

## ВОДОРОДНЫЙ МАГНИТОМЕТР БТА. 1. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

В. Г. Штоль

В работе приведена оценка эффективности водородного магнитометра, работающего на основе эффекта Зеемана. Эффективность магнитометра определяется среднеквадратической ошибкой измерения, которая позволяет оценить возможность применения магнитометра для изучения магнитных полей различных астрофизических объектов. Приведены некоторые результаты измерений и оценивается перспектива развития магнитометра.

*An efficiency of the hydrogen magnetometer based on Zeeman effect is evaluated in this paper. The efficiency is determined by the mean-root-square error of magnetic field measurements which allows to evaluate the possibilities of using the magnetometer for studying magnetic fields of different astrophysical objects. Some measurement results and perspectives of development are presented.*

## ВВЕДЕНИЕ

Водородный магнитометр (Штоль и др., 1985) предназначен для измерения магнитных полей звезд и других астрофизических объектов. Измерения проводятся в основном по водородным линиям, но могут быть использованы и другие спектральные линии, например, He I или He II.

## 1. СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

На рис. 1 приведена структурная схема магнитометра, на рис. 2 - схема части оборудования магнитометра, размещенной в стакане первичного фокуса (СПФ) БТА, а на рис. 3 - оптическая схема.

Согласно приведенным схемам, свет попадает на поляриметрический анализатор, затем в спектрограф и на выходные щели, которыми выделяется необходимый для измерений участок спектра. ФЭУ, регистрирующий световой поток от этого участка, работает в режиме счета фотонов. Импульсы с ФЭУ усиливаются, затем дискриминируются и формируются по амплитуде и длительности (рис. 2). Затем в виде сигнала  $U_1$  (рис. 1) подаются на распределитель и разделяются по измерительным каналам. Распределитель управляется блоком цифрового синхронного детектирования (сигналы  $U_3$  и  $U_4$ ). Синхронно с распределителем импульсов

(сигналом  $U_2$ ) ведется управление электрооптическим фазовым элементом (см. рис. 2 и 3), входящим в состав поляризметрического анализатора. Схематически процесс синхронного детектирования показан на рис. 1 в виде четных и нечетных фаз управления.

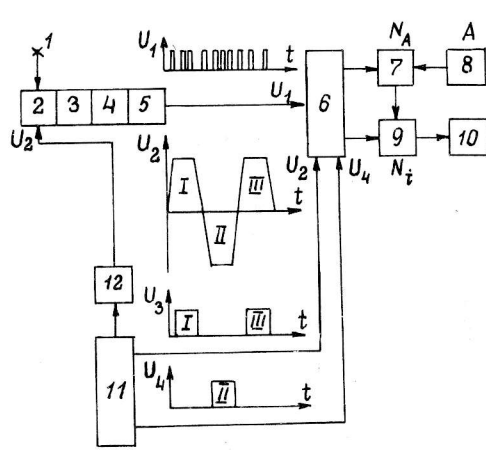


Рис. 1. Структурная схема магнитометра. 1 - свет от звезды, 2 - поляризметрический анализатор, 3 - спектрограф или монохроматор, 4 - узел выходных щелей, 5 - светоприемник, 6 - распределитель импульсов по измерительным каналам, 7 - опорный канал, 8 - задатчик количества импульсов в опорном канале, 9 - информационный измерительный канал, 10 - ЭВМ, 11 - блок цифрового синхронного детектирования, 12 - формирователь высоковольтных импульсов, управляющих анализатором, I, II, III - фазы управления анализатором и детектирования сигнала,  $U_1$  - выходной сигнал светоприемника,  $U_2$  - импульсы, управляющие анализатором,  $U_3$  - интервалы нечетных фаз детектирования,  $N_A$  - количество импульсов в опорном канале,  $N_i$  - количество импульсов в измерительном канале.

