

УДК 523.98

Белые вспышки 15 июня 1991 г. и 26 июня 1999 г.

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

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

Поступила в редакцию 6 марта 2006 г.

Аннотация. Представлены некоторые наблюдательные характеристики двух белых вспышек: 15 июня 1991 г. и 26 июня 1999 г., и проводится их сравнение. Это представляет особый интерес, так как первая была одной из самых мощных вспышек рентгеновского класса X12, а вторая – компактной вспышкой класса M2.3. Найдены существенные различия некоторых вспышечных параметров (GOES-класс, H_{α} -классификация, количество вспышечных узлов, излучающих в белом свете, и их расположение в группе пятен, размер и продолжительность белого свечения, максимальная плотность потока микроволнового радиоизлучения). Однако оба этих явления имели примерно одинаковую мощность излучения с единицы площади в континууме в области 658.0 нм ($E = 1.5 \cdot 10^7$ и $1.1 \cdot 10^7$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$). Во время импульсной фазы наблюдается в основном хорошее временное соответствие между микроволновым и жестким рентгеновским излучением и свечением в белом свете, однако световая кривая белого излучения вспышки 26.06.1999 г. показывает более сильную корреляцию с излучением рентгена в области энергий 14–23 кэВ. Согласно спектральным характеристикам обе вспышки могут быть классифицированы как тип I белых вспышек.

THE WHITE-LIGHT FLARES 1999 JUNE 26 AND 1991 JUNE 15, *by A.N. Babin and A.N. Koval.* We represent some observational properties of two white-light flares (WLF) 1991 June 15 and 1999 June 26 and make comparison between them. This is particularly interesting because the first was one of the most powerful flare GOES class X12 and the second was a compact flare GOES class M2.3. The substantial differences of some flare parameters (GOES class, H_{α} classification, members of WLF kernels and their locations within the sunspot group, size and duration of WLF emission, peak flux density of the microwave radiation) were found. But both these events do have about the same magnitude of the emission rate in continuum at $\lambda 658.0$ nm: $E = 1.5 \cdot 10^7$ and $1.1 \cdot 10^7 \text{erg cm}^{-2} \text{c}^{-1} \text{nm}^{-1}$.

There is generally a good temporal coincidence between HXR and WLF emission during the impulsive phase, but light curve of the WLF emission of 1999 June 26 flare shows a stronger temporal correlation with 14–23 keV emission. According to their spectral features both flares can be classified as a type I white-light flares.

Ключевые слова: Солнце, вспышки в белом свете

1 Введение

Появление свечения вспышек в оптическом континууме еще недавно считалось особенностью, присущей только сильным двухленточным вспышкам рентгеновского класса X. Систематические наблюдения вспышек на УОНКОН при помощи *aspect*-камеры с использованием 3.0 нм фильтра,

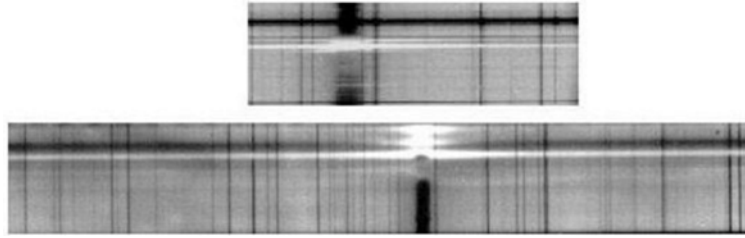


Рис. 1. Спектрограммы вспышек 26.06.1999 г. (наверху) и 15.06.1991 г. (внизу) в момент максимума излучения в континууме

центрированного на 430.8 нм, с октября 1991 г. по ноябрь 1992 г. позволили обнаружить 28 вспышек, излучающих в белом свете. Они имели рентгеновский класс от X6.1 до C7.8 и H_{α} балл от 3В до SN (Метьюс и др., 2003). Отсюда можно сделать вывод, что излучение в оптическом континууме не является свойством, присущим только сильным вспышкам. Приведенные Метьюс и др. (2003) данные показывают, что зарегистрированные белые вспышки очень сильно отличаются по своим наблюдательным параметрам: количеству ядер белого свечения, максимальному контрасту относительно невозмущенной фотосферы в области 430.8 нм, положению ядер эмиссии в группе пятен (в области фотосферы, полутени и тени пятен). Отсутствие спектральных наблюдений не дает авторам возможности выяснить, не связаны ли эти различия с принадлежностью наблюдаемых белых вспышек к разным спектральным типам. Согласно (Мачадо и др., 1986; Фанг и Динг, 1995), белые вспышки можно разделить на тип 1 и тип 2, которые существенно отличаются своими спектральными характеристиками, а также, возможно, механизмами, ответственными за появление свечения в континууме (Метьюс и др., 1998).

