

УДК 524.321

Колориметрия двух больших вспышек EV Lac по UBVR-наблюдениям 1996–1998 гг.

М.Н. Ловкая

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

Поступила в редакцию 29 ноября 2011 г.

Аннотация. По данным быстрой UBVR-фотометрии, полученным в ходе международных кооперативных наблюдений красного вспыхивающего карлика EV Lac, исследована тонкая временная структура двух больших вспышек (15.10.1996 и 10.10.1998) с амплитудами 3.73 и 2.72 звездной величины в полосе U. Детальный колориметрический анализ позволил отметить изменение по мере развития вспышек EV Lac таких характеристик вспышечной плазмы как оптическая толщина, электронная концентрация и температура. Установлено, что часть времени до максимума блеска обе вспышки находятся в состоянии водородной плазмы, оптически тонкой в Бальмеровском континууме. В области максимума на протяжении примерно минуты обе вспышки излучают как абсолютно черное тело (АЧТ), температура которого изменяется от 20000 К до 12000 К и от 16000 К до 14000 К соответственно, после чего переходят в состояние плазмы оптически толстой в Бальмеровском континууме. В максимуме блеска вспышки излучали как АЧТ с температурой примерно 15000 К и 16000 К. Линейные размеры вспышек в максимуме светимости в приближении абсолютно черного тела составляют примерно 5 % и 3 % радиуса звезды, площади – $5.1 \cdot 10^{18}$ см² и $1.6 \cdot 10^{18}$ см².

COLORIMETRY OF TWO LARGE FLARES OF EV LACERTAE FROM UBVR OBSERVATIONS IN 1996–1998, *by M.N. Lovkaya*. According to the fast UBVR photometry of the red flaring dwarf star EV Lac obtained in the course of international cooperative observations, fine temporal structure of two large flares (15 Oct 1996 and 10 Oct 1998) with amplitudes of 3.73 and 2.72 magnitudes in the U band have been studied. The detail colorimetric analysis allowed the tracing of the flare plasma characteristics such as the optical thickness, electron density and temperature during the flare development. It is established that part of the time up to the brightness maximum both flares are in hydrogen plasma, optically thin in the Balmer continuum. In the region of the brightness maximum both flares emit for about a minute as a black body whose temperature varies from 20000 K to 12000 K and from 16000 K to 14000 K, respectively. Then these flares pass to the plasma optically thick in the Balmer continuum. At the brightness maximum flares emitted as a black body with the temperature of approximately 15000 K and 16000 K. The linear sizes of the flares are approximately 5 % and 3 % of the stellar radius at maximum luminosity. The area is $5.1 \cdot 10^{18}$ cm² and $1.6 \cdot 10^{18}$ cm².

Ключевые слова: UBVR-фотометрия, вспыхивающие звезды

1 Введение

Колориметрия звезд базируется на данных многоцветной фотометрии в области от $\sim 3300 \text{ \AA}$ до $\sim 9000 \text{ \AA}$. Данные фотометрии могут быть получены, например, в широкополосной системе UBVR_I. Для быстропеременных и сравнительно слабых объектов, к которым относятся вспыхивающие красные карликовые звезды, колориметрия является основным количественным методом анализа излучения. Она позволяет проводить диагностику излучения небесного тела и определять такие характеристики космической плазмы, как ее цветовая или эффективная температура, концентрация электронов, оптическая толщина. Для оценки параметров излучающей плазмы по данным колориметрии разными авторами выполнены многочисленные модельные расчеты. В частности, расчеты цветовых характеристик излучения абсолютно черного тела (Страйжис, 1977), излучения водородной плазмы оптически тонкой и оптически толстой в Бальмеровском континууме в широких пределах температур и электронных концентраций (Чаленко, 1999). Таким образом, мониторинг звезды в полосах UBVR_I на протяжении времени жизни вспышки теоретически дает возможность получить детальную картину характеристик плазмы вспышки и их изменений со временем.

