

УДК 520.351

**Б. Е. Жиляев<sup>1,2</sup>, А. В. Сергеев<sup>2</sup>, М. В. Андреев<sup>2</sup>,  
В. Г. Годунова<sup>2</sup>, В. Н. Решетник<sup>1,3</sup>, В. К. Тарадий<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680<sup>2</sup>Международный центр астрономических и медико-экологических исследований  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680<sup>3</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
ул. Владимирская, 64/13, Киев, 01601

### **Бесщелевой спектрограф для малых телескопов: первые результаты**

*Построен бесщелевой UBVR-спектрограф для использования на малых телескопах. Тестовые наблюдения на телескопе Цейс-600 на пике Терскол показали, что спектрограф является эффективным инструментом для изучения быстропротекающих процессов в переменных звездах с высоким временным разрешением. Спектрограф имеет разрешающую способность  $R \approx 100$  в окрестности  $\lambda = 480$  нм, погрешность определения длины волны составляет примерно 3 нм. Спектрограф обеспечивает умеренное отношение сигнал-шум для звезд до  $16^m$ . Он позволяет измерять эквивалентные ширины неблендированных линий до 0.1 нм. Разработанное специальное программное обеспечение, основанное на теории статистики квантов, позволяет обнаруживать относительные вариации в спектре, составляющие  $10^{-5}$  —  $10^{-6}$  от болометрического потока звезды. Наблюдения с помощью спектрографа позволили обнаружить вариации эмиссий в балмеровских линиях и линиях Ca II H, K у вспыхивающей звезды EV Lac в субсекундном диапазоне. Спектроскопический мониторинг позволяет исследовать вспышки звезд с малой амплитудой, выполнять детальный колориметрический анализ плазмы вспышек, определять температуры и размеры вспышек в максимуме интенсивности блеска. Наблюдения транзита экзопланеты HAT-P-1 B показали, что во время транзита мощность хромосферной активности родительской звезды не изменяется. Бесщелевой спектрограф низкой разрешающей способности открывает новую перспективу в изучении активных процессов, происходящих на поверхностях звезд.*

© Б. Е. ЖИЛЯЕВ, А. В. СЕРГЕЕВ, М. В. АНДРЕЕВ,  
В. Г. ГОДУНОВА, В. Н. РЕШЕТНИК, В. К. ТАРАДИЙ, 2013

*БЕЗЩІЛИННИЙ СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ МАЛИХ ТЕЛЕСКОПІВ: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ, Жиляєв Б. Ю., Сергєєв О. В., Андрєєв М. В., Годунова В. Г., Решетник В. Н., Тарадій В. К. — Побудовано безщілинний UBVR-спектрограф для використання на малих телескопах. Тестові спостереження на телескопі Цейс-600 на піку Терскол показали, що спектрограф є ефективним інструментом для вивчення скоротічних процесів у змінних зірках з високим часовим розділенням. Спектрограф має роздільну здатність  $R \approx 100$  поблизу  $\lambda = 480$  нм, похибка визначення довжини хвилі складає приблизно 3 нм. Спектрограф забезпечує помірне відношення сигнал-шум для зірок до  $16^m$ . Він дозволяє вимірювати еквівалентні ширини неблендованих ліній до 0.1 нм. Розроблене спеціальне програмне забезпечення, що базується на теорії статистики квантів, дозволяє виявляти відносні варіації  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  від болометричного потоку зірки. Спостереження за допомогою спектрографа дозволили виявити варіації емісій у бальмерівських лініях і лініях Ca II H, K у спалахуючої зірки EV Lac в субсекундному діапазоні. Спектроскопічний моніторинг дозволяє досліджувати спалахи зірок з малою амплітудою, виконувати детальний колориметричний аналіз плазми спалахів, визначати температури та розміри спалахів у максимумі інтенсивності блиску. Спостереження транзитів екзопланети HAT-P-1 B показали, що під час транзитів потужність хромосферної активності батьківської зірки не змінюється. Безщілинний спектрограф низької роздільної здатності відкриває нову перспективу у дослідженнях активних процесів, що відбуваються на поверхнях зірок.*

*A SLITLESS SPECTROGRAPH FOR SMALL TELESCOPES: INITIAL RESULTS by Zhilyaev B. E., Sergeev O. V., Andreev M. V., Godunova V. G., Reshetnyk V. M., Tarady V. K. — A slitless UBVR spectrograph is built for use with small telescopes. Some results of test observations with the Zeiss-600 telescope on peak Terskol give grounds to expect that the spectrograph is an effective tool for the study of transients in variable stars with high temporal resolution. The resolution of the spectrograph is  $R \approx 100$  in the vicinity of 480 nm and the accuracy of the wavelength determination is about 3 nm. The spectrograph provides a moderate signal-to-noise ratio for stars up to 16th magnitude. It allows us to measure the equivalent widths of not blended lines down to about 0.1 nm. Specialized software based on the theory of quantum statistics is developed. It allows one to detect variations about  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  in the relative power spectrum with respect to the bolometric flux from a star. Some observations obtained with the spectrograph revealed variations in the Balmer emission lines and lines of Ca II H, K in the flare star EV Lac in the subsecond range. Spectroscopic monitoring allows us to investigate stellar flares with small amplitudes, to perform a comprehensive colorimetric analysis of the burst plasma, to determine flare temperature and sizes at a maximum of light intensity. Observations of a transit of HAT-P-1 B showed that the chromospheric activity index of the hosting*

*star remains constant during a transit. A slitless low-resolution spectrograph opens new prospects for the study of active processes on stellar surfaces.*

## ВВЕДЕНИЕ

Впервые бесщелевой (grism) спектрограф для исследования звезд с эмиссией в линии  $H_\alpha$  в скоплении NGC 2264 в 1950-е годы использовал Хербиг [9] на 36-дюймовом телескопе Эдварда Кросли Ликской обсерватории. Спектрограф состоял из прозрачной дифракционной решетки 60 линий/мм, тонкой стеклянной призмы с углом  $4^\circ$  и линзы для коррекции комы. Прибор обеспечивал дисперсию 45 нм/мм.