Рис. 2. Схема части оборудования магнитометра, размещенной в СПФ БТА. 1 - СПФ, 2 - поляризметрический анализатор, 3 - спектрограф UAGS, 4 - линзовая камера И-52, 5 - устройство точного наведения на спектральную линию и механический переключатель щелей, 6 - линзовый конденсор, 7 - ФЭУ, 8 - делитель напряжения питания ФЭУ, 9 - предварительный усилитель импульсов, 10 - амплитудный дискриминатор и формирователь импульсов, 11 - формирователь длительности импульсов, 12 - выходной усилитель импульсов, 13 - блок питания, 14 - формирователь высоковольтных импульсов, 15 - осциллокопический индикатор, 16 - делитель напряжения, 17 - отрицательная линза, 18 - электрооптический фазовый элемент, 19 - положительная линза, 20 - поляризационный расщепитель, 21 - входная щель, 22, 23, 24 - линзы коллиматора, 25 - зеркало коллиматора, 26 - диагональное зеркало, 27 - дифракционная решетка, 28 - маска с выходными щелями, 29 - линии связи с аппаратной БТА.

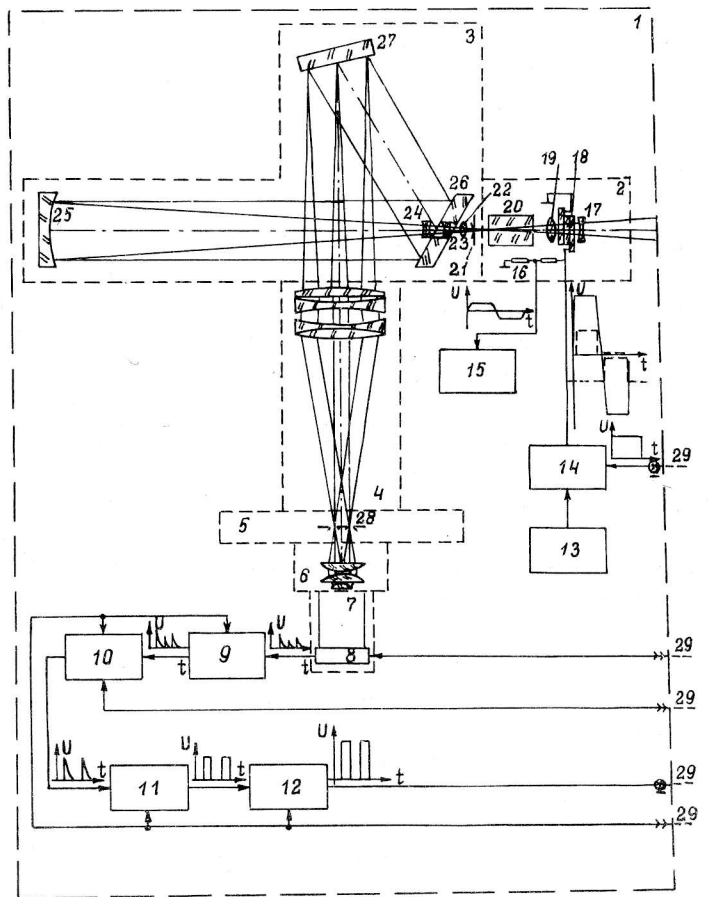
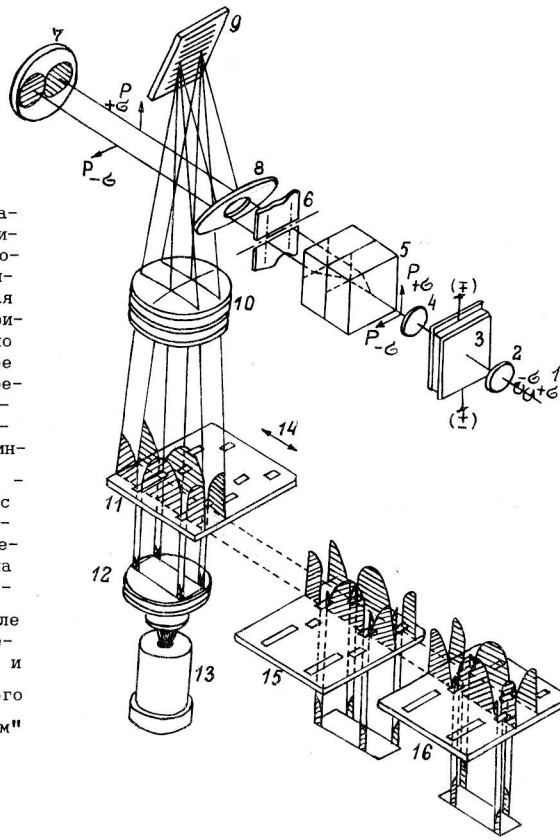


