

УДК 524.321

Колориметрия двух вспышек EV Lac по UBVRI-наблюдениям в 2004 г.

М.Н. Ловкая¹, Б.Е. Жилияев²

¹НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный; rita@crao.crimea.ua

²Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, zhilyaev@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 28 февраля 2006 г.

Аннотация. По данным быстрой UBVRI-фотометрии, полученным в ходе международных синхронных наблюдений красного вспыхивающего карлика EV Lac, исследована тонкая временная структура вспышек и подтверждено появление высокочастотных колебаний (ВЧК) во время вспышки. Обнаружено, что ВЧК появляются на самых ранних стадиях развития вспышки. Периоды колебаний могут составлять от нескольких секунд до десятков секунд. Типичные амплитуды – несколько сотых звездной величины в полосе U. Появление ВЧК приводит к значительным вариациям цветов собственного излучения вспышки – до 1 и более звездных величин. Детальный колориметрический анализ позволил отметить изменение по мере развития вспышки EV Lac таких характеристик вспышечной плазмы, как оптическая толщина, электронная концентрация и температура. В максимуме блеска вспышка излучает как АЧТ с температурой примерно 18500 ± 1500 К. Установлено, что большую часть времени жизни вспышка колеблется между состояниями водородной плазмы оптически толстой и оптически тонкой в Бальмеровском континууме.

COLORIMETRY OF TWO FLARES OF EV Lac BY THE UBVRI OBSERVATIONS IN 2004, by M. N. Lovkaya, B. E. Zhilyaev. According to the fast UBVRI photometry data, obtained during the international synchronous observations of the flaring red dwarf EV Lac, a fine time structure of two flare events is investigated and occurrence of high-frequency oscillations (HFO) during a flare is confirmed. It is revealed, that HFO appear at the earliest stages of the development of a flare. The periods of fluctuations are from several seconds up to tens seconds. Typical amplitudes amount some 100-th of a magnitude in the U band. HFO lead to significant variations of colors of pure flare radiation– up to 1 and more magnitude. Detailed colorimetric analysis allows to note changing of such characteristics of flare as optical thickness, electronic concentration and temperature during the flare development. In the brightness maximum a flare radiates, as a black body with temperature approximately 18500 ± 1500 K. It is established, that a flare is oscillating between the states of optically thick and optically thin in the *Balmer* continuum hydrogen plasma during the most part of its lifetime.

Ключевые слова: UBVRI-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 UBVRI. Для быстропеременных и сравнительно слабых объектов, к которым относятся вспыхивающие 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 АЧТ, синхротронного излучения, излучения релятивистских e^- и p при взаимодействии с фотосферой звезды, излучения водородной плазмы оптически тонкой и оптически толстой в Бальмеровском континууме в широких пределах температур и электронных концентраций. Таким образом, мониторинг звезды в полосах UBVRI на протяжении времени жизни вспышки теоретически дает возможность получить детальную картину характеристик плазмы вспышки и их изменений со временем.

Однако колориметрия вспышек вспыхивающих звезд пока не привела к однозначным выводам о свойствах собственного излучения вспышек. По мнению авторов, основные трудности в интерпретации данных колориметрии вспыхивающих звезд связаны с невысоким временным разрешением (5 – 19 с) и недостаточной точностью наблюдений в полосе U ($\sim 0.15 \text{ mag}$). Авторами было установлено (Жиляев и др., 2005), что вариации колор-индексов собственного излучения вспышек могут достигать до 1 и более звездных величин на протяжении нескольких секунд. Можно предположить, что это обстоятельство было основной причиной затруднений в прежних работах по колориметрии вспышек.

В последние годы организованы кампании синхронных наблюдений вспыхивающих звезд с высоким временным разрешением (до 0.1 с) на нескольких удаленных телескопах. Для обработки данных синхронного мониторинга вспышек была применена цифровая фильтрация, что резко повысило точность оценок блеска и цветов вспышек. Был установлен (Жиляев и др., 2000; Жиляев и др., 2003) новый факт – появление высокочастотных колебаний (ВЧК) во время вспышки. В ранних работах по колориметрии этот фактор не учитывался. Комбинация новых подходов при выполнении колориметрии привела к существенному прогрессу. В настоящее время колориметрия вспышек может быть проведена от момента зарождения вспышки до полного ее угасания.

Принципиальные выводы настоящей работы в следующем:

– ВЧК появляются на самых ранних стадиях развития вспышки. Периоды колебаний могут составлять от нескольких секунд до десятков секунд. Типичные амплитуды – несколько сотых звездной величины в полосе U.

– ВЧК приводят к значительным вариациям цветов собственного излучения вспышки – до 1 и более звездных величин.