В работе [10] был использован гризм-спектрограф, установленный на 1-м рефлекторе ( $f/7.5$ ) обсерватории Кит Пик. При прозрачной решетке 150 линий/мм дисперсия составляла 126 нм/мм, спектры регистрировались с помощью фотопластинок Па-О Кодак. Испытания показали, что за 60-мин экспозицию квазар PKS 0922+14 ( $B = 18.0^m$ ) демонстрирует  $UV$ -эксцесс и эмиссию  $\lambda$  365 нм (C III  $\lambda$  190.9 нм,  $z = 0.912$ ). Авторы отметили, что их спектрограф оказался очень эффективным и недорогим прибором, легко приспособляемым к различным телескопам и пригодным для решения широкого круга задач. Они также отметили, что спектрограф оказался намного более эффективным средством при наблюдениях объектов различных классов, чем фотометры, использующие метод измерений с последовательной сменой фильтров.

В Крымской астрофизической обсерватории бесщелевой гризм-спектрограф установлен на полуметровом менисковом телескопе МТМ-500 [1, 2]. Спектрограф используется для исследования распределения энергии в спектрах галактик и астероидов.

Бесщелевые спектрографы установлены на борту космических аппаратов HST и SWIFT. На космическом телескопе Хаббла (HST) установлены бесщелевые спектрографы STIS и NICMOS. Спектрограф NICMOS покрывает область длин волн 1.10—1.95 мкм с дисперсией 8 нм/пкл и разрешением около 12.5 нм [8]. Спектрограф включает гризму, комбинацию решетки и призмы, вмонтированную в турель фильтров. Для объектов ярче чем  $H = 17^m$  типичные измеренные значения отношения сигнал/шум составляют 50 и более. В июле 2007 г. архив космического телескопа Хаббла содержал около 9000 наблюдений со спектрографом NICMOS.

Гризм-спектрограф установлен также на УФ-телескопе космического аппарата SWIFT. Спектрограф работает в области спектра 170—290 нм и обеспечивает спектральное разрешение  $R \approx 150$  для звезд  $11^m$ — $15^m$  при умеренном отношении сигнал/шум [16]. Его основная задача состоит в регистрации спектра оптического излучения послесвечения космических гамма-вспышек и определения расстояния до источника по величине космологического красного смещения.

Бещелевой спектрограф, описанный в настоящей работе, позволяет регистрировать непрерывный спектр в области 350—900 нм и неblendированные спектральные линии с эквивалентной шириной около 0.1 нм. Для слабых объектов из записи такого спектра можно получать оценки звездных *UBVR*-величин, выполняя математическую свертку спектра с кривой пропускания фильтра. В таком режиме работы спектрограф становится спектрофотометром.

Бещелевой спектрограф ориентирован на исследование быстропротекающих событий. Практически даже с малыми телескопами такой прибор позволяет изучать вариации блеска в субсекундном диапазоне в объектах до  $14^m$  и слабее [16]. Бещелевые спектрографы нашли применение при исследовании послесвечений космических гамма-вспышек, сигналов от прохождения экзопланет по дискам звезд. В настоящей работе мы впервые приводим данные о быстром спектральном мониторинге вспыхивающих звезд.

### КОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРОГРАФА

В нашей работе мы следуем методу проектирования классического спектрографа, изложенного в работе [18]. Мы будем рассматривать бещелевой спектрограф, состоящий из дифракционной решетки и ПЗС-камеры. Разрешающая сила такого спектрографа обычно составляет 50—100 в области 480 нм и не зависит от конструкции дифракционной решетки. В нашем приборе решетка имеет 100 штрихов на миллиметр, диаметр 25 мм. Ее эффективность в нулевом и +1-м порядках дифракции составляет 22.5 и 67.6 % соответственно. Порядки выше второго мы игнорируем из-за их малого вклада в энергетический баланс.

В плоскости ПЗС-приемника дисперсия  $P$  может быть вычислена как

$$P = \frac{10^6 \cos\beta}{kmd}, \text{ нм/мм}, \quad (1)$$

где  $d$  — расстояние между решеткой и фокальной плоскостью в миллиметрах,  $\beta$  — угол исходящего луча после дифракции,  $m$  — число штрихов решетки на миллиметр,  $k$  — порядок спектра. Главным источником aberrаций в бещелевом спектрографе является хроматическая кома. Размер комы в зависимости от длины волны имеет вид

$$d\lambda_c = \frac{3\lambda}{16N^2} \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $N = F/D$  — отношение фокусного расстояния  $F$  к диаметру телескопа  $D$ . Отметим, что спектральное разрешение, ограниченное комой, не зависит от характеристик решетки, но существенно зависит от относительного отверстия телескопа  $N$ . Типичная характеристика комы такова, что примерно 80 % энергии концентрируется в пятне, определяемом выражением (2).

Испытания опытного образца бесщелевого спектрографа низкого разрешения проводились на телескопе Цейс-600 на пике Терскол с фотоприемником SpectraVideo™ Camera, Pixel Vision, Inc. [3]. Сенсор камеры: SI003AB,  $1024 \times 1024$ , размер пикселя равен  $24 \times 24$  мкм. Шум считывания: 5—8 электронов, темновой ток менее  $1 \text{ эл.} \cdot \text{пкл}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T = -45$  °С. В процессе испытаний были проведены спектральные наблюдения звезды типа Вольфа — Райе WR133, вспыхивающей звезды YZ CMi, ряда спектрофотометрических стандартов. Типичный вид усредненного спектра низкого разрешения можно видеть на рис. 3 (звезда GSC 3226 640,  $V = 10.69^m$ ).

Наблюдения вспыхивающей звезды YZ CMi в спокойном состоянии ( $U = 12.9^m$ ,  $B = 12.7^m$ ,  $V = 11.1^m$ ,  $R = 10.3^m$ ) показали, что можно получать качественные спектры с временным разрешением около 10 с на телескопе с 60-см апертурой. Во время вспышки время экспозиции может быть уменьшено до нескольких секунд.

UBVR-кривые блеска YZ CMi, полученные из спектральных данных путем свертки спектров с кривыми реакции фильтров демонстрируют фотометрические ошибки  $0.009^m$ ,  $0.007^m$ ,  $0.007^m$ ,  $0.008^m$  в полосах UBVR соответственно [3].

Измерения проникающей способности показали, что суммирование спектров объектов (shift-and-add technique) с  $U \approx 15^m$ ,  $R \approx 16^m$  с общим временем экспозиции 480 с обеспечивает отношение сигнал/шум  $\approx 15$  со спектральным разрешением 5.087 нм/пкл в окрестности 480 нм. Точность определения длин волн после калибровки составляет около 3 нм.

