

УДК 520.353:520.648

## ОПТОВОЛОКОННЫЙ МАГНИТОМЕТР ПЕРВИЧНОГО ФОКУСА БТА НА ОСНОВЕ ПОДВЕСНОГО ЭШЕЛЬНОГО СПЕКТРОГРАФА

© 2010 Г. А. Чунтонов

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 10 августа 2009 г.; принята в печать 12 сентября 2009 г.

С целью повышения стабильности спектра и устранения влияния инструментальной поляризации диагонального зеркала на результаты измерений магнитного поля разработан и изготовлен оптоволоконный магнитометр первичного фокуса БТА на основе подвешенного эшелюного спектрографа. Магнитометр предназначен для измерений магнитных полей звезд и изучения их химического состава. Регистрируемый спектральный диапазон — 5000–6800 Å при средней обратной дисперсии 0.15 Å/пиксел. По оценкам для звезд 9<sup>m</sup>.5 ошибка измерений магнитного поля по 400 спектральным линиям составит 100 Гс за 0.5 часа экспозиции.

Ключевые слова: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

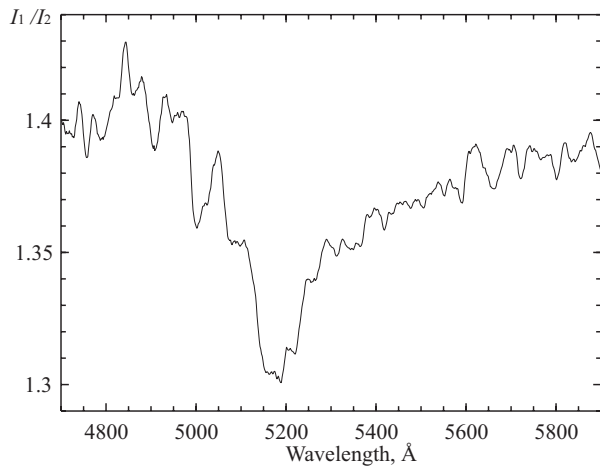
### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время на многих крупных телескопах, таких как GTC, VLT, SUBARU, HET и SALT переброс света из первичного фокуса на вход спектрографа высокого разрешения осуществляется с помощью оптического волокна. В работе [1] проведено сравнение их параметров. К сожалению, пока спектрополяриметрическая мода в них не реализована. На протяжении десятков лет в САО ведутся измерения магнитных полей звезд на Основном Звездном Спектрографе (ОЗСП) БТА. Спектрограф оптимален по некоторым параметрам для выполнения магнитных измерений: формирует высокий (около 400 пикселей) и почти плоский вдоль дисперсии спектр (во 2-м и 3-м порядках) и разрешение, соответствующее  $v \sin i = 20$  км/с. Так как средняя величина  $v \sin i$  для химически пекулярных звезд составляет около 50 км/с, то это позволяет проводить измерения у большей части магнитных звезд. После оснащения спектрографа анализатором круговой поляризации с двойным резателем изображений и ПЗС-системой 2К×2К [2] эффективность измерений повысилась на полторы звездные величины, что позволило перейти к изучению звезд 10–11<sup>m</sup>. Однако такие недостатки, как позиционная нестабильность, составляющая около 1 пиксела за ночь, ограниченный спектральный диапазон (360 Å во 2-м и 240 Å в 3-м порядках), инструментальная поляризация, вносимая диагональным зеркалом БТА и потери света на зеркалах телескопа ограничивают эффективность измерений. С целью устранения перечисленных недостат-

ков нами разработан магнитометр первичного фокуса, спектрограф которого подвешен на шаровом шарнире. Изменение наклона трубы телескопа не приводит к изменению механических напряжений в спектрографе, а вместе с ним и в криостате с ПЗС. При этом обеспечивается высокая позиционная стабильность. Создание магнитометра проходило в три этапа: создание подвешенного спектрографа для телескопа Цейсс-1000, создание магнитометра с перебросом света жгутом оптического волокна из первичного фокуса БТА на щель ОЗСП и создание магнитометра на основе подвешенного эшелюного спектрографа первичного фокуса БТА.