Колориметрический анализ вспышек от 15 октября 1996 г. и 10 октября 1998 г. впервые был выполнен Алексеевым и др. (2000). Проанализировав поведение вспышек на двухцветных диаграммах (U–B) – (B–V), (U–B) – (V–R), (U–B) – (V–I), они отметили, что предмаксимальное излучение вспышки 15.10.1996 локализуется вблизи чернотельного излучения, сдвигаясь к максимуму в более холодную область (от 20000 К до 10000 К), а локализация максимального излучения второй вспышки с точностью до ошибок совпадает с цветами первой вспышки. Сравнение с предыдущими наблюдениями показало, что цвета собственного излучения этих сильных вспышек не отличаются от цветов вспышек, наблюдавшихся ранее. Эти результаты согласуются с выводом, впервые сделанным в работе Гринина и Соболева (1977), о том, что излучение мощных вспышек звезд типа UV Cet около максимума блеска близко к чернотельному излучению в интервале температур 10000–20000 К. Однако недостаточная точность определения цветов собственного излучения вспышки ограничила возможности исследования небольшим участком вспышки около максимума блеска и не позволила провести диагностику плазмы вспышки на начальной и конечной стадии развития последней. Этот недостаток в значительной степени устраняется в настоящей работе за счет цифровой фильтрации UBVR_I кривых блеска вспышек. Цифровая фильтрация позволяет повысить точность фотометрических измерений за счет некоторого снижения временного разрешения.

В настоящей работе выполнен детальный колориметрический анализ собственного излучения упомянутых вспышек практически на всем промежутке времени их регистрации. Мы использовали технику колориметрического анализа, подробно описанную в работе Жилиев и др. (2007). В последующих разделах приведены данные наблюдений, методы обработки данных с использованием цифровой фильтрации UBVR_I кривых блеска, техники цветовых треков. Диагностика характеристик плазмы вспышки проводится по данным UBVR_I-колориметрии с использованием теоретических цветовых диаграмм. Приводится определение температур и размеров вспышек в максимуме светимости в приближении абсолютно черного тела.

2 Наблюдения

Наблюдения вспыхивающей звезды EV Lac в режиме быстрой фотометрии проводятся в КрАО с 1996 года. Мониторинг осуществляется на телескопе АЗТ-11 на UBVR_I фотометре-поляриметре (Калмин, Шаховской, 1995) со временем накопления 0.1 сек. Основная часть наблюдений выполняется в рамках международной кооперативной программы с использованием синхронной сети телескопов, включающей инструменты четырех обсерваторий в Украине, России, Греции и Болгарии. В данной работе анализируются две наиболее мощные вспышки EV Lac, зарегистрированные в КрАО за период с 1996 г. по настоящее время.

Вспышка EV Lac 15 октября 1996 г. (максимум 20:44 UT) имела амплитуду 3.73 звездной величины в полосе U и длительность больше получаса (рис. 1). Вторая по величине вспышка наблюдалась

10 октября 1998 г. (максимум 19:14 UT). Ее амплитуда составила 2.72 звездных величины в полосе U, длительность – больше 20 минут (рис. 2).

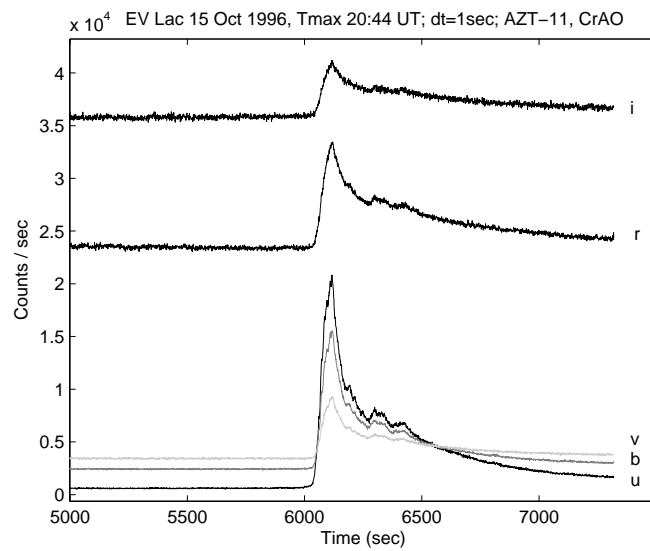


Рис. 1. UBVRi кривые блеска вспышки EV Lac 15 октября 1996 г. (максимум 20:44 UT). По оси абсцисс время в секундах от начала мониторинга. Продолжительность вспышки более 25 мин