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

*Техника обнаружения и оценивания вариаций в спектрах.* Вариации интенсивности линий в спектре вносят дополнительный вклад в дисперсию сигнала по сравнению с участками спектра, где таких вариаций нет. Для нахождения вариаций в спектре можно использовать выражение для второго факториального момента  $h_{[2]}$  в теории счета фотонов [20]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma^2 - \langle n \rangle}{\langle n \rangle^2} = h_{[2]} - 1. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma^2$  и  $\langle n \rangle$  — дисперсия и среднее значение случайной величины. Величина  $\varepsilon$  характеризует относительную мощность флуктуаций интенсивности в ряде измерений. Для пуассоновских шумов дисперсия и среднее значение случайной величины тождественно равны,  $\sigma^2 = \langle n \rangle$ , и величина  $\varepsilon$  равна нулю, а факториальный момент  $h_{[2]}$  равен единице. В случае, если шумы измерений не подчиняются пуассоновской статистике, можно воспользоваться эмпирической зависимостью дисперсии шумов от средней интенсивности  $\langle n \rangle$ , определенной по контрольным звездам или спокойным участкам спектра. В работе [21] было по-



казано, что ошибка второго факториального момента  $h_{[2]}$  равна

$$\text{std}(h_{[2]}) = \frac{1}{\langle n \rangle} \sqrt{\frac{2}{N}}, \quad (4)$$

где  $N$  — длина ряда измерений.

Таким образом, вычисляя среднее и дисперсию ряда, можно определить величину  $\varepsilon$ . Существенное отличие  $\varepsilon$  от нуля позволяет найти линии в спектре, интенсивность которых изменяется со временем, а также оценить мощность вариаций.

На рис. 4 приведены данные о вариациях интенсивности линий водорода, Ca II  $H$ ,  $K$  и в области бальмеровского скачка в спектре вспыхающей звезды EV Lac в спокойном состоянии с высоким временным разрешением. Такие результаты получены и приводятся впервые.

**Обнаружение стохастической переменности.** Выражение (3) определяет также относительную мощность колебаний  $\varepsilon$  в частотной области  $\Delta f = 1/(2\Delta t) - 1/(n\Delta t)$ , где  $\Delta t$  — время выборки,  $n$  — длина сегмента данных. Выбирая соответствующее значение  $n$ , можно рассчитать спектр мощности флуктуаций, усредняя  $\varepsilon$  по времени в области частот, представляющей интерес. Этот метод особенно эффективен для анализа широкополосных сигналов. Фактическое значение  $\varepsilon$ , вызванное атмосферными мерцаниями, может быть определено из измерений звезд сравнения. Разница значений  $\varepsilon$  между наблюдаемой относительной мощностью звезды и мощностью атмосферных мерцаний считается равной  $\varepsilon$ -спектру звезды.

**Дифференциальная спектрометрия.** Быстрая спектрометрия с бесщелевым спектрографом низкого разрешения обладает рядом особенностей по сравнению с классической спектроскопией среднего и высокого разрешения. Во-первых, это субсекундные экспозиции звезд до  $12^m$  и более с малыми телескопами с умеренным отношением сигнал/шум. В классической спектроскопии экспозиция может продолжаться час и дольше. Во-вторых, спектральное разрешение существенно зависит от качества изображения.

Авторами разработаны дифференциальные методы обработки больших массивов спектров, позволяющие подавлять атмосферные и технологические шумы при наблюдениях с панорамными приемниками. Дифференциальные методы эффективно устраняют помехи, вызванные вариациями атмосферной прозрачности, гармонические компоненты, вызванные ошибками часового ведения телескопа и преобразования сигналов в аналого-цифровых устройствах фотоприемников. Данные наблюдений — это матрицы в координатах время — длина волны. Практика показывает, что деление матриц данных программной звезды и звезды сравнения подавляет атмосферные и технологические шумы на 20 и более децибел.

Эффективным средством для устранения низкочастотных шумов является операция дифференцирования спектров по длине волны (взятие первых разностей спектров). Дифференцирующий фильтр устра-

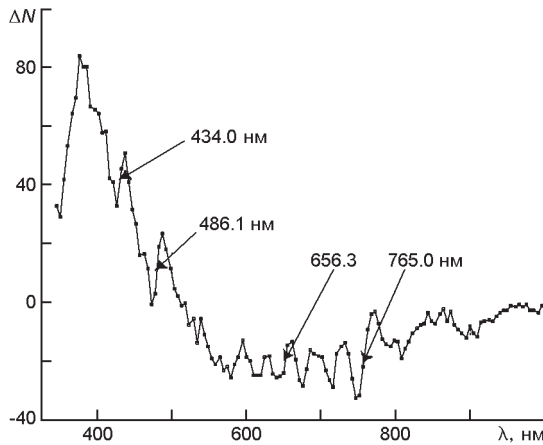


Рис. 1. Диаграмма первых разностей  $\Delta I$  для детектирования и оценивания линий поглощения в спектре звезды сравнения GSC 3226 640 ( $V = 10.69^m$ )

няет общие компоненты шумов в данных наблюдений и сохраняет временные компоненты, присущие данной длине волны в спектре. При этом дополнительно происходит визуализация тонкой структуры спектров.

Диаграмма первых разностей  $\Delta I$  усредненного спектра вдоль длины волны, изображенная на рис. 1 (дифференциальный спектр), позволяет находить в спектре линии поглощения/эмиссии, оценивать их эквивалентную ширину, спектральное разрешение ( $FWHM$ ). Так, на диаграмме для звезды GSC 3226 640 ( $V = 10.69^m$ ) видны линии поглощения  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ , атмосферные полосы поглощения кислорода  $O_2$  ( $\lambda\lambda$  680, 765 nm), воды  $H_2O$  ( $\lambda$  720 nm). По этим линиям и полосам может быть произведена калибровка спектров, определена точность оценивания длин волн в спектре, которая составила примерно 3 nm.