### 2. ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА ЦЕЙСС-1000

Схема подвески спектрографа на трубе телескопа была опробована на телескопе Цейсс-1000. Были изготовлены призмный спектрограф низкого разрешения и волокна диаметром 50 мкм и 100 мкм в оплетках и оправках [3]. Головная часть, содержащая согласующую оптику и телевизионный подсмотр диафрагмы, размещалась на фланце телескопа. Собственно спектрограф с фотоприемником ПЗС 1040×1160 был подвешен на шарнире в нижней части трубы телескопа. В процессе наблюдений спектрограф и криостат не изменяли угла наклона, и это способствовало достижению высокой позиционной стабильности спектра. Волокно диаметром 50 мкм соответствовало размеру изображения около 3.5 угловых секунд



**Рис. 1.** Результат деления спектра химически пекулярной звезды  $\alpha^2$  CVn ( $I_1$ ) на спектр нормальной звезды PG 4702 ( $I_2$ ).

и разрешению около  $10 \text{ \AA}$ . Поперек дисперсии спектр занимал 5 пикселей. С волокном диаметром  $100 \text{ мкм}$  ширина спектра получалась в два раза больше, и это обеспечивало более высокую фотометрическую точность, так как неоднородности чувствительности ПЗС-приемника лучше сглаживаются. Спектрограф использовался для изучения депрессии в спектрах звезд на длине волны  $5200 \text{ \AA}$ , когда требуется отношение сигнал/шум (С/Ш) в спектре на уровне тысячи. На Рис. 1 приведен результат деления спектра химически пекулярной звезды  $\alpha^2$  CVn ( $I_1$ ) на спектр нормальной звезды PG 4702 ( $I_2$ ). Депрессия на  $5200 \text{ \AA}$  ярко выражена. Спектр звезды  $13^m$  с отношением С/Ш = 100 в среднем получался за 10 минут экспозиции.

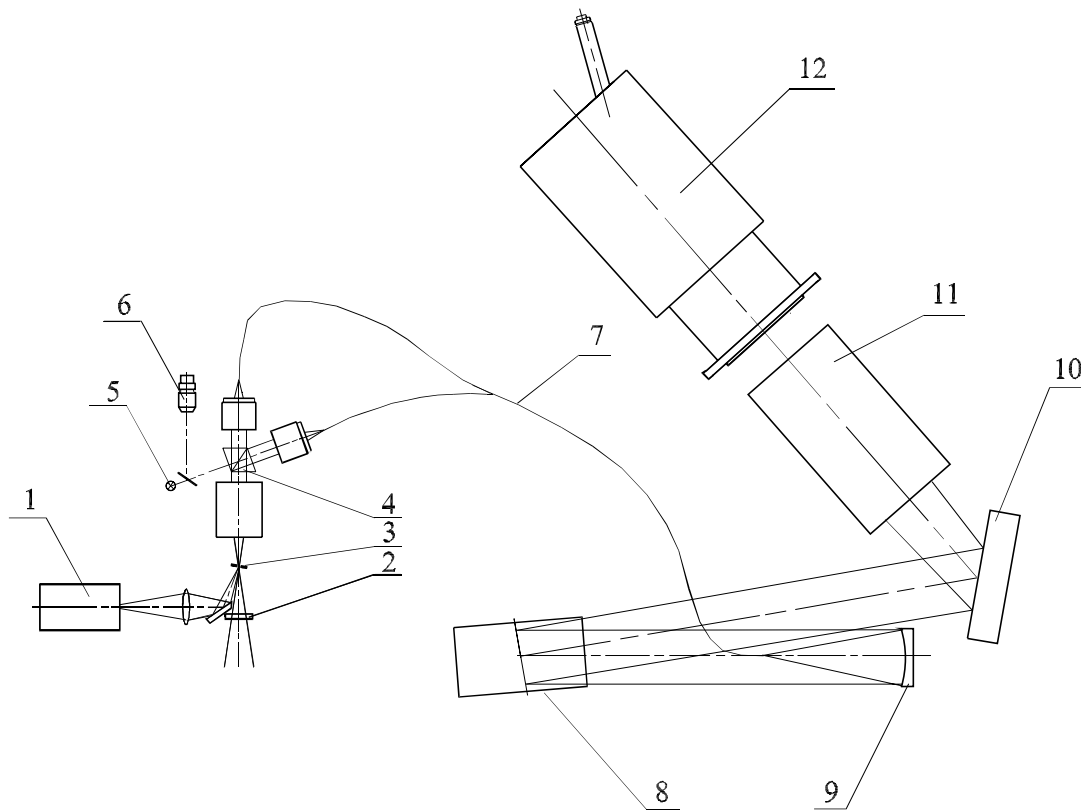
### 3. МАГНИТОМЕТР С ПЕРЕБРОСОМ СВЕТА ЖГУТОМ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ИЗ ПЕРВИЧНОГО ФОКУСА БТА НА ЩЕЛЬ ОЗСП