Следует отметить, что в последнее время ВЧК обнаружены у вспыхивающих карликовых звезд в радиодиапазоне (Абада-Симон и др., 1995) и в рентгене (Митра-Краев и др., 2005).

2 Наблюдения и результаты

Наблюдения вспыхивающей звезды EV Lac проводились в сентябре 2004 года. Наблюдения выполнены с Синхронной Сетью Телескопов, включающей инструменты четырех обсерваторий в Украине, России, Греции и Болгарии:

– Пик Терскол, Северный Кавказ, Россия: 2-м телескоп, двухканальный быстродействующий фотометр UBVR (Жиляев и др., 1992);

- КраО, Украина: АЗТ-11 (1.25-м), UBVR_I-фотометр-поляриметр (Калмин, Шаховской, 1995); 50", двухканальный быстродействующий фотометр UBVR (Жилиев и др., 1992);
- Стефанион, Греция: 76-см, одноканальный фотометр в полосе U (Мавридис и др., 1982);
- Рожен и Белоградчик, Болгария: 2-м, 60-см, одноканальный UBV фотометр (Антов, Константинова-Антова, 1995).

За 14 ночей наблюдений было зарегистрировано более десятка вспышек. В настоящей работе проводится анализ двух вспышек, наблюдавшихся одновременно на трех телескопах с синхронизацией 0.1 с.

Вспышка EV Lac 14 сентября 2004 г. (максимум 20:31 UT) наблюдалась на трех телескопах: 2-м (Терскол), 50" и АЗТ-11 (КраО). Амплитуда вспышки в полосе U превышала 2 звездные величины, длительность ~ 40 с.

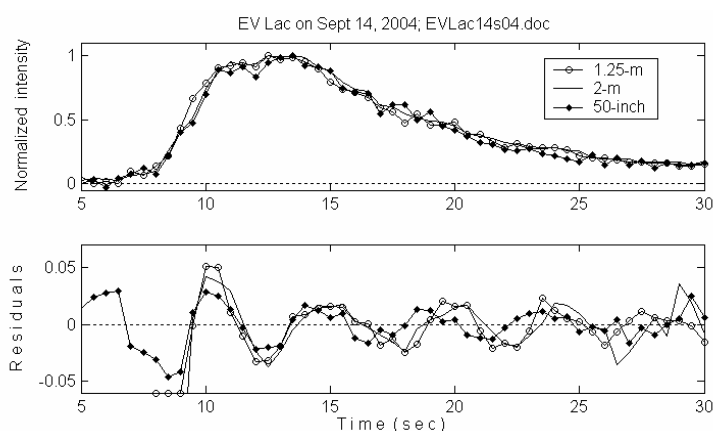


Рис 1. (а) Вспышка EV Lac, 14 сентября 2004, (б) ВЧК после цифровой фильтрации кривой блеска

На рис. 1 приведены фрагменты кривых блеска этой вспышки в полосе U до (верхний график) и после высокочастотной фильтрации (нижний график). Кривые блеска нормированы к единичной интенсивности в максимуме блеска. В исходных фотометрических данных на графике можно заметить только слабые признаки ВЧК. Нижний график ясно показывает присутствие ВЧК после соответствующей высокочастотной цифровой фильтрации кривых блеска (фильтр Кайзера: частота среза 0.167 Гц, ширина переходной области 0.1 Гц, подавление сигнала в полосе заграждения 50 децибел) (Кайзер, Рид, 1977). Для уменьшения шумовых колебаний также был применен фильтр скользящего среднего с эффективной полосой пропускания 1.5 с. Очевидная корреляция в отчетах, полученных на различных инструментах, является свидетельством реального существования ВЧК.

Временные ряды данных с этой вспышкой, полученные одновременно на 2-м (Терскол) и 50" (Крым) телескопах были использованы для построения вейвлет-спектров мощности. Кривые блеска вспышки в полосе U представлены на верхнем графике рис. 2. Ниже – ВЧК, полученные в результате цифровой фильтрации этих кривых блеска. Период колебаний ~ 4.5 с, амплитуда – несколько сотых звездной величины. Далее следует вейвлет-спектр мощности в зависимости от времени, построенный для кривых блеска (после цифровой фильтрации). Толстая