Диаграмма первых разностей спектра звезды GSC 3226 640 дает оценки эквивалентных ширин линий поглощения  $H_\alpha = 0.39$ ,  $H_\beta = 0.48$ ,  $H_\gamma = 0.51$  nm. Спектральное разрешение  $FWHM$  составляет около 10 nm, для бесщелевых спектрограмм оно определяется качеством изображения в момент наблюдений. Техника диаграмм позволяет детектировать линии поглощения/излучения с эквивалентной шириной больше примерно 0.1 nm при подходящем значении отношения сиг-

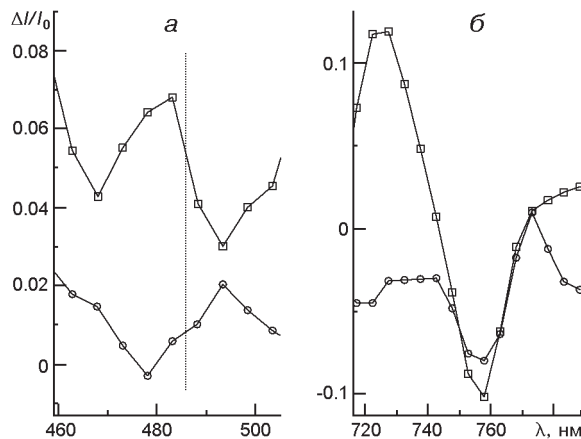


Рис. 2. Диаграммы первых разностей относительных интенсивностей EV Лас (квадратики) и звезды сравнения GSC 3226 640 (кружки): а — в окрестности линии  $H_\beta$  ( $\lambda$  486.1 nm), б — в окрестности полосы поглощения кислорода  $O_2$  ( $\lambda$  765 nm)

нал/шум. Это значение в данном случае обусловлено погрешностью определения относительной интенсивности в спектре порядка 1 %. На рис. 2 показаны диаграммы относительных интенсивностей EV Lac и звезды сравнения GSC 3226 640 в окрестности линии  $H_{\beta}$  ( $\lambda$  486.1 нм) и полосы поглощения кислорода  $O_2$  ( $\lambda$  765 нм).

## НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

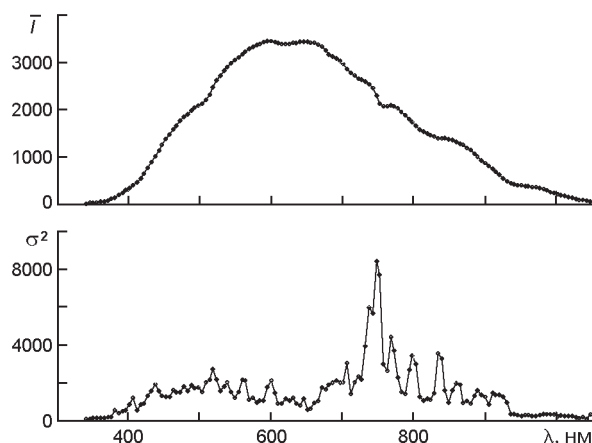
Спектральный мониторинг с бесщелевым спектрографом обычно выполняется с временным разрешением в несколько секунд и поставляет сотни, а иногда и тысячи спектров. Динамическая спектроскопия является основным средством для изучения быстропротекающих процессов.

Ковариации в динамических спектрах позволяют выявить переменные компоненты в спектрах, вызванные вкладом ночного неба. Как отмечено в работе [12], в спектре неба можно отчетливо видеть узко- и широкополосные особенности:  $\lambda$  435.8 нм [Hg I],  $\lambda$  519.9 нм [N I], линии  $[O_2]$  с длинами волн  $\lambda\lambda$  557.7, 630.0 и 636.4 нм, линию натрия высокого давления  $\lambda$  590 нм (HPS, high-pressure sodium). Среди сильных атмосферных эмиссий наблюдаются также широкополосные эмиссии  $[H_2O, OH]$  в диапазонах  $\lambda\lambda$  620—630, 640—660, 720—730, 740—760, 770—800, 820—840 нм. Наблюдается также и неидентифицированная эмиссия 508 нм [17].

На рис. 3 можно видеть вариации в спектре контрольной звезды, вызванные атмосферной эмиссией  $[O_2, OH]$  из приведенного выше списка.

**Обнаружение вариаций в спектре вспыхивающей звезды EV Lac в спокойном состоянии.** Спектральные наблюдения с высоким разрешением показали, что вспыхивающая звезда EV Lac демонстрирует вариации в эмиссионных линиях водорода и Ca II H и K в спокойном состоянии. Подобные вариации обнаружены также и у пяти других звезд [7].

Рис. 3. Усредненный спектр контрольной звезды GSC 3226640 (а) и ковариации в динамическом спектре звезды, вызванные эмиссиями ночного неба (б)





В спектре EV Lac в спокойном состоянии наблюдается также эмиссия гелия He I  $\lambda$  402.6 и 447.1 нм и кремния Si I  $\lambda$  390.5 нм [19].

Спектроскопический мониторинг отдельных вспыхивающих звезд в спокойном состоянии показал, что звезды проявляют отмеченные вариации эмиссий в бальмеровских линиях и линиях Ca II H и K на интервалах времени от нескольких дней до нескольких часов. Амплитуды вариаций в бальмеровских линиях от ночи к ночи могут достигать 300 % [7]. Вариации эмиссионных линий на малых временных шкалах не исследовались, так как время экспозиции при спектральных наблюдениях с высоким разрешением составляло не меньше двух часов. В работе [7] отмечается, что эмиссия, наблюдаемая в спектре EV Lac и др. вспыхивающих звезд, продуцируется, по-видимому, не однородной хромосферой, а локализована в активных областях: на пляжах, в протуберанцах либо микровспышках, которые не детектируются при наблюдениях в широкополосных фотометрических системах (UBVRI).

Эшелле-спектрограммы EV Lac в спокойном состоянии, полученные на Оптическом Телескопе Нордик (Nordic Optical Telescope) с высоким спектральным разрешением, позволили обнаружить широкие крылья у бальмеровских эмиссионных линий [4]. Авторы интерпретируют этот факт как свидетельство в пользу микровспышек.

Спектр мощности EV Lac в спокойном состоянии на рис. 4 демонстрирует вариации в эмиссионных линиях водорода и Ca II H, K, бальмеровском континууме и, возможно, в эмиссиях гелия He I  $\lambda$  402.6, 447.1 нм и кремния Si I  $\lambda$  390.5 нм. Однако из-за низкого спектрального разрешения утверждать с уверенностью о переменности в линиях гелия и кремния нельзя.

