

УДК 524.3-56

**Б. Е. Жилиев¹, Ю. Т. Цап^{2,4}, М. В. Андреев³, А. В. Степанов⁴,
Ю. Г. Копылова⁴, Р. Е. Гершберг², М. Н. Ловкая²,
А. В. Сергеев³, И. А. Верлюк¹, К. О. Стеценко¹**

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 г. Киев, ул. Академика Заболотного 27
zhilyaev@mao.kiev.ua

²Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, Научный

³Международный центр астрономических и медико-экологических исследований
Национальной академии наук Украины и Российской академии наук
03680 г. Киев, ул. Академика Заболотного 27

⁴Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук
196140 Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65

Пульсации оптического излучения вспышки YZ CMi 9 февраля 2008 г.

Рассмотрена одна из наиболее мощных и продолжительных вспышек активного красного карлика YZ CMi, обнаруженная 9 февраля 2008 г. на пике Терскол по наблюдениям в полосе U. При возгорании вспышки в течение 30 с светимость звезды увеличилась более чем в 180 раз, а полная длительность вспышки составила один час. С помощью вейвлет-анализа в максимуме излучения вспышки обнаружены квазипериодические пульсации с характерным периодом около 11 с, начальной глубиной модуляции 5.5 % и экспоненциальным временем затухания 29 с. В предположении, что наблюдаемые пульсации были вызваны быстрыми магнитогидродинамическими колебаниями вспышечной петли, на основе методов корональной сейсмологии определены концентрация ($2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и температура ($3 \cdot 10^7 \text{ K}$) плазмы, а также напряженность магнитного поля (0.015 Тл) в области энерговыделения.

*ПУЛЬСАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СПАЛАХУ YZ CMi
9 ЛЮТОГО 2008 р., Жилиєв Б. Ю., Цап Ю. Т., Андрєєв М. В.,
Степанов О. В., Копилова Ю. Г., Гершберг Р. Е., Ловка М. М.,
Сергєєв О. В., Верлюк І. А., Стеценко К. О. — Розглянуто одну з най-
потужніших і найтриваліших спалахів активного червоного карлика*

YZ CMi, який було виявлено 9 лютого 2008 р. на піку Терскол за спостереженнями у смузі U. Протягом 30 с світність зірки збільшилась у 180 разів, а повна тривалість спалаху склала одну годину. За допомогою вейвлет-аналізу у максимумі випромінювання виявлено квазіперіодичні пульсації з характерним періодом біля 11 с, початковою глибиною модуляції 5.5 % і експоненціальним часом згасання 29 с. У припущенні, що спостережені пульсації були викликані швидкими магнітогідродинамічними коливаннями спалахової арки, на основі методів корональної сейсмології визначено концентрацію ($2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$) і температуру ($3 \cdot 10^7 \text{ K}$) плазми, а також значення магнітного поля (0.015 Тл) в області енерговиділення.

PULSATIONS OF OPTICAL EMISSION OF THE YZ CMi FLARE ON 9 FEBRUARY 2008, by Zhilyaev B. E., Tsap Yu. T., Andreev M. V., Stepanov A. V., Kopylova Yu. G., Gershberg R. E., Lovkaya M. N., Sergeev A. V., Verlyuk I. A., Stetsenko K. O. — We consider one of the most powerful and long duration flares of the red dwarf YZ CMi which was revealed from observations in the U band at the Peak Terskol Observatory on 9 February 2008. The stellar luminosity was increased to the flare maximum by a factor of 180 during 30 s and the total flare duration was equal to 1 h. Using the wavelet analysis, quasi-periodical pulsations with a period of about 11 s, an initial modulation depth of 5.5 %, and an exponential time of damping of 29 s are revealed. It is assumed that observed pulsations were caused by fast magnetohydrodynamic oscillations of the flare loop. Based on coronal seismology methods, the following parameters of flare plasma were determined: number density ($2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$), plasma temperature ($3 \cdot 10^7 \text{ K}$), and the magnetic field value (0.015 T) in the region of flare energy release.

ВВЕДЕНИЕ

Красная карликовая звезда YZ CMi (dM 4.5e), находящаяся на расстоянии 5.93 пк ($R_* = 0.36R_\odot$, $M_* = 0.34M_\odot$, $T_* = 2900 \text{ K}$), является одной из наиболее ярких ($V = 11.1^m$) и активных вспыхивающих звезд. Ее исследованию посвящено большое число работ. Так, согласно крымскому каталогу вспыхивающих звезд — его первая версия была описана Гершбергом и др. [5] — результаты оптической фотометрии вспышек этой звезды содержатся в 164 статьях, оптические спектры — в 55, рентгеновские и УФ-наблюдения представлены в 49 и 25 публикациях соответственно. Особый интерес для дальнейшего изложения представляют работы последних лет [7—10].