Рис. 3. Оптическая схема.

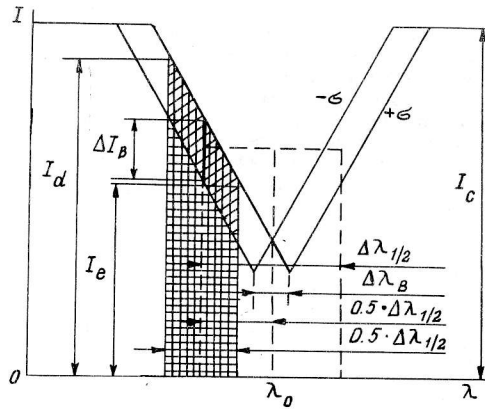
1 - свет от звезды, 2 - отрицательная линза, 3 - электрооптический фазовый элемент, 4 - положительная линза, 5 - поляризационный расщепитель, 6 - входная щель (линзы коллиматора на рисунке не показаны), 7 - зеркало коллиматора, 8 - диагональное зеркало, 9 - дифракционная решетка, 10 - линзовая камера, 11 - маска с набором щелей на спектральные линии  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , 12 - линзовый конденсор, 13 - ФДУ, 14 - направление движения маски (с переключателем щелей, закрепленным на устройстве точного наведения) при наведении щелей на центры линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , 14, 15, 16 - положения маски в переключателе щелей, соответственно, при наведении щелей на центры линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  и при измерении магнитного поля по "левым" и "правым" крыльям этих линий.



При нечетных фазах управления поляризметрическим анализатором, спектрографом и системой выходных щелей пропускается поляризованный по кругу световой поток одной из  $\sigma$ -компонент, например, левополяризованной  $+\sigma$ -компоненты ( $\lambda_0 + \Delta\lambda_B/2$ ) (см. рис. 3, 4 и 5). При этом на время действия сигнала  $U_3$  распределитель подключает опорный измерительный канал к сигналу  $U_1$ .

При четных фазах управления пропускается  $-\sigma$ -компонента, а сигнал  $U_1$  на время действия сигнала  $U_4$  подключается к информационному измерительному каналу.

Чередование фаз управления происходит автоматически до набора заданного количества импульсов в счетчике опорного канала, после чего измерение заканчивается и информация из счетчика информационного канала передается в ЭВМ.



$$\Delta F \equiv \Delta N \quad F_{+\sigma} \equiv N_{+\sigma} \quad F_{-\sigma} \equiv N_{-\sigma}$$

$$\Delta\lambda_B = \frac{\Delta I_B \cdot \Delta\lambda_{1/2}}{2(I_d - I_e)} \quad \Delta I_B = 2 \cdot \Delta F / \Delta\lambda_{1/2}$$

Рис. 4.