Из характера спектра мощности вариаций в линии H $\beta$  на рис. 5 (белый шум) можно заключить, что на интервале наблюдений 1600 с должно происходить несколько независимых микровспышек. Этот спектр получен с помощью  $\varepsilon$ -техники, описанной выше. Амплитуда

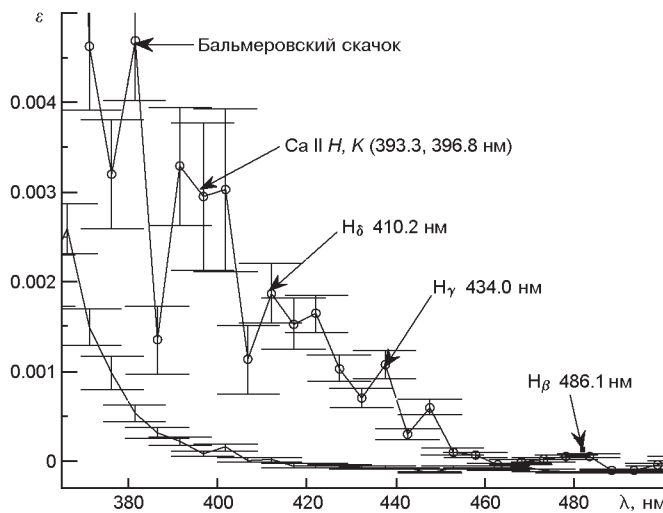
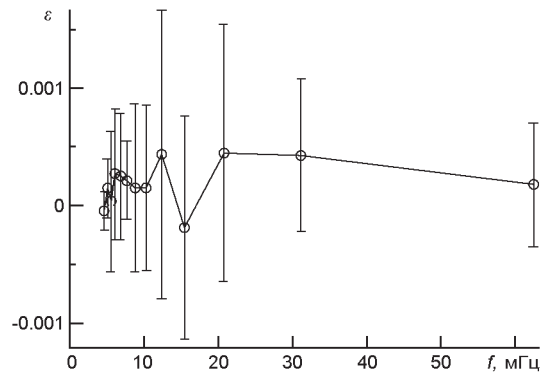


Рис. 4. Мощность вариаций в спектрах EV Lac (кружки) и звезды сравнения GSC 3226 640 (без маркеров). Показаны ошибки измерений. Спектры звезд получены одновременно на телескопе Цейс-600, пик Терскол, 30 мая 2010 г.

Рис. 5.  $\varepsilon$ -спектр мощности вариаций интенсивности в линии  $H_{\beta}$  EV Lac в спокойном состоянии



вариаций интенсивности в линии  $H_{\beta}$  составляет около  $0.01^m$ . Вариации интенсивности в окружающем континууме не обнаружены.

Методами дифференциальной спектроскопии (см. рис. 1, 2) можно показать, что в спектре EV Lac линия  $H_{\beta}$  находится в эмиссии, и ее эффективная ширина составляет  $0.8 \pm 0.08$  нм. По данным спектральных наблюдений EV Lac на телескопе Нордик [4] вариации эквивалентной ширины линии  $H_{\beta}$  в течение пяти ночей колебались от ночи к ночи в пределах  $0.54\text{--}0.77$  нм. Таким образом, результаты наших наблюдений совпадают в пределах ошибок с данными [4].

Суммарная относительная мощность вариаций в бальмеровском континууме и линиях Ca II H, K составляет примерно  $10^{-3}$ , т. е. вариации в них составляют около  $0.03^m$ .

Если учесть, что измеренные эквивалентные ширины эмиссионных линий водорода и кальция у EV Lac не превосходят 1.3 нм [4], то можно согласиться с цитируемыми авторами, что «перманентно существующие микровспышки практически необнаруживаемы фотометрически, но дают, тем не менее, основной вклад в излучение бальмеровских эмиссионных линий».

**Колориметрия вспышки EV Lac 30 мая 2010 г.** Из записей 700 спектров EV Lac 30 мая 2010 г с временным разрешением 8 с получены оценки звездных *UBVR*-величин путем математической свертки спектров с кривыми пропускания фильтров (рис. 6). *UBVR*-амплитуды вспышки составляют  $0.65^m$ ,  $0.25^m$ ,  $0.15^m$  и  $0.10^m$  соответственно. Длительность вспышки — около 50 мин. Внутренняя ошибка данных в полосах *UBVR* в спокойном состоянии звезды составляет  $0.10^m$ ,  $0.06^m$ ,  $0.05^m$  и  $0.05^m$  соответственно. На практике это позволяет обнаруживать вспышки с амплитудой в полосе *U* больше  $0.3^m$ .

Рис. 7 показывает временную эволюцию цветовых характеристик собственного излучения вспышки. Приведены 95 %-е эллипсы ошибок показателей цвета. Эллипсы на треках следуют с временным шагом 8 с. Ошибки цветов вычислены для пуассоновских потоков квантов. Как видим, вариации показателя цвета *U* – *B* могут достигать  $0.5^m$ , а показателя цвета *B* – *V* —  $1.2^m$ .

Используя цветовые треки на диаграммах «цвет — цвет», можно определить характеристики плазмы, начиная с самой ранней фазы раз-

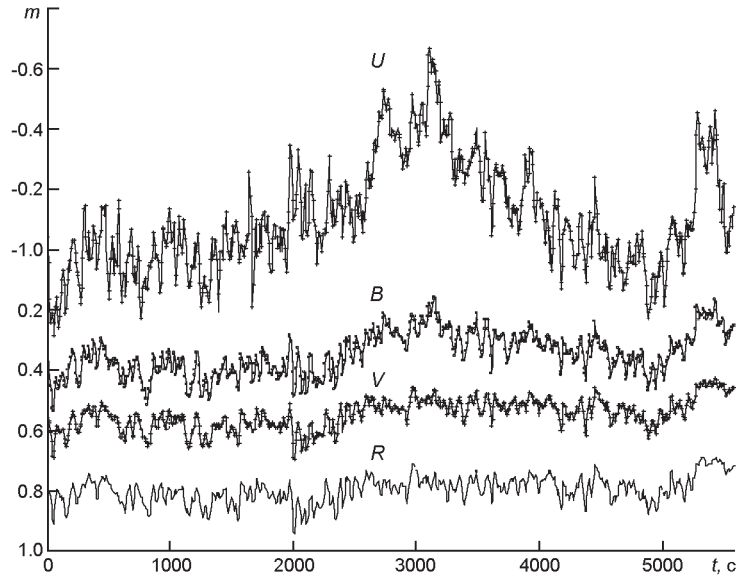


Рис. 6. Кривые блеска вспышки EV Lac 30 мая 2010 г. *BVR*-кривые сдвинуты для удобства