Сравнительно недавно Раассен и др. [9] на основе рентгеновских наблюдений в диапазоне 0.1—4 нм, полученных на самой крупной европейской орбитальной обсерватории XMM-Newton, провели детальные исследования двух вспышек на YZ CMi. Затем на основе солнеч-

но-звездной аналогии и уравнения теплового баланса во вспышечной петле (арке) они диагностировали плазму и магнитные поля с помощью двух независимых методик. Однако используемые ими подходы предполагают большое число не всегда оправданных предположений, что может привести к некорректным результатам. Рассмотрим их более обстоятельно.

Первый метод следует из размерностных соотношений, полученных Шибатой и Йокоямой [14]. Согласно принятой стационарной модели тепловой баланс вспышечной петли полудлины L определяется пересоединением магнитных силовых линий (течение Печека) в ее вершине и теплопроводными потерями. Полагая, что ширина токового слоя сравнима с L , скорость втекания плазмы в слой составляет $0.1 V_A$, где V_A — альвеновская скорость, и вся магнитная энергия трансформируется в тепловую, Йокояма и Шибата [16] оценили температуру в вершине вспышечной арки. В свою очередь усредненная температура петли находилась с учетом результатов численных расчетов, в соответствии с которыми температура плазмы с наибольшей мерой эмиссии в три раза меньше, чем в вершине [13]. Считая петлю кубом и принимая меру эмиссии петли $EM = n^2 L^3$, где n — концентрация плазмы, а также не совсем обоснованно полагая значение плазменного параметра $\beta = 1$, Шибата и Йокояма [14] получили выражения для оценки магнитного поля B и размера L по известным значениям плазменной концентрации, меры эмиссии и температуры плазмы.

Второй метод следует из результатов работ Холи и др. [3, 6], которые также рассмотрели баланс энергии, но уже в нестационарной арке. В процессе вспышечного энерговыделения были выделены две основные фазы, соответствующие росту и падению ультрафиолетового потока излучения. Предполагалось, что тепловой баланс на фазе роста определяется испарением горячего хромосферного вещества и электронной теплопроводностью, тогда как на фазе спада — радиационными потерями. Помимо этих весьма грубых предположений, энерговыделение, газовое давление и относительный темп изменения концентрации частиц считались равномерно распределенным вдоль всей петли. При этом в ходе получения интегрированного уравнения (4.3) в работе [6] поток теплоты в основаниях петли равен $F_c = 0$, тогда как при расчете давления петли в приближении сильного испарения параметр F_c принимается равным некоторому конечному значению [3].

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует, что результаты, полученные в работе [9] с помощью диагностических методов, разработанных в работах [6, 14], на основе анализа уравнения баланса энергии во вспышечной петле, нельзя считать достаточно надежными. Поэтому необходимо привлекать иные независимые подходы, позволяющие свести к минимуму число неоправданных ограничений и свободных параметров. На наш взгляд, значительный прогресс в диагностике плазмы звездных вспышек может быть достигнут благодаря использованию методов корональной сейсмологии [1].

Ниже мы рассмотрим результаты наблюдений, уделив главное внимание анализу тонкой временной структуры вспышечного излучения с помощью вейвлет-преобразования, оценим основные параметры вспышечной петли, исходя из солнечно-звездной аналогии и метода, предложенного А. В. Степановым и др. [2].

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения вспышки YZ CMi проводились 9 февраля 2008 г. в полосе U на 2-м телескопе системы Ричи-Кретьена (пик Терскол, Северный Кавказ). Благодаря использованию скоростного двухканального $UBVR$ -фотометра [17] время интегрирования сигнала достигало 0.1 с.

На рис. 1 показана кривая блеска звезды YZ CMi в полосе U . Вспышка началась в 20:22:00 UT и длилась около 1 ч. Она отличалась резкой фазой роста и большой амплитудой. В течение 30 с поток излучения достиг максимума, увеличившись в 180 раз, что соответствует 5.68^m . Из построенной нами гистограммы частотного распределения амплитуд вспышек YZ CMi в полосе U по данным о 325 вспышках YZ CMi, взятым из каталога Гершберга и др. [5], следует (рис. 2), что вспышка 9 февраля 2008 г. имеет наибольшую амплитуду.

