

УДК 520.84:524.35; 520.85:524.35; 524.35-337

## НАКОПЛЕНИЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЙ ПЕРЕНОС ЗАРЯДА НА ПЗС: ПОИСК БЫСТРОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗДЫ $\gamma$ Eqr

© 2013 Г. А. Чунтонов\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 31 мая 2013 года; принята в печать 13 августа 2013 года

Проводился поиск переменной составляющей магнитного поля у звезды  $\gamma$  Eqr по четырем линиям Nd III на ОЗСП БТА с использованием процедуры накопления и циклического переноса электронного изображения зеемановского спектра на ПЗС. Время отдельной экспозиции было выбрано равным 1/8 части периода спектральной переменности. В наблюдениях 5/6 ноября 2003 г. у звезды  $\gamma$  Eqr переменная составляющая магнитного поля с периодом 12.1 мин не была обнаружена.

Ключевые слова: *методики: поляриметрия—методики: спектроскопия—звёзды: магнитное поле—звёзды: индивидуальные:  $\gamma$  Eqr*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Куртц [1] в 1978 г. впервые нашел у звезды Пшибыльского HD 101065 фотометрическую переменность с амплитудой  $\Delta V = 0^m.012$  с периодом 12.141 мин. В настоящее время известно несколько десятков быстро осциллирующих холодных магнитных звезд, они получили название гоАр-звезд. Обзоры по этим звездам были сделаны Куртцем [2] и Мэтьюсом [3].  $\gamma$  Eqr (F0p,  $m_V = 4.7$ ) относится к классу гоАр-звезд. У нее обнаружены регулярные изменения лучевых скоростей некоторых спектральных линий с периодом около 12 мин и амплитудой до 1000 м/с [4–7]. Леоне и Куртц [7] нашли у нее и переменность магнитного поля с таким же периодом и амплитудой 110–240 Гс. За этим последовали измерения Кочухова и др. [8–10] с отрицательным результатом. С ошибками 10–17 Гс они не обнаружили переменной составляющей поля. Известно, что переменная составляющая магнитного поля может появляться и исчезать со временем, как и фотометрическая переменность [3], поэтому ее поиск нужно продолжать.

### 2. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В перечисленных работах процедура наблюдений состояла в получении большого числа спектров с коротким временем экспозиции. Оцифровка кадров при этом занимала значительную часть

времени. Шум считывания растет как корень квадратный из числа оцифрованных кадров. Такой способ измерений нам представляется неэффективным. Мы провели поиск переменной составляющей поля  $\gamma$  Eqr на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) 6-м телескопа с анализатором круговой поляризации в режиме накопления и циклического переноса изображения спектра на матрице ПЗС [12]. Анализатор [11] содержит суперхроматическую четвертьволновую фазовую пластинку [13], щель (деккер) и лучеразводящую пластину Савара из исландского шпата. Четвертьволновая пластинка расположена перед щелью анализатора. Щель анализатора установлена вместо штатной щели спектрографа ОЗСП. Фазовая пластинка может быть в двух положениях:  $0^\circ$  или  $90^\circ$ . В процессе наблюдений она оставалась неподвижной в одном из положений. Лучевые скорости и магнитное поле измерялись в каждой фазе периода отдельно по четырем линиям Nd III и усреднялись, также проводились измерения по линиям других элементов, не показывающих переменность [4–10], и тоже усреднялись. Затем проводилось вычитание вторых значений из первых, чтобы устранить дрейф спектрографа, и из каждого полученного значения вычиталось среднее по периоду значение. При числе строк у матрицы ПЗС 2048 и высоте двойного зеемановского спектра 54 строки в кадре можно разместить  $2048/54 \simeq 38$  таких спектров. Мы ограничились восемью, разбив период переменности спектральных линий у звезды  $\gamma$  Eqr 12.1 мин на восемь одинаковых частей по 90.75 с.

\*E-mail: chunt@sao.ru

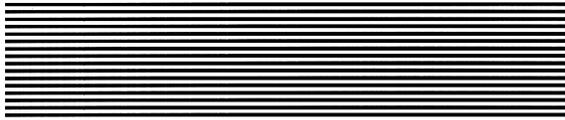


Рис. 1. Фрагмент изображения спектров звезды  $\gamma$  Eri, полученного в режиме накопления, сдвига и циклического переноса 05/06 ноября 2003 г.