При измерении магнитных полей в основном применяется магнитометр с двухлучевой схемой (см. рис. 3), для реализации которой используется поляризационный расщепитель и специальная конфигурация выходных щелей. Помимо двухлучевой схемы для измерения круговой поляризации ( $v$ -параметр Стокса) применяется однолучевая схема, фрагмент которой показан на рис. 6. Однолучевой вариант отличается от двухлучевого малой высотой входной щели спектрографа, отсекающей один луч. Однолучевая схема, начиная с 1988 г., используется также для измерения

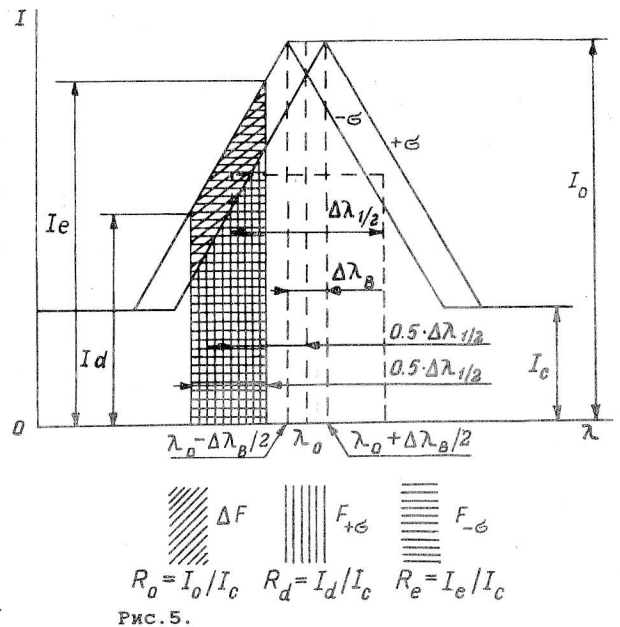
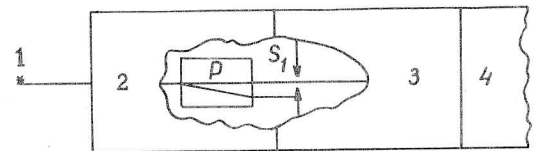


Рис. 5.

линейной поляризации ( $u$ - и  $q$ -параметры Стокса). Анализатор  $u$ - и  $q$ -параметров по принципу действия аналогичен анализатору, используемому в спектрополяриметре Эдинбургской обсерватории (Вальстенкрофт и др., 1983). В анализаторе магнитометра также используются две пассивные четвертьволновые фазовые пластины, которые поочередно вводятся перед электрооптическим фазовым элементом (на рис. 3 не показаны). Оси пластин повернуты относительно друг друга под углом  $45^\circ$  и под таким же углом - к оси электрооптического фазового элемента.

Рис. 6. Фрагмент однолучевой схемы магнитометра (режим поляриметра). 1 - свет от звезды, 2 - поляриметрический анализатор, 3 - спектрограф, 4 - узел выходных щелей, P - поляризационный расщепитель анализатора,  $S_1$  - входная щель спектрографа (показана высота).



В настоящее время на магнитометре измерения проводятся как по одной линии, так и по набору линий (например,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ ), расположенных в спектральном интервале длиной 300-600 Å в области 4000-5000 Å. Для работы в указанных интервалах используется существующий набор дифракционных решеток и камер к спектрографу UAGS, а также устройство точного наведения щелей на спектральные линии (Шголь, 1984). Длина интервала (для линий и полос) ограничена полем линзового конденсора (см. оптическую схему рис. 2 и 3), собирающего свет с выходных щелей магнитометра (с площадки, занимаемой корпусом маски с набором щелей) на фотокатод ФЭУ. Размер площадки 40 x 40 мм<sup>2</sup>. Корпус маски расположен в фокальной плоскости камеры спектрографа в механическом переключателе щелей, конструкцией которого предусмотрена возможность легкой и быстрой смены масок. Переключатель щелей, несущий корпус линзового конденсора и стакан ФЭУ, устанавливается на подвижной плате устройства точного наведения на линию, которое крепится на корпусе камеры спектрографа.