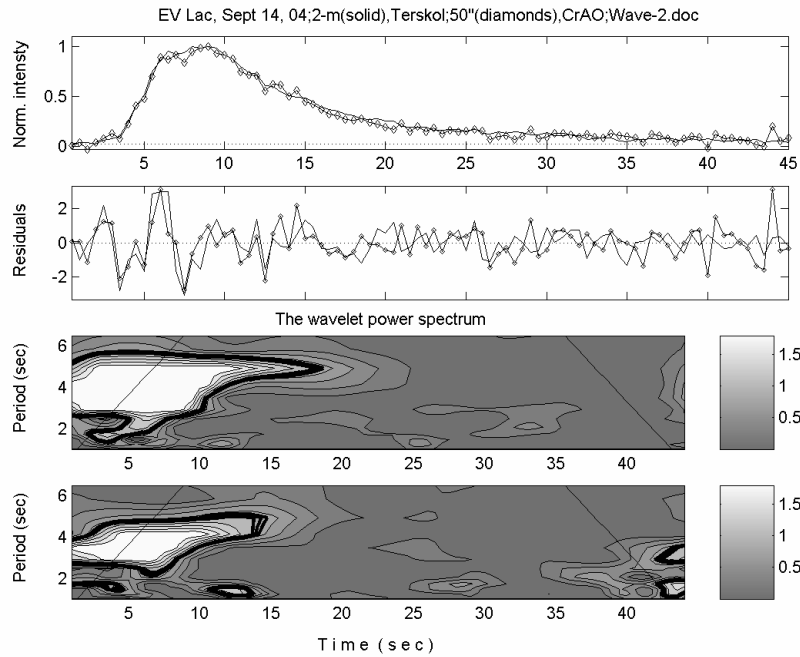


Рис. 2. (а) кривые блеска вспышки в полосе U по данным телескопов 2-м (Терскол) и 50'' (Крым); (б) ВЧК, полученные в результате цифровой фильтрации этих кривых блеска; (с, d) вейвлет-спектр мощности в зависимости от времени. Ордината – фурье-период в секундах.

контурная кривая ограничивает 95% доверительную область для пиков в спектре мощности. Наибольшая мощность сконцентрирована в интервале периодов колебаний 3-5 с. Из сравнения рельефа пика с рис. (б) можно заключить, что пик в вейвлет-спектре связан с ВЧК в окрестности максимума вспышки на интервале около 20 с.

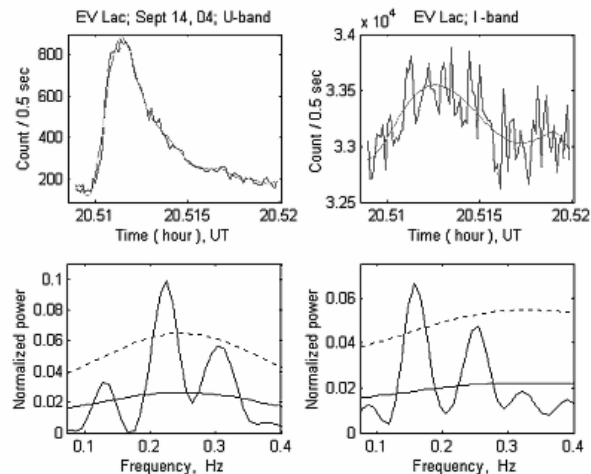


Рис. 3. Полученные из наблюдений кривые блеска вспышки 14 сентября 2004 г. в полосах U (верхний слева) и I (верхний справа) и их приближения полиномами. Спектры мощности остатков (нижний ряд) обнаруживают наличие гармоник ВЧК с периодами 4.5 с и 6.3 с соответственно.

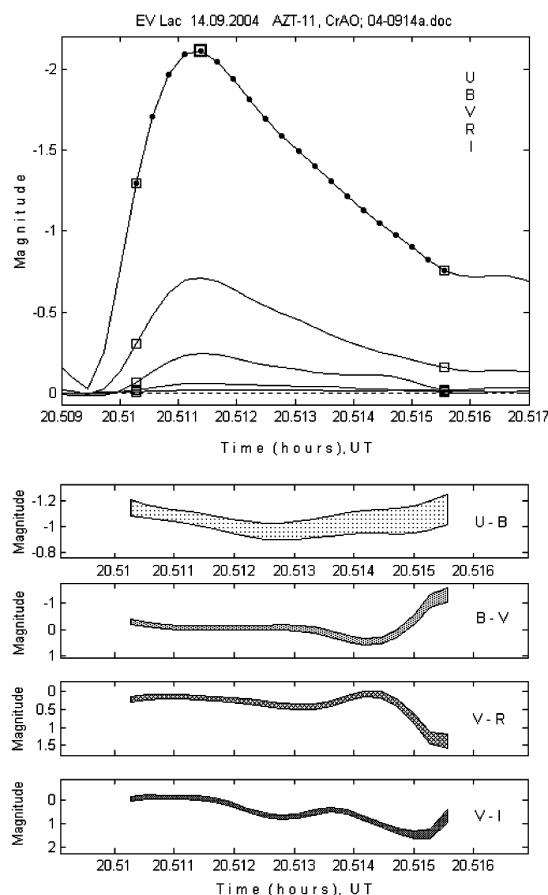


Рис. 4. UBVR I-кривые блеска и показатели цвета собственного излучения вспышки EV Lac 14.09.2004 (наблюдения на АЗТ-11 КрАО) после применения низкочастотной цифровой фильтрации.

