neidig D.F. and Cliver E.M.) // Astrophys. J. Let. 1985. V. 290. P. L45.
- Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. // Поток солнечного излучения. М.: Наука. 1991.
- Мак Интош и Донелли (McIntosh P. and Donnelly R.P.) // Solar Phys. 1972. V. 29. P. 444.
- Матхенк и др. (Matthenc S.A., Brown J.C., Van Driel-Gesztelyi L.) // Astron. Astrophys. 1998. V. 340. P. 277.
- Мачадо и др. (Machado M.E., Emslie H.G. and Mauas P.J.) // Astron. Astrophys. 1986. V. 159. P. 33.

- Мачадо и др. (Machado M.E., Moor R.L., Hermander A.M. et al.) // *Astrophys. J.* 1988. V. 326. P. 423.
- Нейдиг (Neidig D.F.) // *Solar Phys.* 1989. V. 121. P. 361.
- Нейдиг и Кливер (Neidig D.F. and Cliver E.W.) // *Solar Phys.* 1983. V. 88. P. 275.
- Нейдиг и др. (Neidig D.F., Wiborg P.H. and Gillian L.B.) // *Solar Phys.* 1993a. V. 144. P. 169.
- Нейдиг и др. (Neidig D.F., Kiplinger A.L., Cohl H.S. and Wiborg P.H.) // *Astrophys. J.* 1993b. V. 406. P. 306.
- Нейдиг и Кейн (Neidig D.F. and Kane S.A.) // *Solar Phys.* 1993. V. 143. P. 201.
- Раст и Хегвер (Rust D.M. and Hegwer F.) // *Solar Phys.* 1975. V. 40. P. 141.
- Риян и др. (Ryan J.M., Chupp E.L., Forrest D.J. et al.) // *Astrophys. J.* 1983. V. 272. P. L61.
- Северный А.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1957. Т. 17. С. 129.
- Сильвестер и Сильвестер (Sylvester B. and Sylvester J.) // *Solar Phys.* 2000. V. 194. P. 305.
- Слоним и Коробова (Slonim Yu.M. and Korobova Z.B.) // *Solar Phys.* 1975. V. 40. P. 397.
- Хадсон и др. (Hudson H.S., Acton L.W., Hirayama T. and Uchida Y.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1992. V. 44. P. L77.
- Хадсон и др. (Hudson H.S., Van Driel-Gesztelyi L. and Kosugi T.) // *Proc. of Kofu Symp. NRO Rep.* N 360. July 1994.
- Швестка (Svestka Z.) // *Solar Phys.* 1970. V. 13. P. 480.
- Solar Geophysical Data* // 1999. N. 664. Pt. 2.