Головная часть магнитометра размещается на поворотном столе первичного фокуса БТА. Сходящийся пучок света от главного зеркала телескопа проходит суперхроматическую фазовую пластинку, которая может дистанционно устанавливаться под углом  $0^\circ$  или  $90^\circ$ , и круглую наклоненную диафрагму, отражающую часть света в телевизионный подсмотр. Прошедший свет превращается линзовой системой в плоскопараллельный пучок, делится дихроичной поляризующей светоделительной призмой на два пучка, соответствующие разным поляризациям. Положительное свойство призмы состоит в том, что через вторую грань можно заводить свет от источника спектра сравнения и плоского поля. Изображения диафрагмы строятся

двумя линзовыми системами на торцах двух волокон жгута длиной  $30 \text{ м}$ . По волокнам свет от звезды из первичного фокуса поступает на балкон Несмит-2. С помощью согласующего объектива изображения выходных торцов световодов строятся на входе специально изготовленного двойного резателя изображений ОЗСП, создающего по 5 срезов на каждую поляризацию. Возможность получать пары спектров в положении фазовой пластинки  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , когда компоненты двойного зеемановского спектра меняются местами, позволяет уменьшить влияние неоднородности чувствительности ПЗС и позиционной нестабильности спектрографа на результаты измерений. Суперхроматическая фазовая пластинка была приобретена в Астроприборе [4]. В рабочем диапазоне отклонение фазового сдвига от  $90^\circ$  составляет не более  $1.5^\circ$ . Значительные потери света на согласующей оптике и длинном волокне, а также нестабильность спектрографа ОЗСП и его небольшой спектральный диапазон привели нас к решению изготовить эшелый спектрограф, который был бы подвешен на шаровом шарнире в непосредственной близости от фланца телескопа в кабине первичного фокуса БТА. Изменение угла наклона трубы телескопа при этом не приводит к изменению напряжений в спектрографе, а вместе с ним и в криостате, так что обеспечивается высокая позиционная стабильность спектра.

### 4. ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННЫЙ МАГНИТОМЕТР ПЕРВИЧНОГО ФОКУСА БТА

На Рис. 2. изображена принципиальная схема подвесного волоконного магнитометра первичного фокуса БТА. Магнитометр состоит из двух частей. Головная часть, описанная выше, изображена на Рис. 2 слева. Она является частью магнитометра с перебросом света жгутом оптического волокна из первичного фокуса БТА на вход ОЗСП, а другая представляет собой подвешенный на шаровом шарнире эшелый спектрограф. Вместо жгута длиной  $30 \text{ м}$  используется жгут длиной  $1.5 \text{ м}$ . Цифрами отмечены элементы магнитометра: 1 — ТВ камера подсмотра диафрагмы; 2 — фазовая пластинка; 3 — входная наклоненная диафрагма; 4 — светоделительная поляризующая призма; 5 — источник света плоского поля; 6 — источник света спектра сравнения; 7 — жгут из 2-х волокон; 8 — эшелая решетка; 9 — коллиматор; 10 — кроссдисперсор; 11 — камера; 12 — криостат с ПЗС  $1040 \times 1160$ . Первоначально светоделительный поляризующий слой был изготовлен из жидкого кристалла. В процессе наблюдений оказалось, что он недостаточно хорошо разделяет



**Рис. 2.** Принципиальная схема магнитометра первичного фокуса БТА: 1 — TV камера подсмотра диафрагмы; 2 — фазовая пластинка; 3 — входная наклонная диафрагма; 4 — светоделительная поляризующая призма; 5 — источник света плоского поля; 6 — источник света спектра сравнения; 7 — жгут из 2-х волокон; 8 — эшельная решетка; 9 — коллиматор; 10 — кроссдисперсор; 11 — камера; 12 — криостат с ПЗС 1040 × 1160.

поляризации на холоде. Пришлось его заменить многослойным диэлектрическим покрытием.