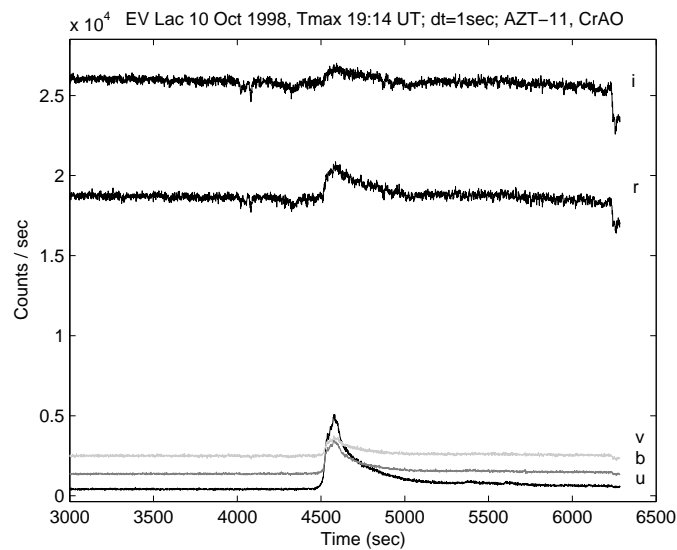


Рис. 2. UBVRi кривые блеска вспышки EV Lac 10 октября 1998 г. (максимум 19:14 UT)

Данные UBVR-I-фотометрии, полученные с высоким временным разрешением на телескопе АЗТ-11, позволяют проследить временные вариации показателей цвета собственного излучения вспышки по мере развития последней. Эти показатели цвета используются при построении временных цветовых треков для диагностики вспышечной плазмы и определения ее термодинамических характеристик.

3 Методы обработки данных

Для увеличения отношения сигнал/шум мы подвергаем ряды фотометрических данных цифровой фильтрации. Мы использовали цифровой фильтр Кайзера для получения сглаженной кривой блеска EV Lac и фильтр скользящего среднего для подавления высокочастотных шумов. Детальное изложение методов фильтрации можно найти в работе Жиляев и др. (2000). Фильтрация в частотной области может быть выполнена путем свертки ряда измерений $n(i)$ с коэффициентами $h(i)$ импульсной характеристики фильтра

$$n_f(\kappa) = \sum_{i=-l}^l h(i)n(\kappa - i).$$

Коэффициенты фильтра Кайзера имеют вид:

$$h(\kappa) = h(-\kappa) = \frac{\sin(\pi\nu_c\kappa)}{\pi\kappa} \cdot \frac{I_o(\eta\sqrt{1 - (\kappa/l)^2})}{I_o(\eta)},$$

где $I_o(\chi)$ является модифицированной функцией Бесселя нулевого порядка, величина η является параметром, который входит в модель фильтра, l – число пар коэффициентов фильтра. Три основных входных параметра, а именно: (1) полоса пропускания фильтра ν_c , (2) ширина переходной зоны фильтра и (3) величина подавления в зоне заграждения, выраженная в децибелах, полностью определяют величины η , l и фильтр в целом. Более подробную информацию можно найти в работе (Кайзер, Рид, 1977).

Процедура фильтрации уменьшает дисперсию шумов пропорционально полосе пропускания фильтра. Ошибка одного измерения может быть легко оценена из квантово-статистических соображений в приближении пуассоновского характера шумов. Временные цветовые треки на диаграммах цвет-цвет получаются как результат оптимальной цифровой фильтрации данных многоцветного мониторинга блеска звезды с высоким временным разрешением. Таким образом, техника временных цветовых треков обеспечивает высокую точность, необходимую для диагностики различных механизмов радиации, ответственных за наблюдаемое излучение вспышки.

Используя цветовые треки на диаграммах цвет-цвет, можно определить характеристики плазмы, начиная с самой ранней фазы развития вспышки. Как следует из колориметрического анализа вспышек, приведенного ниже, излучение в максимуме вспышки имеет спектр абсолютно черного тела. Температуру излучения абсолютно черного тела можно определить по положению вспышки на диаграмме цвет-цвет. Далее, используя модель абсолютно черного тела для фотосферы EV Lac в спокойном состоянии, можно оценить и размер вспышки.