Рис. 3 показывает исходные и сглаженные кривые блеска в полосах U и I по наблюдениям на телескопе АЗТ-11 КрАО. Сглаженные кривые получены аппроксимацией полиномами (от 5 до 13 степени) по методу наименьших квадратов. После вычитания сглаженных кривых остаточные отклонения были подвергнуты спектральному анализу путем сглаживания спектров мощности со спектральным окном Тьюки (Дженкинс, Ватс, 1969). Спектры мощности на рисунке 3 демонстрируют колебания с низкой степенью когерентности в полосах U и I с периодами 4.5 с и 6.3 с соответственно. 99% доверительный уровень для шумовых пиков обозначен пунктиром. Между колебаниями, зарегистрированными в полосах U и I, отмечается сдвиг по частоте.

Данные UBVR I-фотометрии, полученные на телескопе АЗТ-11 КрАО, позволяют проследить временные вариации показателей цвета. Последние используются при построении временных цветовых треков, имеющих важное значение для диагностики вспышечной плазмы и определения ее термодинамических характеристик.

Рис. 4 представляет сглаженные UBVR I-кривые блеска и показатели цвета собственного излучения вспышки EV Lac 14 сентября 2004 г. Для получения сглаженных кривых блеска был применен низкочастотный фильтр Кайзера с временным окном порядка 5 с (частота среза 0.2 Гц, ширина переходной области 0.2 Гц, затухание в полосе заграждения 50 децибел). Интервал времени, пригодный для колориметрического анализа был ограничен примерно 20 секундами, хотя вспышка оставалась видимой в полосе U в течение более длительного времени (~ 40 с). Эти ограничения связаны с низкой амплитудой вспышки в полосах R и I.

Начало и конец выбранного интервала и максимум вспышки помечены квадратиками. Маркеры-кружки на кривой блеска в полосе U следуют через 1 с. Показатели цвета собственного излучения вспышки представлены в виде 95% доверительных коридоров. Ошибки цветов вычислены для Пуассоновских потоков квантов. Как видим, вариации показателей цвета в течение кратковременного периода существования вспышки могут достигать 1 звездной величины и более.

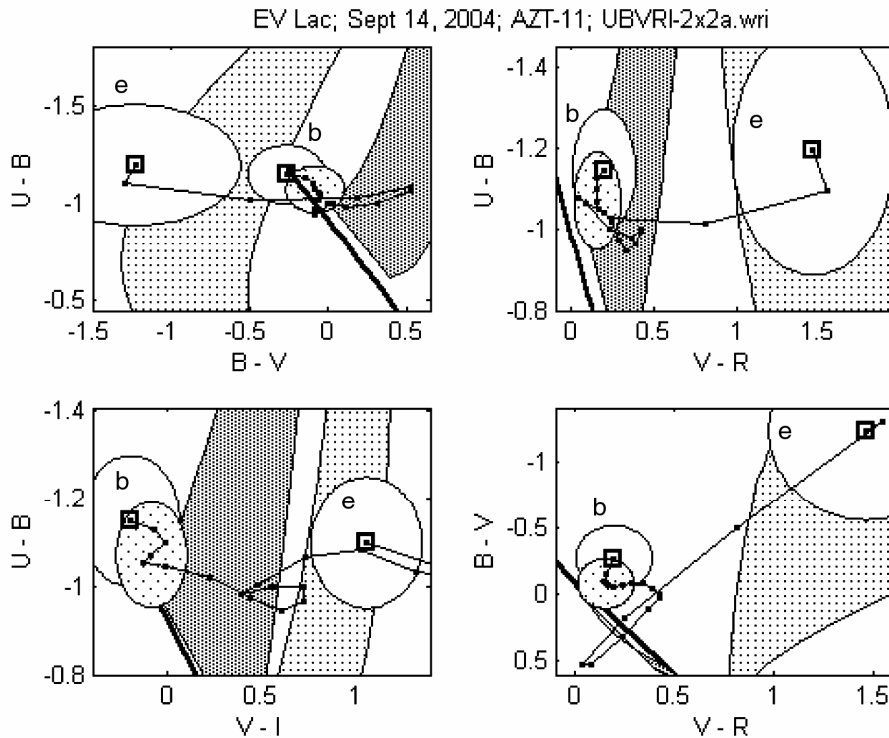


Рис. 5. Цветовые временные треки вспышки EV Lac 14 сентября 2004г.