### 3. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ И ЦИКЛИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ СПЕКТРА

Опишем процедуру работы программы. Сделаем экспозицию 90.75 мин и передвинем электронное изображение спектра поперек дисперсии на расстояние, равное ширине зеemanовского спектра (на 54 строки). Время переноса пренебрежимо мало. Продолжим процедуру еще семь раз, а после восьмой экспозиции сдвинем электронное изображение всех восьми спектров в обратную сторону в начальное положение. Это составит один цикл. Число циклов, время экспозиции, величину сдвига и количество сдвигов можно изменять при настройке программы. Необходимое число таких циклов определится величиной насыщения сигнала (пределом накопления ПЗС, которое составляет около 130 000 носителей заряда). Если не делать циклы, то по сравнению с режимом многих экспозиций заметного преимущества по времени не будет, потому что время оцифровки фрагмента кадра зависит от величины этого фрагмента. Для используемой ПЗС время оцифровки одиночного зеemanовского спектра шириной 54 строки составляет около 2 с, а фрагмента матрицы из восьми зеemanовских спектров — около 20 с. Только закливание поможет поднять эффективность измерений. В работе [10] можно было уменьшить время измерений за счет оцифровки только той части кадра, которая содержит используемые линии Nd III. По предварительным измерениям на одном пикселе в одной поляризации за время экспозиции 90.75 мин на ОЗСП от звезды  $\gamma$  Eri может накапливаться около 30 000 носителей заряда. Следовательно, мы можем делать до насыщения  $130\,000/30\,000 \simeq 4$  цикла. Запишем выражения для отношения сигнал/шум для трех режимов наблюдений.

1) Спектр копится  $m$ -ю долю периода и оцифровывается. При этом выполняется  $mn$  экспозиций, где  $n$  — число экспонированных кадров.

2) Спектр копится  $m$ -ю долю периода и передвигается на ПЗС, далее без оцифровки выполняется

вторая экспозиция, и так —  $m$  экспозиций со сдвигом за полный период. После этого производится оцифровка кадра с числом спектров  $m$ . Всего экспонируется  $n$  таких кадров.

3) Спектр копится  $m$ -ю долю периода, сдвигается и копится еще  $m - 1$  раз, как и во втором случае, но не оцифровывается, а передвигается в исходное положение назад, и процесс выполняется  $n$  раз, после чего кадр оцифровывается. В этом случае интенсивность спектра в  $n$  раз больше, а оцифровок в  $n$  раз меньше, чем в случаях 1 и 2.

В первом случае затрачивается время

$$T_1 = (t_{\text{exp}} + t_{\text{dig}}) mn. \quad (1)$$

Во втором случае время  $T_2$  почти такое же, как и в первом случае, в предположении, что время, затрачиваемое на сдвиги, пренебрежимо мало.

$$T_2 \approx T_1. \quad (2)$$

В третьем случае

$$T_3 = (t_{\text{exp}} n + t_{\text{dig}}) m, \quad (3)$$

где  $t_{\text{exp}}$  — время экспозиции  $m$ -й части периода,  $t_{\text{dig}}$  — время оцифровки кадра с одиночным зеemanовским спектром. Предполагается, что на оцифровку одного кадра во втором случае затрачивается время приблизительно в  $m$  раз большее, чем в первом случае, т.к. он в  $m$  раз больше по размеру. Сравнивая выражения (1) и (3), видим, что время на оцифровку  $T_3$  меньше, чем  $T_1$ , в  $n$  раз. Выигрыш во времени будет проявляться тем сильнее, чем слабее звезда: надо будет делать больше циклов  $n$ . Приблизительное отношение сигнал/шум для случаев 1 и 2:

$$(S/N)_1 \approx I_{\text{cont}} / \sqrt{I_{\text{cont}} + \sigma_{\text{CCD}}^2 m^2 n^2 k^2}; \quad (4)$$

для случая 3:

$$(S/N)_3 \approx I_{\text{cont}} / \sqrt{I_{\text{cont}} + \sigma_{\text{CCD}}^2 m^2 k^2}; \quad (5)$$

где  $I_{\text{cont}}$  — интенсивность континуума спектра,  $\sigma_{\text{CCD}}$  — шум считывания одного пиксела,  $k$  — число строк, занимаемое одиночным зеemanовским спектром. Сравнивая (4) и (5), видим, что в режиме циклирования отношение сигнал/шум выше при одинаковой интенсивности континуума  $I_{\text{cont}}$ .

На Рис. 1 представлен фрагмент кадра, содержащего восемь зеemanовских спектров звезды  $\gamma$  Eri, полученных в режиме накопления, сдвига и циклического переноса электронного изображения 05/06 ноября 2003 г. К сожалению, из-за облачности интенсивность спектров была ослаблена и заметно изменялась, что видно на поперечном разрезе, который изображен на Рис. 2. Интенсивности отложены в единицах количества носителей заряда.