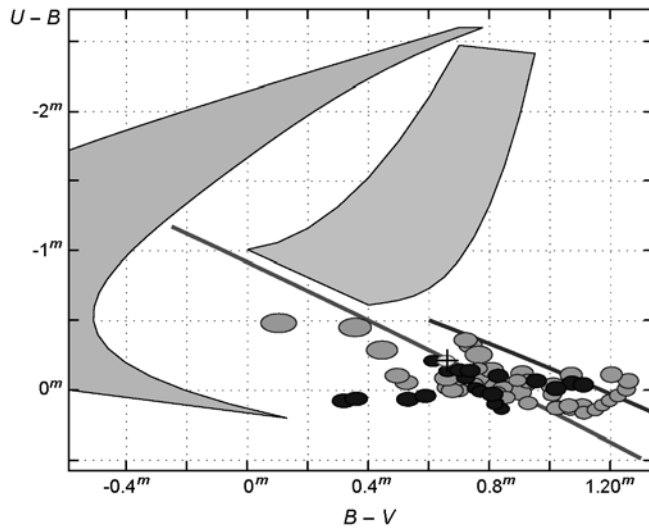


Рис. 7. Колориметрия вспышки EV Lac с 8-с разрешением. Крестиком отмечено положение максимума вспышки. Светлые эллипсы соответствуют предмаксимальной части кривой блеска вспышки, темные — послемаксимальной. Нижней жирной линией отмечено излучение абсолютно черного тела. Показаны также области оптически тонкой и толстой плазмы

вятия вспышки. Как следует из колориметрического анализа вспышки, излучение в максимуме 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. Детали колориметрического анализа вспышек можно найти в нашей работе [20]. Температура в максимуме вспышки составляет  $5700 \pm 100$  К. Размер вспышки составляет примерно 7 % радиуса звезды, или около 0.5 % площади видимого диска звезды.

**Наблюдения хромосферной активности во время транзита *HAT-P-1B*.** *HAT-P-1 B* — планета, вращающаяся вокруг звезды ADS

16402 В,  $V = 10.4^m$ , Sp G0. Второй компонент пары находится на расстоянии  $1550 \pm 250$  а. е. Период обращения планеты вокруг звезды равен 4.46529 сут, она находится от звезды на расстоянии 8.27 млн км, т. е. на расстоянии примерно десяти радиусов звезды, и относится к категории «горячих Юпитеров». Радиус планеты равен 1.36 радиуса Юпитера. Продолжительность транзита составляет 0.11671 сут.

Наблюдения транзита проводились 27 ноября 2009 г. на пике Терскол с помощью бесщелевого спектрографа, установленного на телескопе Цейс-600. Временное разрешение равнялось 6.604 с. Расчетное (эфемеридное) время прохождения планеты по диску звезды (середица транзита) в период наблюдений составило 17:49 UTC 27.11.2009, JD = 2455163.24239. По данным наших измерений это время равно 17:43 UTC.

На рис. 8 приведены кривые блеска транзита в полосах  $U$  и  $R$ . Звездой сравнения является второй компонент двойной системы. Фильтрация шумов с временным окном 198 с дает кривую блеска в центре транзита с точностью  $(O - C)_{rms} = 0.0024^m$  в полосе  $R$  и  $0.0026^m$  в полосе  $U$ .

На рис. 9 представлены дифференциальные спектры НАТ-Р-1 А и В. У обеих звезд на диаграмме видны линии поглощения  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ , Ca II H и K, атмосферные полосы поглощения кислорода  $O_2$  ( $\lambda\lambda$  680, 765 нм), воды  $H_2O$  ( $\lambda$  720 нм). По этим линиям и полосам произведена калибровка спектров, определена погрешность оценивания длин волн в спектре, которая составила примерно 3 нм.

Диаграмма дает следующие значения основных спектральных характеристик (в скобках значения для звезды сравнения): спектральное разрешение  $FWHM \approx 10$  нм. Эквивалентные ширины линий: Ca II — 0.235 нм (0.353 нм);  $H_\gamma$  — 0.50 нм (0.735 нм);  $H_\beta$  — 0.324 нм (0.429 нм);  $H_\alpha$  — 0.441 нм (0.588 нм).

На рис. 10 представлен график относительной мощности вариаций в спектрах звезды и звезды сравнения в зависимости от длины

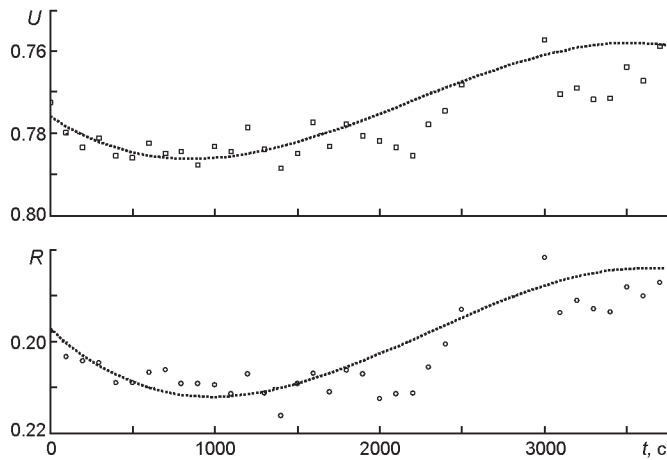


Рис. 8. Кривые блеска транзита НАТ-Р-1 В 27 ноября 2009 г. в полосах  $U$  и  $R$