Для поиска периодичностей в данных измерений мы обратились к вейвлет-преобразованию. Используемые в этом случае базисные функции локализованы не только в частотной, но и во временной области. Поэтому вейвлет-анализ, в отличие от гармонического метода Фурье, более приспособлен для исследования нестационарных процессов. Он позволяет одинаково хорошо выявлять как высоко-, так и низкочастотные характеристики сигнала и проследить за их изменением во времени, строя соответствующие спектральные зависимости в пространстве «частота — время».

Следуя работе [15], мы применили непрерывное вейвлет-преобразование, и в качестве базисной функции выбрали вейвлет Морле, представляющий собой плоскую волну, промодулированную гауссианой:

$$\psi_0 = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2s^2}, \quad (1)$$

где ω_0 — безразмерная частота, которую мы считали равной шести, t/s — безразмерный временной параметр, s — характерный временной масштаб.

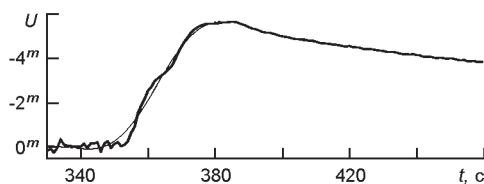
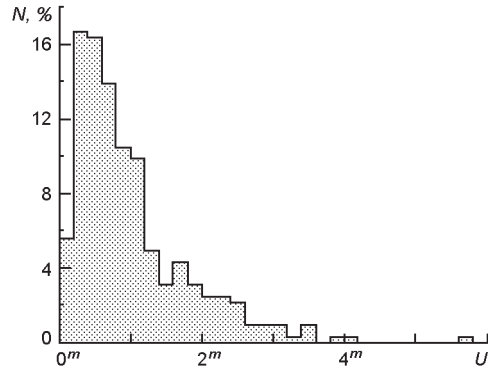


Рис. 1. Кривая блеска в полосе U с секундным разрешением (толстая линия) и реконструированная кривая блеска (тонкая линия) в низкочастотном диапазоне (периоды $P > 20$ с), полученная с помощью непрерывного вейвлет-преобразования

Рис. 2. Распределение количества N вспышек YZ СМі в полосе U по их амплитуде согласно данным [5]



Если x_n — временной ряд с временным разрешением t и $n = 0, \dots, N - 1$, то вейвлет-преобразование $W_n(s)$ будет представлять собой свертку x_n с масштабированной и транслированной версией ψ_0 :

$$W_n(s) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * \frac{(n-n)t}{s}, \quad (2)$$

где звездочкой обозначена комплексно сопряженная величина, и

$$* \frac{(n-n)t}{s} = \frac{t}{s} \int_0^{1/2} \frac{(n-n)t}{s}.$$

Варьируя нижние индексы s и n , можно построить зависимость эволюции спектра мощности $|W_n(s)|^2$ сигнала от временного масштаба.

Ошибки непрерывного вейвлет-преобразования мы оценивали согласно подходу, предложенному Митра-Краевой и др. [8]. В случае белого шума с дисперсией σ^2 спектр мощности $|W_n(s)|^2 = \sigma^2$. Причем для любого момента времени t и масштаба s

$$\frac{|W_n(s)|^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2}, \quad (3)$$

где стрелка \rightarrow указывает на соответствующее локальное распределение, а χ^2_2 — распределение с двумя степенями свободы. На основе распределения χ^2_2 нетрудно найти уровень значимости для пиков в вейвлет-спектре мощности.

Полезный сигнал может быть отфильтрован от шумов и восстановлен без потерь с помощью линейного вейвлет-преобразования. Для временных рядов в пространстве время — период применялся фильтр F с коэффициентами 0 или 1. Отфильтрованный сигнал определялся с помощью формулы

$$\tilde{x}_n = C \sum_j \frac{\text{Re}(\tilde{W}_{jn})}{\sqrt{s_j}}, \quad (4)$$

где C — нормировочный множитель, $j = 0, 1, \dots, J$ — параметр, характеризующий величину временного масштаба s_j , $\tilde{W}_{jn} = W_{jn} F_{jn}$ [15].