Светимость вспышки в полосе U может быть определена путем свертки спектра абсолютно черного тела с кривой пропускания U фильтра. Площадь вспышки s можно определить как (Алексеев, Гершберг, 1997):

$$\frac{s}{S} = (10^{0.4\Delta U} - 1) \frac{F_{U_0}}{F_U},$$

где S – площадь видимого диска звезды, ΔU – амплитуда вспышки в полосе U, F_{U_0} и F_U – функция Планка фотосферы и вспышки с эффективной температурой T_{bb} :

$$F(T_{bb}) = \int U(\lambda)/\lambda^5 [\exp(1.4388/\lambda T_{bb}) - 1] d\lambda.$$

Здесь $U(\lambda)$ – кривая пропускания фильтра U . Мы можем заменить ее эквивалентной шириной реального фильтра. Зная наблюдаемую амплитуду вспышки в полосе U , температуру фотосферы EV Lac и температуру в максимуме вспышки, можно легко оценить размер вспышки по приведенным выше формулам.

4 Результаты

Для получения сглаженных кривых блеска вспышки 15 октября 1996 г. был применен низкочастотный фильтр Кайзера с временным окном 10 сек (частота среза 0.1 Гц, ширина переходной области 0.05 Гц, затухание в полосе заграждения 40 децибел).

Для построения двуцветных диаграмм использованы данные показателей цвета различных источников излучения (Страйжис, 1977; Чаленко, 1999). Светлая область диаграммы соответствует цветовым характеристикам водородной плазмы, оптически тонкой в Бальмеровском континууме с $T_e \sim 10000$ К и N_e от 10^{14} до 10^{10} см $^{-3}$, темная область диаграммы соответствует оптически толстой плазме с T_e от 15000 К до 8000 К. Жирной линией отмечено излучение абсолютно черного тела. Три кривые в правой части диаграммы – излучение верхних слоев фотосферы красных карликов, нагреваемых быстрыми частицами.

Рисунок 3 показывает временную эволюцию цветовых характеристик собственного излучения вспышки 15.10.1996 в первые десять минут ее жизни. Отдельно расположенный эллипс соответствует окончанию наблюдений. Приведены 95%-е эллипсы ошибок. Эллипсы на треках следуют с временным шагом 1 секунда. Ошибки цветов вычислены для пуассоновских потоков квантов.

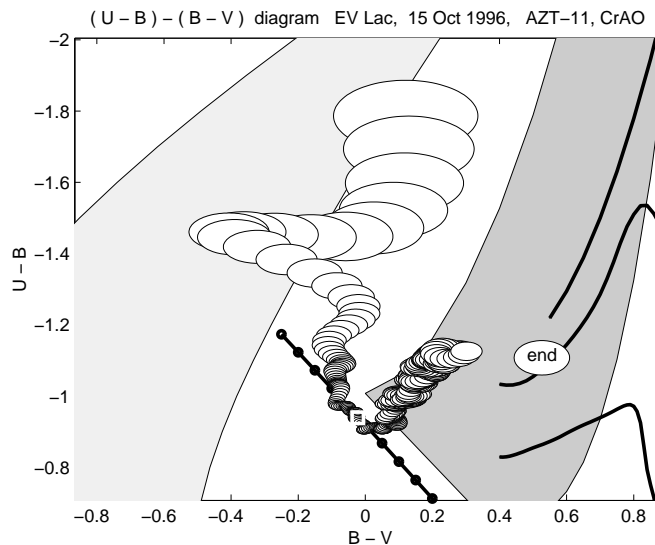


Рис. 3. Цветовой трек вспышки 15 октября 1996 г. Приведены 95%-е эллипсы ошибок. Эллипсы следуют с 1-секундными интервалами времени. Квадратик отмечает положение максимума вспышки. Отдельно расположенный эллипс соответствует окончанию наблюдений

Условное начало вспышки находится близко к области, занятой излучением водородной плазмы, оптически тонкой в Бальмеровском континууме. Через 86 секунд вспышка достигает максимума при температуре $T_{bb} \sim 15000$ К. Около одной минуты в районе максимума блеска вспышка светит как абсолютно черное тело. При этом ее температура падает примерно от 20000 К до 12000 К. После максимума цветовые треки собственного излучения вспышки перемещаются в область, занятую