На рис. 3 показаны три положения маски. В положении для сканирования линии свет от обоих лучей проходит через центральные щели и конденсором собирается на фотокатоде ФЭУ. При сканировании линии для регистрации светового потока используется отдельный счетчик, управляемый ЭВМ и работающий в режиме измерителя скорости счета. Скорость счета (количество импульсов за секунду) выводится на терминал ЭВМ. Для наведения на линию используется водородная лампа. Центр эмиссионной линии определяется по максимальной скорости счета. Наведение на центр выполняется устройством точного наведения на линию - перемещением его подвижной платы, а следовательно, и щелей в фокальной плоскости камеры. Для измерения магнитного поля маска переключателем щелей устанавливается в положение измерений по "левым" крыльям - на ФЭУ попадает свет от "левых" крыльев линий  $H_{\beta}$  и  $H_{\gamma}$  первого луча и "правых" крыльев этих линий второго луча. В режиме измерения магнитного поля после запуска автоматически выполняется 10 измерений и проводится обработка первого цикла измерений. Процесс измерения отображается только на терминале ЭВМ. Результат обработки, кроме терминала, выводится на цифropечать. Первичная информация (число импульсов в информационном канале и время измерения) записывается на магнитный диск, а затем сбрасывается на ленту. По завершении первого цикла измерений маска переключателем щелей устанавливается в положение измерений по "правым" крыльям линий  $H_{\beta}$  и  $H_{\gamma}$  (рис. 3) и после повторного запуска выполняется 10 измерений второго цикла. При обработке измерений второго цикла полученным значениям поля присваивается обратный знак. По завершении каждого последующего цикла измерений проводится полная совместная обработка всех предыдущих циклов, включая последний. При обработке учитывается знак поля, искусственно измененный на обратный для всех четных циклов. Использование метода измерений по "левым" и "правым" крыльям позволяет исключить возможную систематическую ошибку измерений, связанную с инструментальной и атмосферной поляризацией или собственной поляризацией объекта.

Следует отметить, что в двухлучевом варианте оптической схемы магнитометра (при точном наведении на центр линии, симметрии ее крыльев и одинаковых световых потоках в первом и втором лучах) происходит компенсация вышеуказанной систематической ошибки и без переключения с "левого" крыла на "правое", так как свет на ФЭУ собирается одновременно от левого крыла линии первого луча и правого крыла линии второго луча. Отсюда видна необходимость применения однолучевого варианта схемы (см. рис. 6) для измерения линейной поляризации и круговой поляризации, не связанной с магнитным полем наблюдаемых объектов. Обработка результатов этих измерений проводится без искусственного изменения знака при четных циклах. Результат обработки с изменением знака должен стремиться к нулю в пределах доверительного интервала.

## 2. КОЭФФИЦИЕНТ МАГНИТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Известно, что расщепление спектральной линии зависит от величины индукции магнитного поля (Бэбкок, 1967):

$$B = 1.07 \cdot 10^{12} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0^2 \cdot z} \quad [\text{Гс}], \quad (1)$$

где  $\Delta\lambda_B$ ,  $\lambda_0$  - соответственно, расщепление спектральной линии и длина волны центра линии в ангстремах,  $z$  - фактор Ланде (для водородных линий равный 1).

Для точного определения магнитного поля необходима информация о профиле линии. Однако для оценки возможности применения магнитометра в наблюдениях различных объектов, возможности измерения величины их магнитного поля, достаточно двух параметров линии: ее полуширины и остаточной интенсивности. В этом случае, аппроксимируя в первом приближении профиль линии треугольником (рис. 4), можно выразить  $\Delta\lambda_B$  через полуширину  $\Delta\lambda_{1/2}$  линии и интенсивности  $I_d$  и  $I_e$  на внутренней и наружной кромках выходной щели магнитометра и разность интенсивностей  $\Delta I_B$  световых потоков  $F_{+\sigma}$  и  $F_{-\sigma}$  в крыльях  $\sigma$ -компонент спектральной линии.