2 Наблюдения

В настоящей работе мы хотим сопоставить ряд наблюдательных параметров двух белых вспышек, заметно отличающихся по мощности процесса: 15 июня 1991 г. и 26 июня 1999 г. (рис. 1). Спектральные и монохроматические наблюдения обеих вспышек получены в Крымской астрофизической обсерватории на телескопах КГ-1, БСТ-2, КГ-2 с высоким временным и пространственным разрешением. Это позволило изучить особенности морфологии, процесса энерговыделения на разных стадиях развития вспышек, особенности спектров и энергетики, сопоставить развитие вспышек в разных спектральных диапазонах: H_{α} , оптическом континууме, мягком и жестком рентгене и микроволновом радиоизлучении (Бабин и др., 1998; Бабин и Коваль, 1999; 2002; 2005).

Вспышка 15 июня 1991 г. (N33, W69, 08:10 UT; оптический балл 3В, рентгеновский класс X12) является одной из самых мощных белых вспышек (Бабин и др., 1998). Она не была классической двухленточной вспышкой. В процессе ее развития сформировалось несколько вспышечных лент, и наблюдалось заметное движение вспышечного вещества (Бабин, Коваль и Огирь, 1995). Вспышка 26 июня 1999 г. (N23, W03, 05:05 UT; оптический балл 2В, рентгеновский класс M2.3) по структуре может быть отнесена к компактным вспышкам. В ней вспыхивали уже существующие хромосферные структуры, и не наблюдалось заметного движения вспышечного вещества в картинной плоскости. Наблюдения в белом свете вспышки 15 июня 1991 г., полученные в Дебрецене при помощи фотогелиографа и интерференционного фильтра с полосой 10 нм, центрированной на 550 нм, позволили выделить 8 источников белого свечения. Основные узлы белого свечения располагались на δ -пятне в области обеих полярностей, часть из них непосредственно над ядрами пятна и в области светлых мостов полутени. Три узла были расположены вне пятна, в области фотосферы (Бабин и др., 1998). Согласно спектральным наблюдениям наиболее яркого узла непрерывного излучения вспышки, полученным в НИИ "КрАО", продолжительность свечения была не менее 6–7 минут. Размер этого узла вдоль щели спектрографа составлял 7 угл. сек. (Бабин и Коваль, 1993). Во вспышке 26 июня

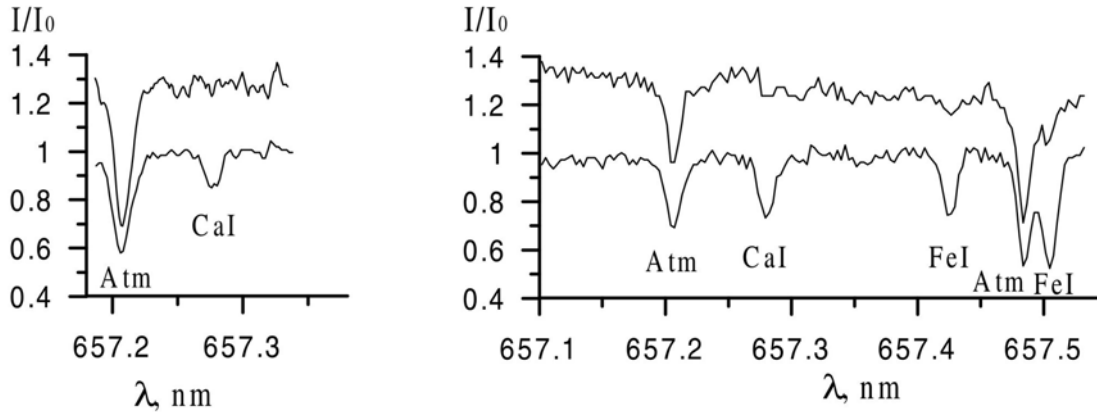


Рис. 2. Фотометрические записи участка спектра узла белой вспышки (сверху) и соседней невозмущенной фотосферы (внизу), слева – вспышка 26.06.1999 г., справа – 15.06.1991 г.