Рис. 5 показывает временную эволюцию цветовых характеристик собственного излучения вспышки 14 сентября 2004г. Начало и конец вспышки отмечены квадратиками. Приведены 95% эллипсы ошибок в начале вспышки (b), в максимуме и в конце вспышки (e). Маркеры на треках следуют с временным шагом 1 с. Для построения двухцветных диаграмм использованы данные показателей цвета различных источников излучения (Страйжис, 1977; Чаленко, 1999). Светлосерая область 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 $^{-3}$, темно-серая область соответствует оптически толстой плазме с T_e от 15000 до 8000 К. Жирной черной линией отмечено излучение абсолютно черного тела.

Условное начало вспышки находится близко к области, занятой излучением абсолютно черного тела (АЧТ) с T от 17000 до 22000 К. Через 4 секунды вспышка достигает максимума при температуре $T_{bb} \sim 18500$ К. Плазма вспышки оказывается непрозрачной только вблизи максимума блеска в течение нескольких секунд. После максимума цветовые треки собственного излучения вспышки перемещаются в область, занятую водородной плазмой, оптически толстой в Бальмеровском континууме. Температура вспышки понижается до $T_e \sim 8000 - 10000$ К. Потом за несколько секунд вспышка переходит в область, занимаемую водородной плазмой, оптически тонкой в Бальмеровском континууме с $T_e \sim 10000$ К и N_e от 10^{14} до 10^{10} см $^{-3}$.

Следующие рисунки представляют кривые блеска и цветовые треки второй вспышки, наблюдавшейся 12 сентября 2004.

Эту вспышку зарегистрировали все астропункты в Украине, России, Греции и Болгарии. Амплитуда вспышки в полосе U составила 1.5 звездных величины, продолжительность ~ 150 с.

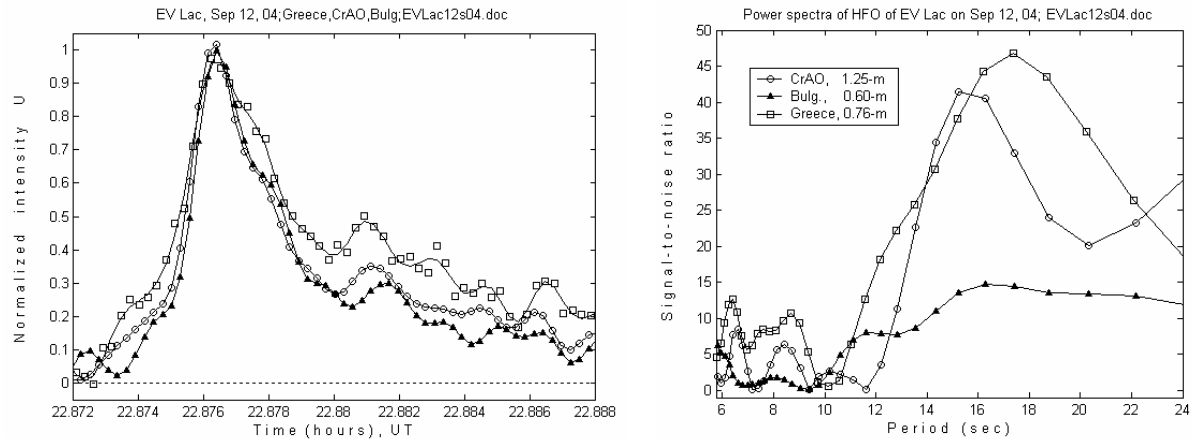


Рис. 6. Вспышка EV Lac 12 сентября 2004г. Кривые блеска в полосе U и их спектры мощности по данным наблюдений на трех удаленных телескопах: АЗТ-11, Украина; 0.76-м, Греция; 0.60-м, Болгария.

Рис. 6 демонстрирует высокую степень совпадения кривых блеска в полосе U, полученных одновременно на инструментах в обсерваториях КрАО, Белоградчик и Стефанион. Исходные и сглаженные данные ясно показывают присутствие ВЧК на ниспадающей части вспышки. На правом графике приведены спектры мощности, вычисленные по этим кривым блеска. Все спектры демонстрируют колебания с периодами около 17, 8 и 6 секунд.

Временные ряды, содержащие эту вспышку, также были подвергнуты вейвлет-анализу. Рис. 7 представляет кривые блеска вспышки по наблюдениям на 3-х телескопах в КрАО, Болгарии и Греции и высокочастотные колебания блеска в полосе U после исключения основной кривой блеска вспышки с помощью полиномов по методу наименьших квадратов. Ниже следуют локальные вейвлет-спектры мощности, построенные с использованием вейвлетов Морли. Графики показывают, что ВЧК с периодом около 17 с появляются вблизи начала вспышки, возможно провоцируют ее. Время жизни высокочастотных колебаний меньше времени существования вспышки и составляет примерно 1 минуту.