Положение щели в крыле линии выделено на рис. 4 и 5 штриховыми линиями. Ширина щели  $\Delta\lambda_s$  и расстояние между центрами щели и линии принимаются равными  $0.5 \Delta\lambda_{1/2}$ . В этом случае уширение изображения спектральной линии в фокальной плоскости камеры спектрографа, применяемого в магнитометре в качестве монохроматора, не превышает 10% (Мальшев, 1979). Согласно рис. 4 разность  $\Delta\lambda_B$  пропорциональна разности  $\Delta F = F_{+\sigma} - F_{-\sigma}$  световых потоков, выделяемых щелью. Нормировка  $\Delta F$  на  $F_{+\sigma} + F_{-\sigma}$  позволяет исключить влияние изменений светового потока звезды во входной щели спектрографа (которые зависят от условий наблюдений), на измерение магнитного поля.

Нормированная разность  $\Delta I_n$  при  $F_{+\sigma} \approx F_{-\sigma} \approx F$  может быть представлена в виде

$$\Delta I_n = \Delta F / 2F, \quad (2)$$

а из (1), (2) при использовании интенсивностей  $I_d$  и  $I_e$  для выражения  $\Delta\lambda_B$  и равенства  $F = \Delta\lambda_{1/2} (I_d + I_e) / 4$  - (площадь трапеции) следует

$$B = 5.36 \cdot 10^{11} \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\lambda_0^2} \cdot \frac{\Delta I_n (I_d + I_e)}{(I_d - I_e)} \text{ [Гс]}. \quad (3)$$

При расчете магнитного поля по эмиссионным линиям (рис. 5) знак поля в формуле (3) не меняется, так как меняются знаки разностей  $\Delta I_n$  и  $I_d - I_e$ .

Исходные величины для нахождения магнитной индукции  $B$  определяются измеряемыми световыми потоками  $F_{+\sigma}$  и  $F_{-\sigma}$ , пропускаемыми щелью магнитометра (см. рис. 4), с последующим расчетом по формуле (2) нормированной разности  $\Delta I_n$ . В формуле (3) все величины, кроме разности  $\Delta I_n$ , обусловлены используемой спектральной линией и могут быть представлены в виде коэффициента магнитной чувствительности  $K_B = B$  при  $\Delta I_n = 1$ :

$$K_B = 5.36 \cdot 10^{11} \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\lambda_0^2} \cdot \frac{(I_d + I_e)}{(I_d - I_e)} \text{ [Гс]}. \quad (4)$$

После выражения  $I_d$  и  $I_e$  через остаточную интенсивность  $R_0$  центра линии (рис. 4, 5 для линий излучения и поглощения) формула (4) принимает вид:

$$K_B \approx 10^{12} \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\lambda_0^2} \cdot \frac{(R_0 + 1)}{(1 - R_0)} \text{ [Гс]}. \quad (5)$$

так как  $R_d = I_d / I_c$ ,  $R_e = I_e / I_c$ ,  $R_0 = I_0 / I_c$ ,  $R_e = (1+3R_0)/4$ ,  $R_d = (3+R_0)/4$ , где  $R_d$  и  $R_e$  - остаточные интенсивности на наружной и внутренней краях выходной щели магнитометра,  $I_0$  - интенсивность в центре линии,  $I_c$  - интенсивность континуума.

Аналогично (4) может быть получена формула для определения значения  $K_B$  с более высокой точностью относительно (4) и (5)

$$K_B = 5.36 \cdot 10^{11} \cdot \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\lambda_0^2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1+x_i}{1-x_i} \quad [\text{Гс}], \quad (6)$$

где  $n$  - количество спектральных интервалов  $\Delta\lambda_i$ , по которым проводится суммирование, при этом  $\Delta\lambda_i \cdot n = 0.5 \cdot \Delta\lambda_{1/2}$ ;  $x_i = I_{i+1}/I_i$ , где в свою очередь  $I_i$  принимает все значения от  $I_d$  до  $I_e$  при  $i=1, 2, 3, \dots, n+1$ .