1999 г. спектральные наблюдения на телескопе КГ-2 НИИ “КрАО” позволили обнаружить только один источник излучения в непрерывном свете. Он располагался у внешнего края небольшого пятна в области выхода нового магнитного потока на месте пересечения начальной и вновь вспыхнувшей вспышечной петли в H_{α} -излучении (Бабин и Коваль, 2005). Как следует из таблицы, приведенной Метьюс С.А. (Метьюс и др., 2003), один источник белого свечения наблюдался у 16 из 28 белых вспышек. Время жизни источника непрерывного излучения, определенное по полуширине световой кривой, составляло около 60 с. Размер излучающей континуум области в момент максимума равнялся 3 угл. сек.

Оптический спектр излучения узлов обеих белых вспышек показывает исключительно протяженные эмиссионные профили линии водорода H_{α} с центральным обращением. Во вспышке 15.06.1991 г. полная протяженность эмиссионных крыльев линии H_{α} достигала 4.0 нм, а во вспышке 26.06.1999 г. – 2.2 нм. Во время максимума белого свечения профили линии H_{α} симметричны, но сдвинуты в целом в красную область спектра. Наблюдаемые сдвиги соответствуют опусканию излучающего вещества с лучевыми скоростями 20–30 км с⁻¹. Наблюдаемые H_{α} -профили во вспышке 15.06.1991 г. хорошо согласуются с теоретическими (Кенфилд и др., 1984), рассчитанными для случая нагрева хромосферы мощным потоком нетепловых электронов с энергиями свыше 20 кэВ $F_{20} > 10^{11}$ эрг см⁻² с⁻¹ (Бабин и Коваль, 2002). У обеих вспышек в спектре узлов, излучающих в континууме, солнечные линии поглощения практически полностью залиты излучением континуума (рис. 2). В спектре вспышки 15.06.1991 г. в излучении обнаружены линии углерода СI λ 658.77 нм, ионизованного углерода СII λ 657.8 нм и λ 658.28 нм, ионизованного магния MgII λ 654.59 нм и ионизованного гелия HeII λ 656.01 нм. Таким образом, по спектральным характеристикам обе вспышки, согласно классификации Мачадо и др. (1986), следует отнести к I типу.

3 Сопоставление с рентгеновским и радиоизлучением

Излучение в оптическом континууме у обеих вспышек зарегистрировано во время импульсной фазы. Микроволновое излучение вспышки 15.06.1991 г. состояло из мощного импульсного всплеска продолжительностью около 8 минут, в котором можно выделить, по крайней мере, два субвсплеска и более слабый постепенный всплеск продолжительностью около 20 минут. Максимум непрерывного излучения самого яркого узла белой вспышки совпадает по времени с максимумом самого мощного субвсплеска (рис. 3). Максимальный поток микроволнового радиоизлучения на частоте 2950 МГц

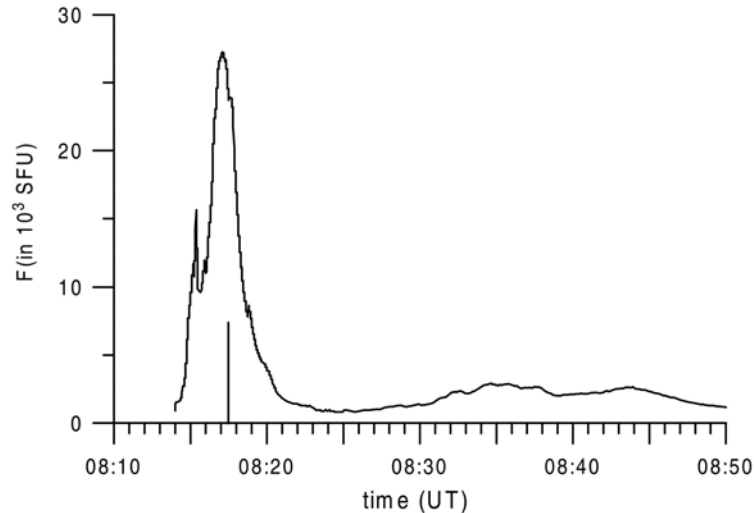


Рис. 3. Временной ход микроволнового радиоизлучения вспышки 15.06.1991 г. на частоте 2.85 ГГц по данным НИИ “КрАО”. Вертикальной чертой отмечен момент максимума излучения в оптическом континууме

по наблюдениям станции Зименки (Нижний Новгород) составляет 15640 SFU (Solar-Geoph. Data, 1991).