По данным многоцветной фотометрии этой вспышки на телескопе АЗТ-11 КрАО был проведен колориметрический анализ. Рис. 8 показывает низкочастотные UVV-кривые блеска и соответствующие показатели цвета излучения вспышки. Для сглаживания был применен низкочастотный фильтр Кайзера с временным окном 15 с (частота среза 0.067 Гц, ширина переходной области 0.05 Гц, затухание в полосе заграждения 50 децибел). Кривые блеска и показатели цвета наглядно демонстрируют колебания с периодом порядка 17 с. Кривые блеска в полосах R и I были исключены из рассмотрения из-за интенсивных вариаций, вызванных ВЧК. На кривой показателя цвета B-V звездочками отмечены пики в моменты 12 с, 29 с и 46 с от условного начала вспышки. Как мы увидим на следующем рисунке, в этих точках трек вспышки на двуцветной диаграмме пересекает линию абсолютно чёрного тела.

Рис. 9 изображает цветовой временной трек вспышки. Маркеры на треке следуют с временным шагом 5 с. Согласно теоретическим двуцветным диаграммам (Чаленко, 1999), начало вспышки попадает в область, соответствующую излучению водородной плазмы, оптически толстой в Бальмеровском континууме с $T_e \sim 10000$ К. В этой же области локализовано излучение фотосферы, нагреваемой потоками быстрых электронов с энергиями 50, 100 и 200 keV.

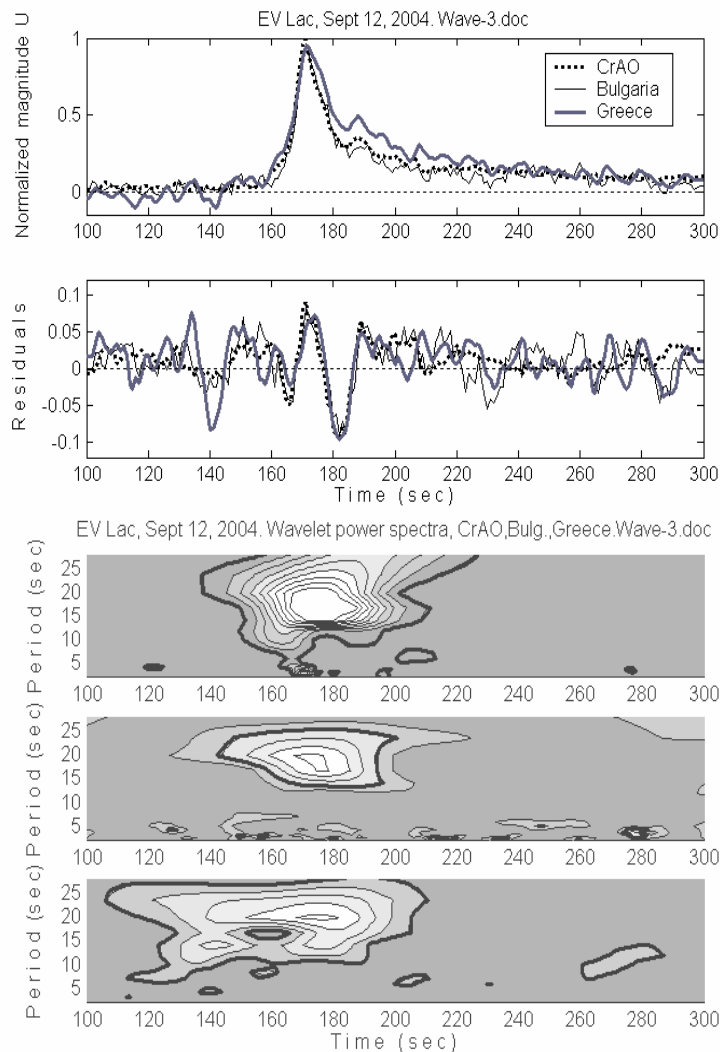


Рис. 7. (а) Кривые блеска вспышки EV Lac 12.09.2004 по наблюдениям на 3-х телескопах в КрАО, Болгарии и Греции; (б) ВЧК блеска в полосе U после исключения основной кривой блеска вспышки; (с-е) локальные вейвлет-спектры мощности с использованием вейвлетов Морли. Толстая контурная кривая ограничивает 95% доверительную область для пиков в спектре мощности.

Временные цветовые треки позволяют нарисовать следующий сценарий развития вспышки. В течение примерно 10 с от условного начала вспышки достигает максимума блеска и излучает как АЧТ с $T_{bb} = 17000 - 22000$ К. После максимума вспышка начинает осциллировать между областями диаграммы, занятыми водородной плазмой оптически толстой и оптически тонкой в Бальмеровском континууме. В конце вспышки (отмечен квадратом) трек перемещается в область излучения оптически тонкой водородной плазмы с T_e порядка 10000 К. Жирные черные кружки соответствуют максимумам на цветовой кривой В-V в моменты времени 12 с, 29 с, 46 с от условного начала вспышки (см рис. 8) и приходятся на точки, где трек вспышки пересекает линию излучения АЧТ.