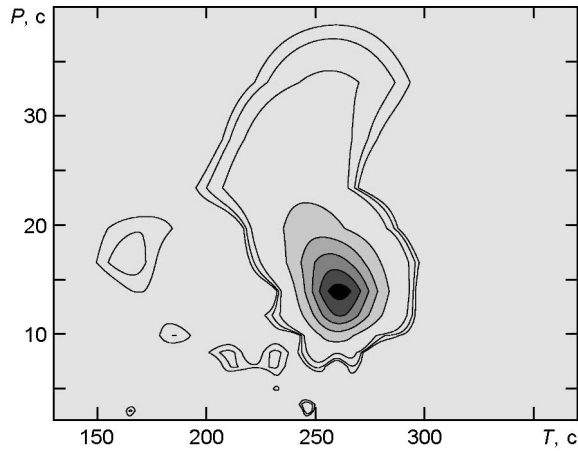


Рис. 3. Вейвлет-спектр мощности реконструированной кривой блеска вспышки, содержащей высокочастотные колебания. Внешние контуры соответствуют уровню доверительной вероятности 90 %, внутренние — 95, 99 % и т. д.

Восстановленный сигнал f_n и его дисперсия $\frac{2}{m}$ находились следующим образом:

$$f_n = C \sum_m A_{mn} f_m, \quad \frac{2}{n} = \sum_m A_{mn}^2 \frac{2}{m}, \quad (5)$$

где коэффициент преобразования

$$A_{mn} = C \sum_j \frac{\text{Re} \int s_j^{jnm}}{\sqrt{s_j}}. \quad (6)$$

На основе соотношений (1)–(6) рассчитывались вейвлет-спектры мощности и определялись достоверные пики. С их помощью также проводились низкочастотные, высокочастотные и полосовые фильтрации данных наблюдений и оценивались ошибки реконструированного сигнала в предположении стационарного белого гауссова шума.

На рис. 3 представлен вейвлет-спектр мощности реконструированной кривой блеска в высокочастотной области ($T_p = 2...20$ с). Контурные на спектре показывают уровни колебаний 90, 95, 99 % и более. Как видно, осцилляции во вспышке, продолжавшиеся около одной минуты, возникли в момент резкого увеличения потока излучения и исчезли на спаде всплеска. Период колебаний, которому соответствует пик вейвлет-спектра с уровнем доверительной вероятности более 99 %, составил около 13 с. (Эта величина совпадает с квазипериодом высокочастотных оптических пульсаций, обнаруженных М. Родоно [12] во вспышке звезды ИП 2411). Необходимо отметить, что на рис. 3 также видны несколько локальных максимумов с доверительной вероятностью более 95 %, возникших примерно за 100 с до начала вспышки, характерный период которых со временем уменьшался. При этом не следует исключать, что отмеченные локальные максимумы являются шумовыми.

На рис. 4 показаны высокочастотные пульсации после вейвлет-фильтрации в интервале периодов $T_p = 2...20$ с, а также аппроксимация колебаний затухающей косинусоидальной кривой с периодом T_p

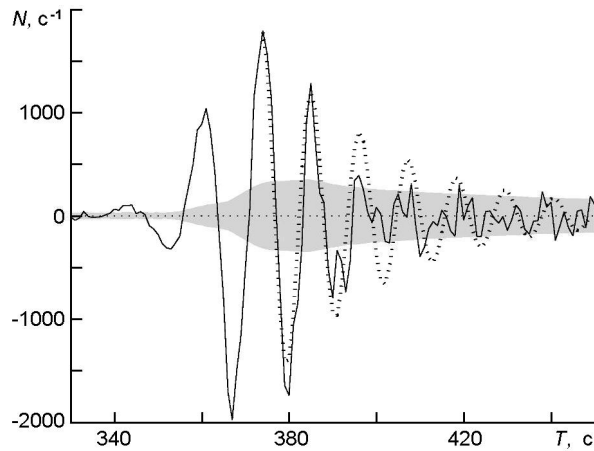


Рис. 4. Реконструкция высокочастотного компонента кривой блеска YZ CM1 9 февраля 2008 г. в интервале периодов $T_p = 2...20$ с (тонкая линия). Кривая сглажена фильтром скользящего среднего с временным окном 5 с. Затемненная область — коридор ошибок 2 . Пунктирная кривая — затухающая косинусоидальная кривая с периодом колебаний 11.2 с и временем экспоненциального затухания 28.6 с. Относительная амплитуда колебаний в максимуме вспышки $I/I = 5.5\%$

11.2±0.4 с и экспоненциальным временем затухания 28.6 с. Отсюда видно, что наблюдаемые пульсации, у которых отношение амплитуды колебаний в максимуме вспышки к ее интенсивности равно $I/I = 5.5\%$, быстро затухали и носили квазигармонический характер.

КОРОНАЛЬНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Для оценки основных параметров вспышечной плазмы и магнитного поля в области энерговыделения будем исходить из солнечно-звездной аналогии и диагностического метода, следующего из рассмотрения дисперсионных особенностей, а также механизмов возбуждения и затухания собственных мод колебаний магнитных трубок. В связи с этим рассмотрим основные положения модели, предложенной Степановым и др. [2].

Пусть во вспышечной петле, которую можно представить в виде прямого цилиндра с жестко закрепленными основаниями, в результате резкого увеличения газового давления возбудились радиальные быстрые магнитозвуковые (БМЗ) моды, период которых определяется сечением петли a . Если корональная арка, действуя подобно магнитной ловушке, способна накапливать энергичные заряженные частицы, то БМЗ-осцилляции будут приводить к модуляции потока ускоренных пролетных частиц в хромосфере и фотосфере из-за изменений пробочного отношения. Термализация последних и повлечет за собой появление наблюдаемых пульсаций оптического излучения.

В рамках сценария [2] были получены формулы, позволяющие оценивать температуру T , концентрацию n и магнитное поле B вспышечной петли по наблюдаемым параметрам осцилляций излучения: периоду T_p , глубине модуляции M и добротности $Q = 2\pi a/L$:

$$\begin{aligned} T &= 2.4 \cdot 10^8 \frac{\tilde{r}^2 M}{T_p^2} \text{ [К]}, \\ n &= 1.97 \cdot 10^{12} \frac{\tilde{r}^3 M^{5/2} Q \sin^2}{T_p^{4.5}} \text{ [см}^{-3}\text{]}, \\ B &= 9.06 \cdot 10^{22} \frac{Q^{1/2} \tilde{r}^{5/2} M^{5/4} \sin}{T_p^{3.5}} \text{ [Тл]} \end{aligned} \quad (7)$$

где $\arctg(a/L)$ — угол между волновым вектором БМЗ-волн \mathbf{k} и магнитным полем \mathbf{B} , $\tilde{r} = 2a/L$, $\tilde{r} = 2.4$, $\tilde{r} = 486M \cos^2 + 1 = 20/3M + 2$. Принимая $a = 10^9$ см, $M = 0.06$, $T_p = 11$ с, $Q = 20$, $a/L = 0.1$, из выражения (6) для области вспышечного энерговыделения на YZ CMi находим $T = 3 \cdot 10^7$ К, $n = 2 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и $B = 0.015$ Тл. Особо подчеркнем, что несмотря на сравнительно хорошее согласие полученных нами оценок с результатами [9], полученных на основе методик [6], а также с результатами [14] для двух рентгеновских вспышек на YZ CMi, имеются и существенные различия. В частности, найденная с помощью методов корональной сейсмологии величина магнитного поля оказалась почти в три раза больше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Мы исследовали тонкую временную структуру вспышки на красном карлике YZ CMi, наблюдавшейся на пике Терскол 9 февраля 2008 г. в полосе U . Из 325 обнаруженных ранее на этой звезде вспышечных событий она оказалась наиболее мощной. Благодаря применению вейвлет-анализа на импульсной фазе вспышки нам удалось выявить затухающие квазипериодические колебания с $T_p = 11$ с. На основе солнечно-звездной аналогии и в предположении связи наблюдаемых пульсаций с радиальными БМЗ-колебаниями, используя расчетные формулы [2], мы определили основные параметры вспышечной петли.

Одна из наиболее трудноразрешимых проблем корональной сейсмологии звезд связана с отождествлением моды собственных колебаний корональных петель. Как известно, при малых значениях θ в магнитной трубке могут возбуждаться четыре основные моды колебаний: винтовая, изгибная, звуковая и радиальная. Винтовые осцилляции вызывают лишь вариации направления магнитного поля, тогда как изгибные практически не сжимают плазму [2], поэтому они едва ли мо-

гут быть ответственны за наблюдаемые осцилляции. Возбуждение звуковых мод с периодами, не превышающими нескольких десятков секунд, предполагает длины вспыхивающих петель $L \sim 0.01R_*$ [2], что в свете мощной энергетики вспышки выглядит маловероятным. Поэтому, на наш взгляд, в рассматриваемом случае вероятнее возбуждались радиальные БМЗ-моды.