Перед тем как изготавливать коллиматорное зеркало была построена зависимость фокального отношения (отношение диаметра пучка света к расстоянию до торца волокна) на входе световода к фокальному отношению на выходе световода. Для этого изображение Солнца через нейтральный светофильтр с перезаполнением строилось на входном конце одного из волокон жгута световода с помощью фотографического объектива с изменяемой диафрагмой. При заданной величине диафрагмы определялось фокальное отношение на выходе световода. На Рис. 3 приведена зависимость фокального отношения на входе световода к фокальному отношению на выходе. С увеличением фокального отношения на входе фокальное отношение на выходе стремится к насыщению. Учитывая трудности изготовления асферического коллиматорного зеркала, было принято значение, соответствующее фокальному отношению на входе световода  $f/2.8$  и на выходе  $f/2.5$  (отмечено точкой). Налицо небольшая деградация апертуры, но

отсутствуют потери света из-за его выхода через оболочку световода.

Для совмещения изображений входной диафрагмы с изображениями входных торцов волокон имеется устройство засветки волокон со стороны спектрографа и подмотра изображения диафрагмы и торцов волокон. Волокна сложены вместе на выходном конце жгута, на торцы наклеена щелевая диафрагма. Эта диафрагма шириной 60 мкм находится в фокусе коллиматорного зеркала эшельного спектрографа и обеспечивает необходимое спектральное разрешение. Все элементы магнитометра, кроме фазовой пластинки, просветлены. В процессе наблюдений на БТА был получен эшельный спектр звезды  $\gamma$  Eri ( $m_v = 4^m.7$ ) в двух круговых поляризациях за 5 мин экспозиции, произведена экстракция пятого порядка спектра этой звезды и его нормировка (Рис. 4). Сдвиг между линиями в разных поляризациях определялся с помощью набора программ пакета MIDAS путем вписывания гауссиан в контуры спектральных линий в предположении их симметричности. Измеренный сдвиг между линиями в этих двух поляризациях соот-

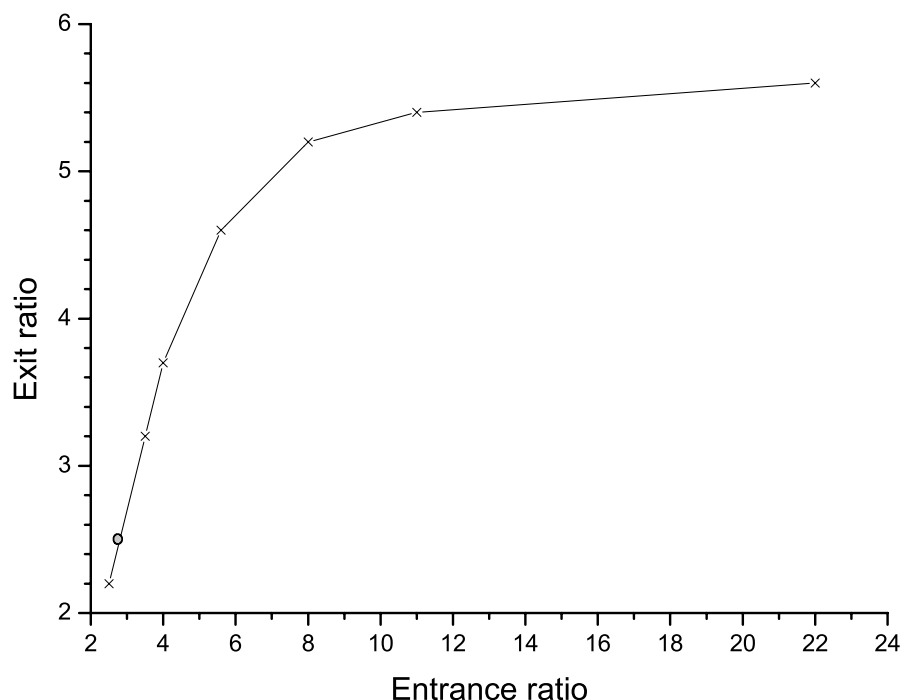


Рис. 3. Зависимость фокального отношения на выходе световода от фокального отношения на входе световода.

ветствует величине продольного магнитного поля  $B_e = -920 \pm 70$  Гс, что находится в согласии с измерениями других авторов [5].

На Рис. 5 приведены несколько наложенных друг на друга спектров неона, полученных в течение ночи при разных положениях трубы телескопа, который находился в режиме наблюдений на ОЗСП. Положение линии неона сохранялось в пределах не хуже  $\pm 0.02 \text{ \AA}$ .