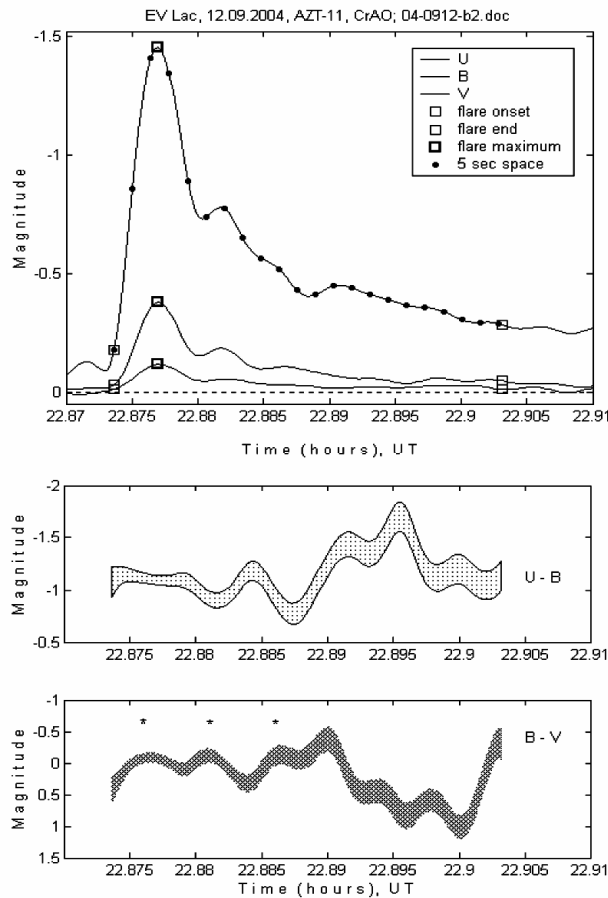


Рис. 8. Низкочастотные UBV-кривые блеска и соответствующие показатели цвета вспышки EV Lac 12 сентября 2004г по наблюдениям на телескопе АЗТ-11 КрАО.

Для ограниченной области вблизи максимума вспышки оказалось возможным оценить также показатель цвета (V-R) и построить 2 двуцветных диаграммы. Рис. 10 представляет цветные треки в районе максимума вспышки. Жирная черная линия соответствует излучению АЧТ в диапазоне 13000 – 36000 К. 95% эллипсы ошибок соответствуют излучению в максимуме вспышки. Эллипсы ошибок покрывают область температур от 17000 до 22000 К с наиболее вероятным значением 18500 К. Маркеры отмечают 1-секундные интервалы времени. Двуцветная диаграмма (U-B) – (V-R) подтверждает, что вспышка в максимуме блеска излучает как АЧТ с температурой примерно 18500 К.

3 Заключение

Детальный колориметрический анализ двух вспышек позволил оценить важные характеристики вспышек EV Lac: температуру в максимуме и на спаде блеска, изменение оптической толщи и электронной концентрации по мере развития вспышки.

Установлен новый ранее неизвестный факт: колебания плазмы вспышки между состояниями оптически толстой и оптически тонкой в Бальмеровском континууме. Эти колебания недавно нашли теоретическое объяснение (Куприянова и др., 2004; Степанов и др., 2005). ВЧК рассматриваются как быстрые магнито-звуковые колебания в магнитных корональных петлях звезды. Теория дает возможность оценить характеристики корональных петель (температуру, электронную концентрацию, характерные размеры).

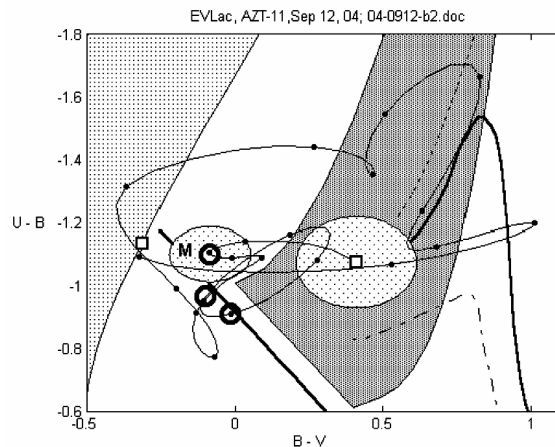


Рис. 9. Цветовые треки вспышки 12 сентября 2004г. Маркеры отмечают интервалы времени 5 с. Начало и конец вспышки отмечены квадратиками. 95% эллипсы ошибок приведены в начале и максимуме вспышки. Маркеры в виде больших черных кружков соответствуют максимумам на цветовой кривой B-V (звездочки на рис. 8).