Интересно отметить, что Робинсон и др. [11], воспользовавшись результатами ультрафиолетовых (135—280 нм) наблюдений на спутнике GALEX одной из вспышек GJ 3685 A (dM4e), также обнаружили предвспыхивающие флуктуации излучения. Поскольку подобные всплески, наблюдаемые в различных диапазонах, характерны не только для звездных, но и для солнечных событий [4], то это лишнее свидетельство в пользу правомерности привлечения в модельных расчетах солнечно-звездной аналогии. Возникновение таких пульсаций, по нашему мнению, обусловлено развитием микровспыхивающих процессов. Этот вопрос требует более обстоятельного анализа.

Настоящая работа выполнена в рамках российско-украинского проекта (№ Ф28.2/034), программы Президиума РАН «Происхождение и эволюция звёзд и галактик», научной школы НШ—6110.2008.2 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (шифр 2009-1.1—126-056).

1. Зайцев В. В., Степанов А. В. Корональные магнитные арки // Успехи физ. наук.—2008.—**178**.—С. 1165—1204.
2. Степанов А. В., Копылова Ю. Г., Цап Ю. Т., Курьянова Е. Г. Осцилляции излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных петель // Письма в Астрон. журн.—2005.—**31**.—С. 684—692.
3. Fisher G. H., Hawley S. L. An equation for the evolution of solar and stellar flare loops // Astrophys. J.—1990.—**357**.—P. 243—258.
4. Gaisauskas V. Preflare activity // Solar Phys.—1989.—**121**.—P.135—152.
5. Gershberg R. E., Katsova M. M., Lovkaya M. N., et al. Catalogue and bibliography of the UV Cet-type flare stars and related objects in the solar vicinity // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1999.—**139**.—P. 555—558.
6. Hawley S. L., Fisher G. H., Simon T., et al. Simultaneous extreme-ultraviolet explorer and optical observations of AD Leonis: evidence for large coronal loops and the Neupert effect in stellar flares // Astrophys. J.—1995.—**453**.—P. 464—479.
7. Hawley S. L., Walkowicz L. M., Allred J. C., Valenti J. A. Near-Ultraviolet Spectra of Flares on YZ CMi // Publ. Astron. Soc. Pacif.—2007.—**119**.—P.67—81.
8. Mitra-Kraev U., Harra L. K., Williams D. L., et al. The first observed stellar X-ray flare oscillation: Constraints on the flare loop length and the magnetic field // Astron. and Astrophys.—2005.—**436**.—P. 1041—1047.
9. Raassen A. J. J., Mitra-Kraev U., Güdel M. The X-ray spectra of the flaring and quiescent states of YZ CMi observed by XMM-Newton // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2007.—**379**.—P. 1075—1082.
10. Reiners A. The narrowest M-dwarf line profiles and the rotation-activity connection at very slow rotation // Astron. and Astrophys.—2007.—**467**.—P. 259—268.

11. *Robinson R. D., Wheatley J. M., Welsh B. Y., et al.* GALEX observations of an energetic ultraviolet flare on the dM4e star GJ 3685A // *Astrophys. J.*—2005.—**633**.—P. 447—451.
12. *Rodono M.* Short-lived flare activity of the Hyades flare star HII 2411 // *Astron. and Astrophys.*—1974.—**32**.—P. 337.
13. *Shibata K., Yokoyama T.* Origin of the universal correlation between the flare temperature and the emission measure for solar and stellar flares // *Astrophys. J.*—1999.—**526**.—P. L49—L52.
14. *Shibata K., Yokoyama T.* A Hertzsprung — Russell-like diagram for solar/stellar flares and corona: emission measure versus temperature diagram // *Astrophys. J.*—2002.—**577**.—P. 422—432.
15. *Torrence C., Compo G. P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*—1998.—**79**.—P. 61—78.
16. *Yokoyama T., Shibata K.* A two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of chromospheric evaporation in a solar flare based on a magnetic reconnection model // *Astrophys. J.*—1998.—**494**.—P. L113—L116.
17. *Zhilyaev B. E., Romanyuk Y. O., Svyatogorov O. A.* A high speed automatic two-channel photometer // *Astronomicheskij Zhurnal.*—1992.—**69**, N 4.—P. 895—900.

Поступила в редакцию 14.12.09