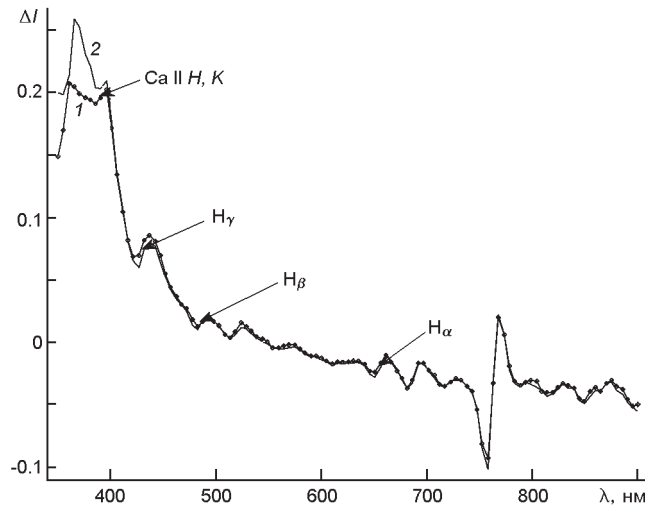


Рис. 9. Дифференциальные спектры НАТ-Р-1 А (1) и В (2)

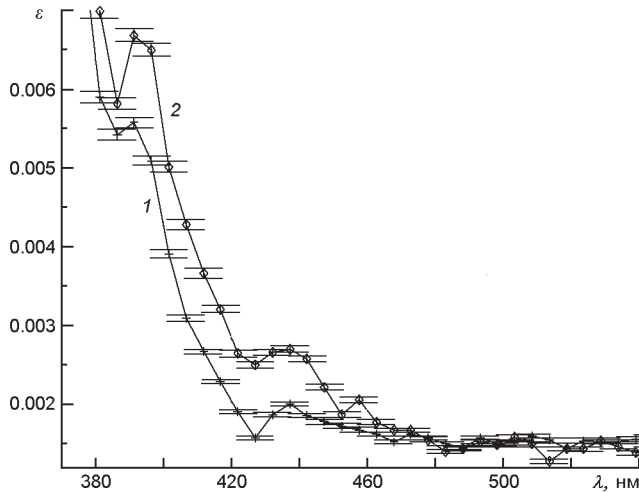


Рис. 10. Удельная мощность вариаций в спектрах НАТ-Р-1 А (1) и В (2). Приведены ошибки измерений согласно формуле (4)

волны. Отметим, что оба компонента двойной системы имеют очень близкие характеристики и общую эволюционную историю [6] (ADS 16402 В (НАТ-Р-1): спектр G0,  $V = 10.4^m$ , ADS 16402 А: спектр F8,  $V = 9.75^m$ ). В спектрах обеих звезд можно видеть значительные вариации в линиях Ca II H и K ( $\lambda\lambda$  393.3, 396.8 нм) и водорода H $\gamma$  ( $\lambda$  434 нм). Наличие пиков в спектре мощности свидетельствует о нестационарном характере хромосферной активности.

В этой связи интересно отметить, что уровни хромосферной активности ADS 16402 АВ были определены по спектрам, снятым на Кек-телескопе [6]. Эмиссии в ядрах линий Ca II H и K были измерены в каждом из компонентов пары для оценки хромосферной активности ADS 16402 А и В. По пяти спектрам ADS 16402 А измеренное среднее значение индекса хромосферной активности  $SHK = 0.16$ , что соответствует маунт-вилсоновскому индексу активности  $\lg R'_{HK} = -4.923$ . Для компонента В среднее значение  $SHK = 0.14$  и  $\lg R'_{HK} = -5.03$ . Отме-

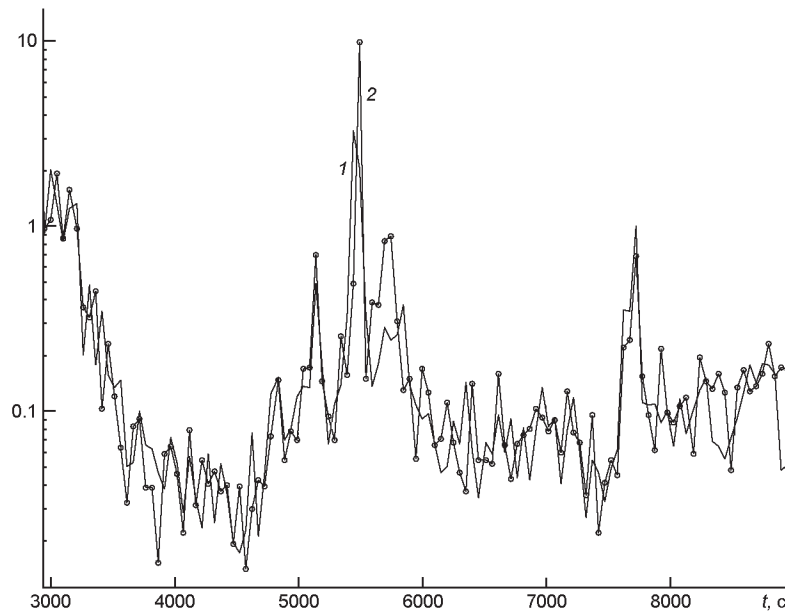


Рис. 11. Относительные вариации  $s$  в дифференциальных спектрах НАТ-Р-1 А (1) и В (2)

тим, что индекс  $\lg R'_{HK}$  определяется как логарифм отношения потока эмиссии в ядрах линий  $H$  и  $K$  кальция к полному фотометрическому потоку звезды. В целом эти значения индексов указывают на низкий уровень хромосферной активности обеих звезд [11]. Интересно сравнить приведенные выше индексы хромосферной активности с данными наших измерений. Отметим, что в нашем случае оценивается только переменный компонент индекса активности.

Из рис. 10 следует, что относительная мощность вариаций в линиях  $\text{Ca II } H$  и  $K$  составляет около  $10^{-3}$ . Это означает, что среднее квадратичное значение вариации эквивалентной ширины линий равно 3.2 % и относится к линиям  $\text{Ca II } H$  и  $K$  в целом. Низкое спектральное разрешение спектрографа не позволяет разделить линии поглощения и ядра эмиссии в них. Отметим также, что ошибки оценок относительной мощности вариаций в линиях  $\text{Ca II } H$  и  $K$  на рис. 10 равны  $5 \cdot 10^{-5}$ . В области спектра с большим значением сигнала ошибки могут быть на порядок меньше.