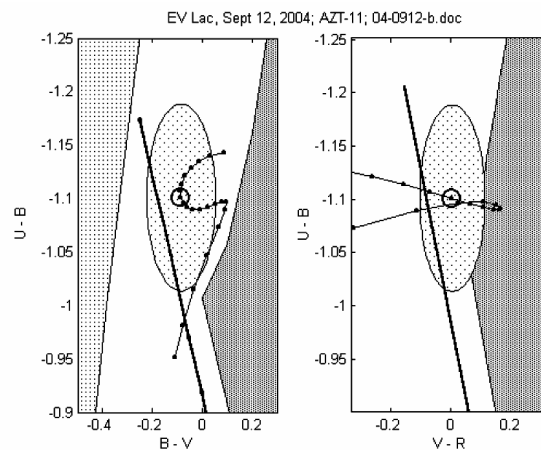


Рис. 10. Цветовые треки в районе максимума вспышки. Жирная черная линия соответствует излучению АЧТ в диапазоне 13000-36000 К. 95% эллипсы ошибок соответствуют излучению в максимуме вспышки. Эллипсы ошибок покрывают область температур от 17000 до 22000 К с наиболее вероятным значением 18500 К. Маркеры отмечают интервалы 1 с.

Это открывает новые перспективы для изучения корон вспыхивающих звезд, “*корональной сейсмологии*”. Материалом для такого рода работ могут служить синхронные наблюдения вспыхивающих звезд в UBVRI-системе на нескольких удаленных телескопах с высоким временным разрешением.

Благодарности. В настоящей работе использованы фотометрические данные международной кампании синхронных наблюдений EV Lac 2004 года. Авторы выражают благодарность участникам кампании С. Авголоупису, А. Антову, И. Верлюк, Р. Константиновой-Антовой, Дж. Сейрадакису и Я. Романюку за использование наблюдательных данных. Благодарим Р.Е. Гершберга за плодотворное обсуждение и постоянный интерес к данной работе.

Литература

- Абада-Симон и др. (Abada-Simon M., Lecacheux A., Aubier M., and Bookbinder J.) // *Lect. Notes Phys.* 1995. V. 454. P. 32.
- Антов, Константинова-Антова (Antov A., Konstantinova-Antova R.) // *Robotic observatories*. Ed. Bode M.F. New York: Wiley. 1995. P. 69.
- Дженкинс, Ватс (Jenkins G.M., Watts D.G.) // *Spectral Analysis and its Applications*. London: Holden-Day. 1969.
- Жилиев Б.Е., Романюк Я.О., Святогоров О.А. // *Астрон. журн.* 1992. Т. 69. С. 895.
- Жилиев 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.
- Жилиев и др. (Zhilyaev B., Romanyuk Ya., Svyatogorov O., Verlyuk I., Alekseev I., Lovkaya M., Avgoloupis S., Contadakis M., Seiradakis J., Antov A., and Konstantinova-Antova R.) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement*. 2003. No 4. P. 30.
- Жилиев и др. (Zhilyaev B., Romanyuk Ya., Verlyuk I., Svyatogorov O., Kaminsky B., Andreev M., Gersberg R., Lovkaya M., Avgoloupis S., Seiradakis J., Contadakis M.E., Antov A., Konstantinova-Antova R., and Bogdanovski R.) // *Astron. Astrophys.* 2005. (submitted).
- Кайзер, Рид (Kaiser J.F., Reed W.A.) // *Rev. Sci. Instrum.* 1977. V. 48. N. 11. P. 1447.
- Калмин С.Ю., Шаховской Д.Н. // *КФНТ*. 1995. Т. 11. № 3. С. 85.
- Куприянова и др. (Koupryanova E.G., Tsap Y.T., Kopylova Y.G., Stepanov A.V.) // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*. IAU Symp. No. 223. Eds. Stepanov A.V., Benevolenskaya E.E. & Kosovichev A.G. 2004. P. 391.
- Мавридис и др. (Mavridis L.N., Asteriadis G., Mahmoud F.H.) // *Compendium in Astronomy*. Eds. Mariolopoulos E.G., Theocaris B.S., Mavridis L.N. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1982. P. 253.
- Митра-Краев и др. (Mitra-Kraev U.; Harra L.K.; Williams D.R.; Kraev E.) // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 436. P. 1041.
- Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Куприянова Е.Г. // *Письма в Астрон. журн.* 2005. Т. 31. С. 684.
- Страйжис В. // *Многоцветная фотометрия звезд*. Вильнюс: Моклас. 1977.
- Чаленко Н.Н. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. С. 529.