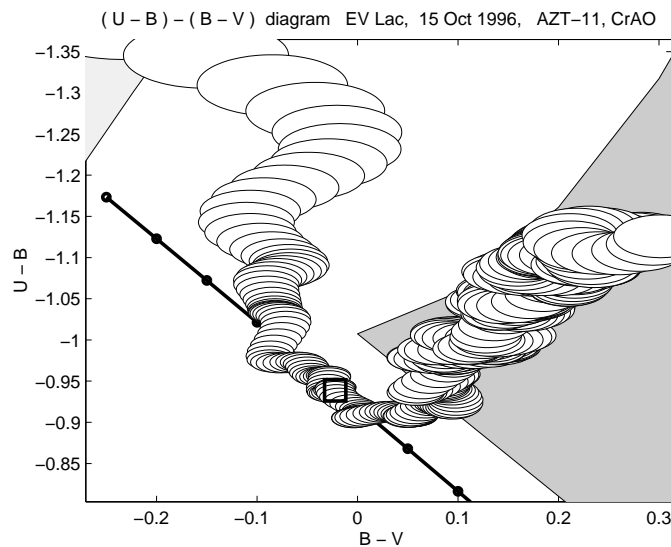


Рис. 4. Фрагмент вспышки 15 октября 1996 г. около точки максимума. Трек примерно 1 минуту идет вдоль линии излучения АЧТ (изображена жирной прямой линией), совершая при этом колебательные движения с периодичностью порядка 15 сек

водородной плазмой, оптически толстой в Бальмеровском континууме. В этой области вспышка проводит вторую часть жизни (около 15 минут наблюдений), при этом ее трек совершает колебания между эллипсом, оканчивающим временной трек первых 10 минут и эллипсом, соответствующим окончанию наблюдений. Следует отметить, что температура внутри области оптически толстой плазмы изменяется от 15000 К на левой границе до 8000 К на правой.

Двухцветные диаграммы $(U-B) - (V-R)$, $(U-B) - (V-I)$ подтверждают, что вспышка в максимуме блеска излучает как АЧТ с температурой примерно 15000 К.

Вариации цветов, которые так отчетливо демонстрируют треки вспышки на цветовой диаграмме $(U-B) - (B-V)$, вызываются присутствием высокочастотных колебаний собственного излучения вспышки (Ловкая, Жилиев, 2007) и прослеживаются в течение всего времени ее жизни. По диаграмме на рис. 3, 4 можно даже грубо оценить период колебаний порядка 15 секунд. Амплитуда вариаций цветов собственного излучения вспышки может достигать половины звездной величины, особенно на начальной стадии вспышки. Подробные данные о колебаниях собственного излучения вспышек можно найти в работе Жилиева и др. (2007).

Размер вспышки легко оценить по формулам, приведенным в разделе 3. Наблюдаемая амплитуда вспышки в полосе U составляет 3.73 звездной величины. Температура фотосферы EV Lac по данным Петтерсена (1980) составляет 3300 К. Принимая температуру в максимуме вспышки равной 15000 К, получаем, что линейный размер вспышки в максимуме светимости в приближении абсолютно черного тела составляет примерно 5 % радиуса звезды. Поскольку радиус EV Lac равен $2.5 \cdot 10^{10}$ см (Алексеев, Гершберг, 1997), площадь вспышки около $5.1 \cdot 10^{18}$ см².

Для получения сглаженных кривых блеска вспышки 10 октября 1998 г. был применен низкочастотный фильтр Кайзера с временным окном 15 сек (частота среза 0.05 Гц, ширина переходной области 0.034 Гц, затухание в полосе заграждения 50 децибел).

Рисунок 5 показывает изменение цветов собственного излучения этой вспышки по мере ее развития. Ошибки цветов вычислены для пуассоновских потоков квантов. Приведены 95%-е эллипсы ошибок. Эллипсы на треках следуют с временным шагом 1 секунда.

Условное начало вспышки лежит в области излучения водородной плазмы, оптически тонкой в Бальмеровском континууме с $T_e \sim 10000$ К и N_e от 10^{14} см $^{-3}$ до 10^{10} см $^{-3}$. Через 78 секунд от условного начала вспышки достигает своего максимума.