Во вспышке 26.06.1999 г. максимальный поток радиоизлучения на той же частоте, по наблюдениям той же станции, составлял 310 SFU (Solar-Geoph. Data, 1999). Временной ход жесткого рентгеновского излучения (HXR) во время вспышки 26.06.1999 г. в диапазоне энергий 14–23 кэВ и 33–53 кэВ, по наблюдениям ЮНКОН, а также световая кривая эмиссии вспышки в континууме, представлены на рис. 4. Из него видно, что излучение жесткого рентгена в области энергий 14–23 кэВ состоит из импульсного и теплового компонентов, при этом импульсный компонент показывает несколько всплесков продолжительностью до 10 секунд. В области энергий 33–53 кэВ излучение состоит из трех импульсных субвсплесков. С одной стороны, наблюдается хорошее временное соответствие между максимумом излучения в континууме и третьим импульсным субвсплеском. Этот всплеск не был самым сильным и самым жестким, если характеризовать спектральную жесткость отношением максимумов всплесков в канале M2 (33–53 кэВ) и канале M1 (23–33 кэВ). Отношение M2/M1 равно 0.47; 0.59 и 0.32 для первого, второго и третьего субвсплесков соответственно.

С другой стороны, кривая развития вспышки в континууме показывает хорошую временную корреляцию с ходом теплового компонента в области энергий 14–23 кэВ. Поляризационные наблюдения на телескопе КГ-2 показали, что излучение вспышки в оптическом континууме неполяризовано.

4 Энергетика

Во время максимума свечения контраст непрерывного излучения $\Delta I/I_c$ в области длин волн 658.0 нм составлял 0.196 и 0.15 для вспышек 15.06.1991 г. и 26.06.1999 г. соответственно, а исходя из этого, мощности излучения в континууме с единицы площади ядра белой вспышки составляли $1.5 \cdot 10^7$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$ и $1.1 \cdot 10^7$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$ (Бабин и др., 1998; Бабин и Коваль, 2005).

5 Развитие вспышечного процесса

Сравним некоторые детали развития вспышечного процесса в свете линии H_α . У обеих вспышек импульсной фазе предшествовал постепенный нагрев хромосферы и короны. Во вспышке 15.06.1991 г.

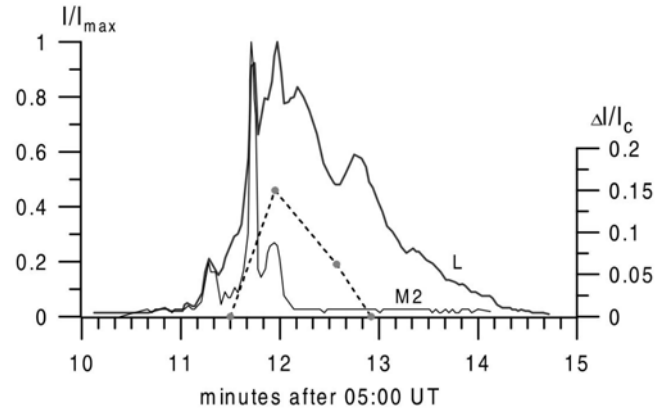


Рис. 4. Временной ход жесткого рентгеновского излучения в каналах L(14–23 кэВ) и M2 (33–53 кэВ) по данным УОНКОН (левая шкала) и изменение контраста непрерывного излучения (точки, правая шкала)

примерно за полтора часа до начала импульсной фазы наблюдалось постепенное непрерывное увеличение яркости флоккулов в местах будущего основного энерговыделения. Это указывает на непрерывное поступление энергии в хромосферу на протяжении довольно значительного промежутка времени (Бабин и Коваль, 2002).

Во вспышке 29.06.1999 г. за 40 сек до начала импульсной фазы вспышки, когда были начаты наблюдения в линии H_{α} , интенсивность основных вспышечных узлов уже достигла заметной величины, оставаясь на этом уровне или слабо увеличиваясь до появления первого импульсного всплеска в НХР (Бабин и Коваль, 2005). Усиление излучения в мягком рентгене, по данным GOES, началось за 2.5 минуты до появления всплесков в жестком рентгене. Таким образом, нагрев короны и хромосферы предшествовал импульсной фазе вспышки.

Из сравнения морфологии и кривых развития отдельных вспышечных узлов с ходом потока излучения в микроволновом и жестком рентгеновском излучении можно сделать вывод, что в обеих вспышках выделение энергии происходило в тонкоструктурных элементах и не одновременно. Наблюдалось несколько инжекций ускоренных частиц в хромосферу в различных вспышечных узлах. В каждый момент различные узлы вспышки находились в разных стадиях развития (Бабин и Коваль, 2002; 2005).