Основные параметры магнитометра:

- спектральный диапазон  $5000\text{--}6800 \text{ \AA}$  без пропусков;
- обратная дисперсия в области D-линий натрия —  $0.15 \text{ \AA/пиксель}$ ;
- высота двойного спектра — 46 пикселей (диаметр коллимированного пучка — 70 мм, угол блеска эшельной решетки —  $64^\circ$ , кроссдисперсор — решетка 600 штр/мм, камера F:1.6; приемник — ПЗС  $1040 \times 1160$  и  $16 \times 16 \text{ мкм}^2$ );
- эффективность регистрации спектра —  $5^m$  за 300 сек при  $C/\text{Ш} = 300$ ;
- диаметр волокон — 300 мкм, что соответствует  $3.5''$ ;

- ожидаемая средняя ошибка измерений магнитного поля — 100 Гс у звезды  $9^m.5$  за 0.5 часа экспозиции по 400 линиям;
- стабильность положения спектра не хуже  $\pm 0.02 \text{ \AA}$  за ночь.

Опробован вариант жгута из 15-ти волокон ( $2 \times 7 + 1$ ) диаметром по 100 мкм. Хотя пропускание света увеличилось в 2 раза, длина спектра сократилась в 1.5 раза, и пришлось передвинуть спектр в красную область (спектр начинается с  $6300 \text{ \AA}$ ), чтобы порядки не перекрывались. Для компенсации потерь необходимо использовать более эффективный кроссдисперсор (например, решетку с 1200 штр/мм) и большего размера матрицу ПЗС. Потребуется также замена камерного объектива. С помощью магнитометра можно проводить измерения линейной поляризации в спектральных линиях. Для этого надо заменить четвертьволновую фазовую пластинку на полуволновую. В ближайшей перспективе планируется повысить спектральное разрешение, сменив решетку R2 на R4, заменить камеру спектрографа на камеру с большей апертурой и ПЗС  $1040 \times 1160$  на ПЗС  $2K \times 2K$ .

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Элементы конструкции и оптические элементы были изготовлены в макетных мастерских САО.

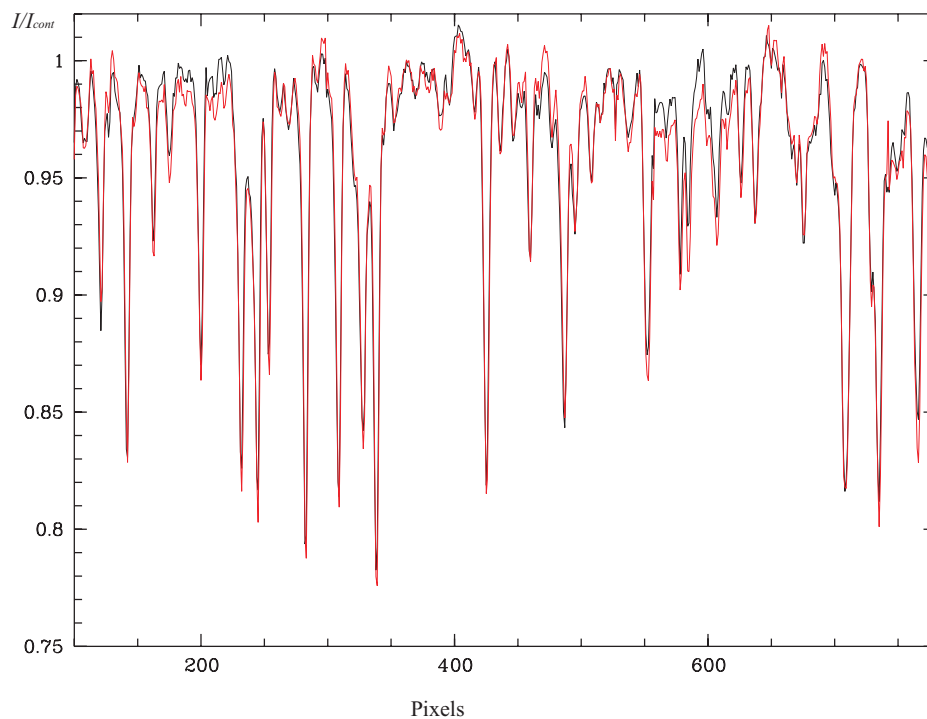


Рис. 4. Фрагмент экстрагированного 5-го порядка спектра  $\gamma$  Eri в двух поляризациях.