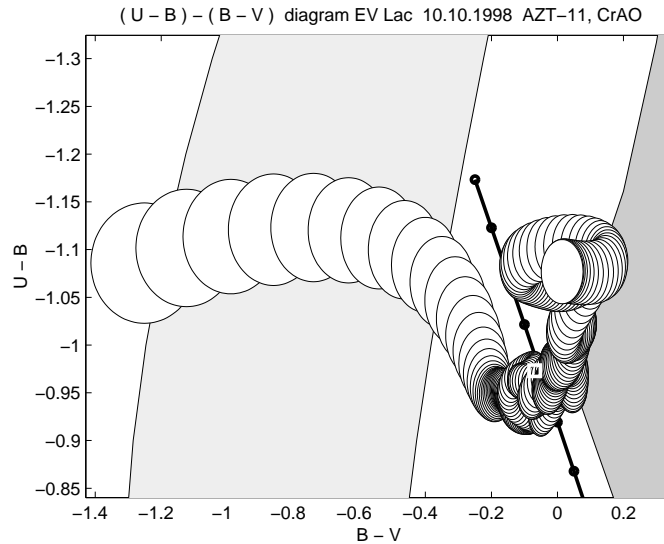


Рис. 5. Цветовой трек первых пяти минут вспышки EV Lac 10 октября 1998 г. Приведены 95%-е эллипсы ошибок. Эллипсы отмечают 1-секундные интервалы времени. Белый квадрат – положение максимума вспышки

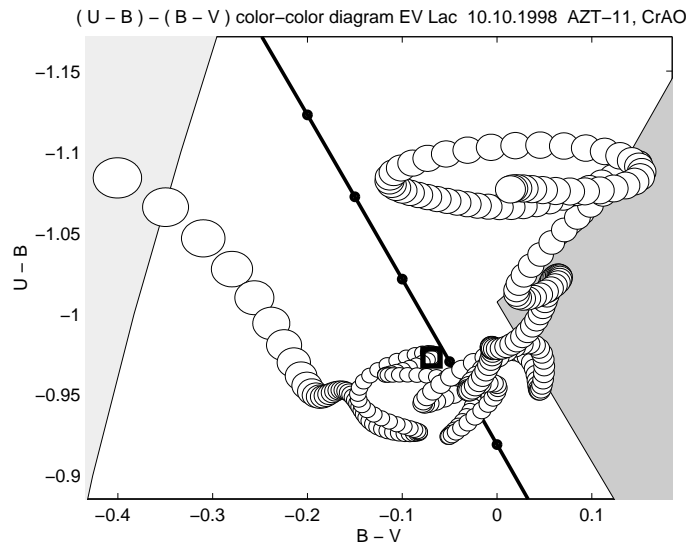


Рис. 6. Фрагмент вспышки 10 октября 1998 г. около точки максимума. Трек несколько раз пересекает линию излучения АЧТ. Черным квадратом отмечен максимум вспышки

Центральный фрагмент временного трека вспышки приведен на рис. 6. Размер эллипсов ошибок уменьшен до 2σ , что позволяет более детально проследить поведение вспышки в области, близкой к максимуму. В максимуме блеска вспышка светит как абсолютно черное тело с температурой около 16000 К, после максимума за время около одной минуты температура снижается до 14000 К. При этом трек вспышки несколько раз пересекает линию излучения АЧТ. Далее трек перемещается в область оптически толстой в Бальмеровском континууме плазмы, но в отличие от вспышки 15 октября 1996 г. надолго там не задерживается. Он проходит вдоль той границы области, где цвета излучения соответствуют $T_e = 15000$ К. Уже через 5 мин после начала вспышка покидает область оптически толстой в Бальмеровском континууме плазмы и начинает колебаться между положениями оптически тонкой и оптически толстой плазмы.

Вариации цветов, вызванные присутствием высокочастотных колебаний собственного излучения вспышки, отчетливо прослеживаются не только в области максимума, но и на других этапах вспышки вплоть до окончания мониторинга. Периодичность наблюдаемых колебаний составляет примерно 25 секунд, амплитуда – от ~ 0.05 до нескольких десятых звездной величины.

Принимая температуру в максимуме вспышки равной 16000 К, получаем, что линейный размер вспышки в максимуме светимости в приближении абсолютно черного тела составляет 2.8 % радиуса звезды, площадь вспышки $1.6 \cdot 10^{18}$ см².

5 Заключение

По данным скоростного UVVRI-мониторинга, ведущегося на телескопе АЗТ-11 с 1996 года, проведен детальный колориметрический анализ и исследована тонкая временная структура двух наиболее мощных (из наблюдавшихся в КрАО за период 1996–2011 гг.) вспышек красного вспыхивающего карлика EV Lac с амплитудами 3.73 (15.10.1996) и 2.72 (10.10.1998) звездных величин в полосе U.