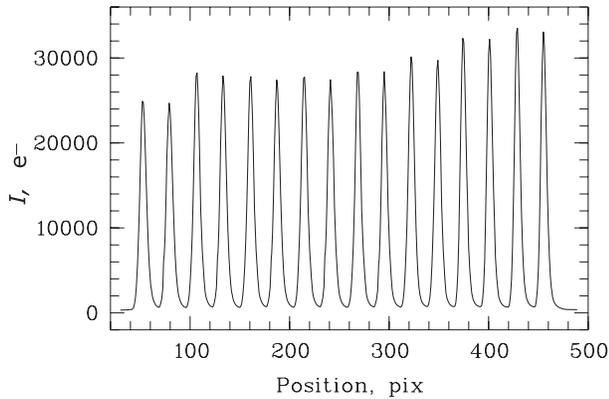


Рис. 2. Поперечный разрез спектра, изображенного на Рис. 1.

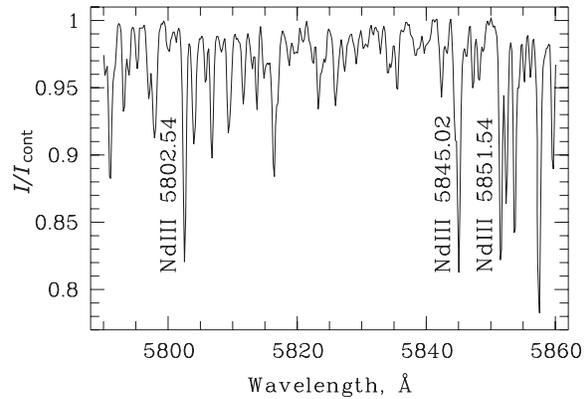


Рис. 3. Фрагмент спектра звезды  $\gamma$  Eqr в области линий Nd III.

На Рис. 3 показан фрагмент спектра звезды  $\gamma$  Eqr, содержащий три линии Nd III 5802.54, 5845.02, 5851.54 Å. Четвертая линия, Nd III 5987.68 Å, также использованная при измерениях магнитного поля, не показана. Факторы Ланде линий составляют соответственно 1.531, 1.101, 1.617 и 1.163. Обратная дисперсия около 0.183 Å/pix. Глубина линий Nd III в спектрах ОЗСП (0.17) несколько меньше, чем у НЭС (0.22) [10].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ ПО ЛИНИЯМ Nd III

На Рис. 4 показано изменение отклонений лучевой скорости звезды  $\gamma$  Eqr от среднего значения с фазой периода быстрой переменности. Лучевая скорость определялась по четырем линиям Nd III по двум кадрам (в каждом кадре — по два цикла). Из этих значений вычитались скорости, определенные по линиям других элементов, чтобы устранить дрейф спектрографа, и среднее значение этой разности по периоду. Проведение кривой производилось методом наименьших квадратов на отрезке [0, 1]. Выражение для нее имеет вид:

$$\text{Shift} = 535 \cos(2\pi t/P + 2\pi 0.54) \text{ км/с},$$

где  $t$  — момент наблюдений,  $P = 12.1$  мин — период переменности. Амплитуда близка к значениям из работ [4–7].

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Зеемановские сдвиги определялись путем измерения разности положений гауссиан, вписанных в спектральные линии в разных круговых поляризациях по стандартной процедуре в среде MIDAS. Соотношения между величиной зеемановского сдвига и магнитного поля взяты из работы

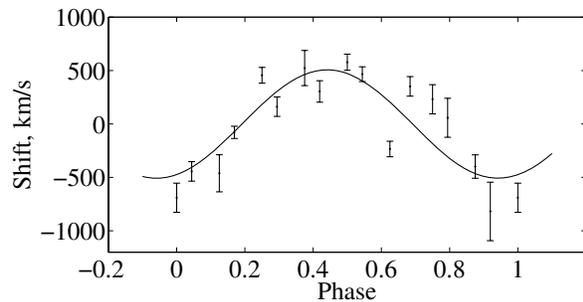
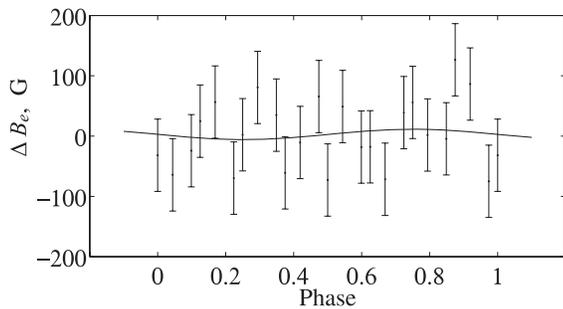


Рис. 4. Кривая изменений разности значений лучевой скорости, измеренной по линиям Nd III и по линиям других элементов, с фазой периода быстрой переменности.