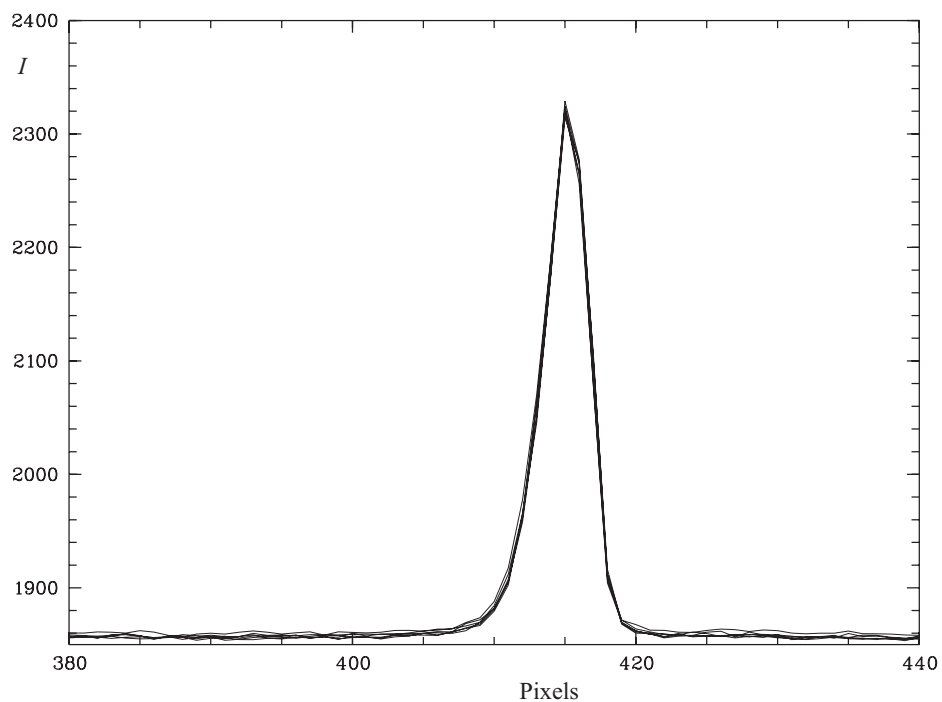


Рис. 5. Наложенные друг на друга спектры неона, полученные в течение ночи во время параллельных наблюдений на ОЗСП.

Система ПЗС  $1040 \times 1160$  была приобретена в Лаборатории перспективных разработок на средства гранта РФФИ № 94-02-06584. Многослойное поляризующее покрытие на светодетель-

ную призму было нанесено в Институте прикладной физики РАН. Частично работа финансировалась из средств грантов РФФИ № 06-02-16110а, № 09-02-00002а и Программы президиума РАН

“Эволюция звезд и галактик”. Автор благодарит В. В. Власюка и Ю. В. Глаголевского за поддержку работы, а Э. Б. Гажура за помощь при конструировании магнитометра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Prada, M. Azzaro, O. Rabaza, et al., Proceedings of the SPIE, **7014**, 4F (2008).
2. G.A.Chountonov, in *Magnetic stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtcev, I. I. Romanyuk (Москва, “Шанс”, 2004), p.286.
3. Г. А. Чунтонов. Отчет САО № 275, (2000).
4. A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, and A. V. Perekhod, J.Quantum Spectrosc. Radiation Tranf. **88**, 319 (2004).
5. Ю. В. Глаголевский и Е. Герт, *Астрофизика* **49**, 251 (2006).

**FIBER-OPTIC MAGNETOMETER FOR PRIME FOCUS OF 6-M BTA TELESCOPE BASED ON SUSPENDED ECHELLE SPECTROGRAPH**

**G. A. Chountonov**

We have developed and manufactured a fiber-optic magnetometer for the prime focus of the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences based on a suspended echelle spectrograph. The magnetometer is designed to improve the spectrum stability and eliminate the effect of instrumental polarization of the diagonal mirror on the results of magnetic field measurements. The magnetometer is to be used for measurements of stellar magnetic fields in stars and to study their chemical composition. The instrument operates in the 5000–6800 Å wavelength interval with mean reciprocal dispersion of 0.15 Å/pixel. According to the estimates for  $9^m.5$  stars, the standard error of magnetic field measurements based on 400 spectral lines would be 100 G for a half-hour exposure.

Key words: *methods of astronomical observations, equipments and instruments*