На рис. 11 показаны относительные значения временных вариаций дифференциальных спектров НАТ-Р-1 и его компаньона ADS 16402 А. Совпадение приведенных данных в пределах ошибок позволяют однозначно заключить, что экзопланета НАТ-Р-1 не вызывает изменений в спектре родительской звезды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирован и построен бесцелевой  $UBVR$ -спектрограф для малых телескопов. Спектрограф имеет разрешение  $R \approx 100$  в окрестности



480 нм и обеспечивает умеренное отношение сигнал/шум для звезд до  $16^m$ . Он позволяет измерять эквивалентные ширины неблендированных линий до 0.1 нм.

Тестовые наблюдения на телескопе Цейс-600 на пике Терскол показали, что спектрограф является эффективным инструментом для изучения транзиентов с высоким временным разрешением.

Разработано специальное программное обеспечение, основанное на теории статистики квантов, которое позволяет обнаружить вариации в спектре по отношению к болометрическому потоку от звезды до  $10^{-5}$ — $10^{-6}$ .

Спектроскопический мониторинг вспыхивающей звезды EV Lac в спокойном состоянии показал вариации эмиссий в бальмеровских линиях и линиях Ca II H, K в субсекундном диапазоне. Амплитуды вариаций интенсивности в линиях составляют от нескольких тысячных до  $0.01^m$ . Вариации интенсивности в окружающем континууме не обнаружены. Быстрые вариации в спектре вспыхивающей звезды EV Lac дают убедительные экспериментальные подтверждения гипотезы о микровспышках.

Спектроскопический мониторинг позволяет обнаруживать вспышки звезд с амплитудой больше примерно  $0.3^m$  в полосе U, выполнять детальный колориметрический анализ плазмы вспышек, определять температуры и размеры вспышек в максимуме интенсивности блеска.

Наблюдения транзита экзопланеты HAT-P-1 B (ADS 16402 B) на пике Терскол с бесщелевым спектрографом показало, что в спектре звезды можно видеть значительные вариации в линиях Ca II H и K и линии водорода  $H_\gamma$ . Однако второй компонент двойной системы ADS 16402 A показывает аналогичные признаки хромосферной активности. Отсюда был сделан вывод, что экзопланета HAT-P-1 B не оказывает влияния на хромосферную активность родительской звезды.

Таким образом, быстрая спектрометрия вспыхивающих, хромосферноактивных звезд, а также звезд других типов со спектрометром низкого разрешения открывает новую перспективу в изучении активных процессов, происходящих на поверхностях звезд.

1. А. с. 1822932 СССР. Афокальный дифракционный спектрограф прямого зрения / В. И. Проник, Л. М. Шарипова. — Оpubл. 23.06.93, Бюл. № 23.
2. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н. Разработка и применение спектрально-частотного метода для исследования поверхностей безатмосферных тел // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2009.—**105**, № 6. —С. 95—102.
3. Жильев Б. Е., Стеценко К. О., Сергеев А. В. и др. Спектрофотометр низкого разрешения для быстрой спектрометрии и фотометрии звезд // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—2010.—№ 6.—С. 422—425.
4. Alekseev I. Yu., Baranovskij E. A., Gershberg R. E., et al. Modeling of emission spectra of the flaring red dwarf EV Lac: Active regions, flares, and microflares // Astron. Rep.—2003.—**47**, N 4.—P. 312—325.

5. *Alekseev I. Yu., Kozlova O. V.* Starspots and active regions on the chromospherically active binary MS Ser // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**403**, N 1.—P. 205—215.
6. *Bakos G. A., Noyes R. W., Kovtacs G., et al.* HAT-P-1b: a large-radius, low-density exoplanet transiting one member of a stellar binary. — arXiv:astro-ph/0609369v2 15 Sep.2006.
7. *Bopp B. W.* Spectroscopic studies of flare stars: EV Lac, EQ Peg, AD Leo and V1054 Oph // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1974.—**168**.—P. 255—261.
8. *Freudling W., Kummel M., Haase J., et al.* The Hubble legacy archive NICMOS grism data // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**490**.—P. 1165—1179.
9. *Herbig G. H.* Emission-line stars associated with the nebulous cluster NGC 2264 // *Astrophys. J.*—1954.—**119**.—P. 483.
10. *Hoag A. A., Schroeder D. J.* “Nonobjective” grating spectroscopy // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1970.—**82**.—P. 1141.
11. *Knutson H. A., Howard A.W., Isaacson H.* A correlation between stellar activity and hot Jupiter emission spectra, arXiv:1004.2702v2 [astro-ph.EP] 22 Jul 2010
12. *Massey P., Foltz C. B.* The spectrum of the night sky over Mount Hopkins and Kitt Peak: Changes after a decade // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2000.—**112**.—P. 566—573.
13. *Montes D., Fernandes-Figueroa M. J., Castro E. D., et al.* Excess H $\alpha$  emission in chromospherically active binaries: the spectroscopic survey // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**109**.—P. 135—145.
14. *Montes D., Fernandes-Figueroa M. J., Cornide M., et al.* The behaviour of the excess Ca II H and K and He emissions in chromospherically active binaries // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**312**.—P. 221—233.
15. *Parker E. N.* Nanoflares and the solar X-ray corona // *Astrophys. J.*—1988.—**330**.—P. 474.
16. *Roming P. W. A., Kennedyb T. E., Masonb K. O., et al.* The swift ultra-violet/optical telescope, arXiv:astroph/0507413
17. *Sheen Yun-Kyeong, Byun Yong-Ik.* The night sky spectrum of mount bohyun // *J. Korean Astron. Soc.*—2004.—**37**, N 2.—P. 87—90.
18. *Thizy O., Buil C., Francois C., Neiner C.* Organizing a professional-amateur collaboration with a Lhires III spectrograph // *Planet. and Space Sci.*—2008.—**56**, N 14.—P. 1878—1881.
19. *Wilson O. C.* Spectrographic observations of a flare star // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1961.—**73**.—P. 15.
20. *Zhilyaev B. E., Romanyuk Ya. O., Svyatogorov O. A., et al.* Fast colorimetry of the flare star EV Lacertae from UBVRi observations in 2004 // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**465**, N 1.—P. 235—240.
21. *Zhilyaev B. E., Verlyuk I. A.* Observations of high-frequency activity of EV Lacertae // *Flares and Flashes / Eds J. Greiner, H. W. Duerbeck, R. E. Gershberg.* — Berlin: Springer-Verlag, 1994.—P. 82—84.—(IAUC N 151).

Статья поступила в редакцию 17.05.12