Бэбкока [14]. В таблице приведены результаты измерений переменной составляющей магнитного поля у звезды  $\gamma$  Eqr в зависимости от фазы периода спектральной переменности по трем кадрам (в

Результаты измерений переменной составляющей магнитного поля  $\Delta B_e$   $\gamma$  Eqr с фазой периода спектральной переменности

Phase	$\Delta B_e$ , G	Phase	$\Delta B_e$ , G	Phase	$\Delta B_e$ , G
0	-31.74	0.349	34.79	0.669	-71.77
0.044	-64.24	0.375	-60.94	0.724	38.93
0.099	-24.29	0.419	-10.58	0.75	55.86
0.125	24.76	0.474	65.59	0.794	1.82
0.169	56.41	0.5	-72.79	0.849	-4.44
0.224	-69.66	0.544	49.01	0.875	126.53
0.25	2.24	0.599	-18.20	0.919	86.33
0.294	80.70	0.625	-17.77	0.974	-74.90



**Рис. 5.** Зависимость отклонений магнитного поля звезды  $\gamma$  Eri от среднего значения с фазой периода быстрой переменности.

каждом — по два цикла). Они представляют собой разности значений магнитного поля, определенных по линиям Nd III и по линиям других элементов. Ошибка одного измерения составляет около 60 Гс.

На Рис. 5 показана зависимость отклонений магнитного поля  $\Delta B_e$  звезды  $\gamma$  Eri от среднего значения поля с фазой, построенная по данным таблицы. Подгонка кривой (амплитуды и фазы косинусоиды) производилась методом наименьших квадратов на отрезке  $[0, 1]$ . Выражение для нее имеет вид:

$$\Delta B_e = 8.5 \cos(2\pi t/P + 2\pi 0.25) \text{ Гс},$$

где  $t$  — момент наблюдений,  $P = 12.1$  мин — период переменности. Из этого выражения и Рис. 5 видно, что амплитуда сигнала значительно меньше ошибки отдельного измерения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена новая методика измерений переменной составляющей периодического сигнала (лучевой скорости и магнитного поля) при известном его периоде. Методика продемонстрирована на примере измерений амплитуды и фазы лучевой скорости и магнитного поля у звезды  $\gamma$  Eri. Значение амплитуды 535 км/с переменной составляющей лучевой скорости по 4-м линиям Nd III согласуется с результатами других авторов, а переменная составляющая магнитного поля 8.5 Гс значительно меньше ошибки отдельного измерения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В. А. Мурзина за настройку программы накопления и циклического переноса на ПЗС и А. В. Додина за помощь при обработке данных. Используемая система ПЗС  $2K \times 2K$  была создана в Лаборатории перспективных разработок САО. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Kurtz, Inform. Bull. Var. Stars, No. 1436 (1978).
2. D. Kurtz, Annu. Rev. Astronom. Astrophys. **28**, 607 (1990).
3. J. M. Matthews, Publ. Astronom. Soc. Pacific **103**, 5 (1991).
4. A. Kanaan and A. P. Hatzes, Astrophys. J. **503**, 848 (1998).
5. I. S. Savanov, V. P. Malanushenko, and T. A. Ryabchikova, Astronomy Letters **25**, 802 (1999).
6. O. Kochukhov and T. Ryabchikova, Astronom. and Astrophys. **374**, 615 (2001).
7. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, and N. Piskunov, ASP Conf. Ser. **248**, L341 (2001).
8. F. Leone and D. W. Kurtz, Astronom. and Astrophys. **407**, L67 (2003).
9. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, J. D. Landstreet, and W. W. Weiss, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **351**, L34 (2004).
10. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, and N. Piskunov, Astronom. and Astrophys. **415**, L13 (2004).
11. Г. А. Чунтонов, в *Методы спектроскопии в современной астрофизике*, Ред. Л. И. Машонкина и М. Е. Сачков (Янус-К, Москва, 2007), стр. 336.
12. G. A. Chountonov, V. A. Murzin, N. G. Ivashchenko, and I. V. Afanasieva, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Moscow, 2000), p. 249.
13. A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, and A. V. Perekhod, J. Quantum Spectrosc. Radiation Transf. **88**, 319 (2004).
14. H. W. Babcock, Astrophys. J. **105**, 105 (1947).

**Charge Accumulation and Cyclic Image Transfer on CCD:  
Search for Rapid Variations of Magnetic Field in  $\gamma$  Equ****G. A. Chuntonov**

We search for the variable component of the magnetic field in  $\gamma$  Equ by studying four Nd III lines with the Main Stellar Spectrograph of the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory via accumulation and cyclic transfer of the electronic image of the Zeeman spectrum on the CCD. The single exposure time was set equal to 1/8 of the spectral variability period. We detected no variable component in the magnetic field of  $\gamma$  Equ with a period of 12.1 min in the November 5/6, 2003 observations.

Keywords: *techniques: polarimetric—techniques: spectroscopic—stars: magnetic field—stars: individual:  $\gamma$  Equ*