Интересным фактом, обнаруженным во время вспышки 26.06.1999 г. (Бабин и Коваль, 2003), являются быстрые (на временной шкале порядка минуты) изменения напряженности магнитного поля пятна, расположенного на расстоянии нескольких десятков угловых секунд от места основного энерговыделения. Эти изменения очень хорошо коррелируют с импульсными всплесками жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 14–23 кэВ (рис. 5).

6 Заключение

Проведено сравнение некоторых наблюдательных параметров двух вспышек, давших излучение в оптическом континууме, которые существенно отличались по мощности вспышечного процесса в разных диапазонах длин волн: H_{α} , микроволновом, мягком и жестком рентгеновском излучении, а также количеством ядер, излучающих в континууме, и их расположением в группе пятен. Однако мощность излучения в оптическом континууме с единицы площади в области 658.0 нм, которая имеет определяющее значение при рассмотрении механизма нагрева, у обеих вспышек была одного и того же порядка ($1.5 \cdot 10^7$ и $1.1 \cdot 10^7$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$). Непрерывная эмиссия в обоих случаях наблюдалась во время импульсной фазы. В то же время кривая развития в континууме вспышки

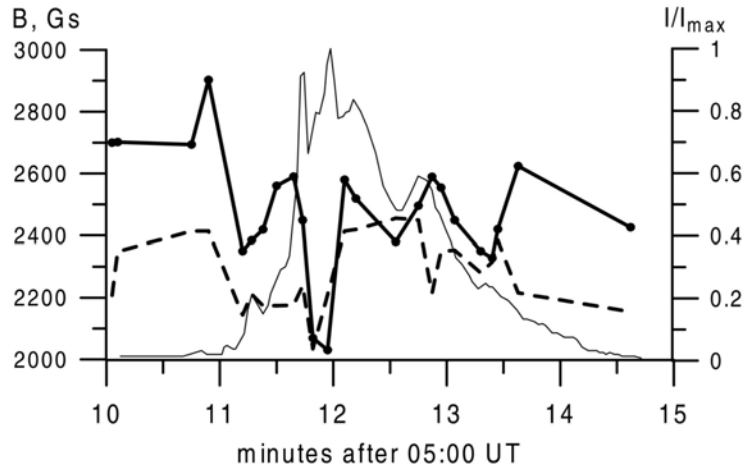


Рис. 5. Изменение напряженности магнитного поля B со временем по измерениям в линии FeI 656,923 нм в южном (жирная линия с точками) и северном (жирная штриховая) ядрах пятна, а также кривая развития излучения рентгена в канале L (тонкая линия) во вспышке 26.06.1999 г.

26.06.1999 г. показывает хорошую корреляцию с ходом постепенного компонента рентгеновского излучения в области 14–23 кэВ, которое является преимущественно тепловым. Аналогичный результат для нескольких вспышек получен (Сильвестер и Сильвестер, 2000). Непрерывное излучение вспышки 26.06.1999 г. не было поляризовано. По спектральным характеристикам обе вспышки принадлежат к типу I, для которого свечение в континууме связывают с проникновением в глубокие слои хромосферы нетепловых электронов. Однако ряд наблюдательных характеристик вспышек трудно согласовать с этим предположением.

Литература

- Бабин А.Н., Барановский Э.А., Коваль А.Н., Герлеи О., Калман Б. // Кинем. и физ. небес. тел. 1998. Т. 14. №. 4. С. 330.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1993. Т. 88. С. 60.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Кинем. и физ. небес. тел. 1998. Т. 15. №. 1. С. 51.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 28.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 86.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 107.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н., Огирь М.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 92. С. 28.
- Кенфилд и др. (Canfield R.C., Gunkler T.A., Richiazzi P.J.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 282. P. 296.
- Мачадо и др. (Machado E.M., Avrett E.H., Falciani R. et al.) // *The Lower Atmosphere of Solar Flares/* Ed. Neidig D.F. National Solar Observatory. Sunspot. N. M. 1986. P. 483.
- Метьюс и др. (Matthews S.A., Brown J.C. and L. van Driel-Gesztelyi) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 340. P. 277.
- Метьюс и др. (Matthews S.A., L. van Driel-Gesztelyi, Hudson H.S., Nitta N.V.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 409. P. 1107.
- Сильвестер и Сильвестер (Sylvester B. and Sylvester J.) // *Solar Phys.* 2000. V. 194. P. 305.
- Фанг и Динг (Fang C. and Ding M.D.) // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1995. V. 110. P. 99.
- Solar-Geophys. Data. 1991. №. 568. Part II.
- Solar-Geophys. Data. 1999. №. 664. Part II.