Применение в настоящей работе цифровой фильтрации UVVRI кривых блеска вспышек позволило существенно повысить точность фотометрических измерений, что, в свою очередь, дало возможность выполнить детальный колориметрический анализ собственного излучения упомянутых вспышек не только в районе максимума, а практически на всем промежутке времени их регистрации, а также оценить температуру и размер вспышек в максимуме блеска.

В результате проведенного исследования с помощью двуцветных диаграмм обнаружено:

- оптическая толщина и температура плазмы вспышки изменяются по мере развития последней;
- часть времени до максимума блеска обе вспышки находятся в состоянии водородной плазмы, оптически тонкой в Бальмеровском континууме;
- в области максимума на протяжении примерно минуты обе вспышки излучают как абсолютно черное тело, температура которого изменяется от 20000 К до 12000 К и от 16000 К до 14000 К соответственно;
- после этого обе вспышки переходят в состояние плазмы, оптически толстой в Бальмеровском континууме;
- в максимуме блеска вспышки излучают как АЧТ с температурой примерно 15000 К и 16000 К;
- площади вспышек составляют: 0.26 % площади диска звезды или около $5.1 \cdot 10^{18}$ см² (15.10.1996) и 0.08 % площади диска звезды, или $1.6 \cdot 10^{18}$ см² (10.10.1998). (Отметим, что наиболее мощные вспышки на Солнце занимают около 0.1 % площади солнечного диска, что составляет $1.5 \cdot 10^{19}$ см².);
- на всех этапах обеих вспышек прослеживаются вариации цветов, вызванные присутствием высокочастотных колебаний собственного излучения вспышки. Периодичности наблюдаемых колебаний около 15 и 25 секунд, амплитуды – от нескольких сотых до нескольких десятых звездной величины.

В настоящей работе использованы фотометрические данные международной кампании наблюдений EV Lac 1996 и 1998 гг. Автор выражает благодарность участникам кампании Д.Н. Шаховскому и И.Ю. Алексееву за использование наблюдательных данных, Б.Е. Жилиеву и Р.Е. Гершбергу за

плодотворное обсуждение и постоянный интерес к данной работе, а также В.П. Грину за ценные замечания и Г.В. Нехай за помощь в оформлении рукописи.

Литература

- Алексеев И.Ю., Чаленко В.Э., Шаховской Д.Н. // Астрон. журн. 2000. Т. 77. № 10. С. 777.
- Алексеев, Гершберг (Alekseev I.Yu., Gershberg R.E.) // The Earth and the Universe/ Eds. Asteriadis G., Vantelas A., Contadakis M.E., Katsambalos K., Papadimitriou A. and Tsiavos I.N. Aristotle University of Thessaloniki. Thessaloniki. Ziti Editions. 1997. P. 53.
- Гринин В.П., Соболев В.В. // Астрофизика. 1977. Т. 13. С. 587.
- Жиляев и др. (Zhilyaev B.E., Romanyuk Ya.O., Verlyuk I.A., Svyatogorov O.A., Khalack V.R., Sergeev A.V., Konstantinova-Antova R.K., Antov A.P., Bachev R.S., Alekseev I.Yu., Chalenko V.E., Shakhovskoy D.N., Contadakis M.E., Avgoloupis S.J.) // Astron. Astrophys. 2000. V. 364. P. 641.
- Жиляев и др. (Zhilyaev B.E., Romanyuk Ya.O., Svyatogorov O.A., Verlyuk I.A., Kaminsky B., Andreev M., Sergeev A.V., Gershberg R.E., Lovkaya M.N., Avgoloupis S.J., Seiradakis J.H., Contadakis M.E., Antov A.P., Konstantinova-Antova R.K., Bogdanovski R.) // Astron. Astrophys. 2007. V. 465. Issue 1. P. 235.
- Кайзер, Рид (Kaiser J.F., Reed W.A.) // Rev. Sci. Instrum. 1977. V. 48. P. 1447.
- Калмин С.Ю., Шаховской Д.Н. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1995. Т. 11. № 3. С. 85.
- Ловкая М.Н., Жиляев Б.Е. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. № 3. С. 158.
- Петтерсен (Pettersen B.R.) // Astron. Astrophys. 1980. V. 82. P. 53.
- Страйжис (Straizys V.) // Multicolor Stellar Photometry. Mokslas Publishers. Vilnius. 1977.
- Чаленко (Chalenko N.) // Astron. Rep. 1999. № 7. P. 459.