В табл. 1 приведены оценки коэффициента магнитной чувствительности  $K_B$ , рассчитанные по (4), (5) и (6). Расхождение  $\Delta K_B$  оценок  $K_B$ , выраженное в процентах, определялось по формулам:

$$\Delta K_B = 100 \% \frac{K_B^{(4)} - K_B^{(5)}}{K_B^{(4)}}, \quad \Delta K_B = 100 \% \frac{K_B^{(6)} - K_B^{(4)}}{K_B^{(6)}}$$

$$\Delta K_B = 100 \% \frac{K_B^{(6)} - K_B^{(5)}}{K_B^{(6)}}$$

В табл. 1 величина спектрального интервала  $\Delta\lambda_s$ , выраженная в ангстремах, соответствует ширине выходной щели спектроэлектрофотометра (с помощью которого проводилось сканирование линии) или интервалам  $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_s$ , по которым проводилось численное интегрирование.

Анализ результатов расчета коэффициентов  $K_B^{(4)}$ ,  $K_B^{(5)}$  и  $K_B^{(6)}$ , (см. табл. 1) показывает, что коэффициент, найденный по двум параметрам спектральной линии, может отличаться в 2 раза от его точного значения. Коэффициент магнитной чувствительности определен по водородным линиям  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , а также по линии гелия He II  $\lambda_0 = 4686 \text{ \AA}$ . У отобранных объектов линии достаточно развиты, имеют симметричный, но различный для каждого из объектов профиль. Различие может быть вызвано как физическими условиями, так и способом регистрации профиля. Исключение составляет водородная линия  $H_\gamma$  звезды  $\alpha$  Cam, профиль которой несимметричен. Поэтому расчет коэффициентов магнитной чувствительности выполнен для каждого из крыльев линии. Звезда  $\alpha$  Cam - сверхгигант. У звезд данного типа заподозрено магнитное поле. Профиль линии  $H_\beta$  звезды  $\alpha$  Cam, по которому выполнены расчеты коэффициента магнитной чувствительности, любезно предоставлен Ф. А. Мусаевым. Профиль линии  $H_\beta$  галактики NGC 4151 взят из работы Бочкарева (1984). Профили линий  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и He II звезд  $\gamma$  Gem,  $\epsilon$  UMa и HD 192163 получены на телескопе "Цейсс-600" САО АН СССР способом спектроэлектрофотометрического сканирования, а фотографический профиль линии  $H_\gamma$  звезды  $\gamma$  Gem взят из каталога Райта и др. (1964).

Таблица 1. Коэффициенты магнитной чувствительности  $K_B$  некоторых объектов

Объект	ли- ния	Способ получения профиля спектраль- ной линии	$\Delta\lambda_s$ [Å]	$R_0$	$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}$ [Å]	$I_d$ [от- нос. ед.]	$I_e$ [от- нос. ед.]	n	$K_B \cdot 10^5$ [Гс]			$\Delta K_B$ [%]	
									(4)	(5)	(6)		
$\alpha$ Cam 09.5Ia Синее крыло спект- раль- ной линии	$H_\beta$	Фотография	-	0.75	5.2	935	795	13	-	14.6	15.4	-	6
									14.6	-	15.7	6	
		Численное интегриро- вание	2.6	0.77	5.4	947	807	9	-	15.3	17.3	-	13
									15.3	-	15.7	2	
$\alpha$ Cam 09.5Ia Красное крыло линии	$H_\beta$	Фотография	-	0.75	3	933	790	6	-	8.2	8.9	-	8
									8.2	-	9.4	13	
									-	8.9	9.4	5	
$\gamma$ Gem A0 IV	$H_\gamma$	Фотография	-	0.16	12	70	44	12	-	15.0	8.8	-	41
									15.0	-	16.2	7	
		Спектро- электро- фотометрия	2.5	0.28	14	75.5	48	14	-	17.9	13.2	-	26
									17.9	-	20.1	11	
$\epsilon$ UMa A0pV	$H_\beta$	Спектро- электро- фотометрия	10	0.39	20	85	51	10	-	22.8	24.2	-	6
									22.8	-	26.3	14	
									-	24.2	26.3	8	
HD 192163 WR 4686	$HeII$ 4686	Спектро- электро- фотометрия	10	0.4	21	298	192	5	-	22.0	20.7	-	6
									22.0	-	23.3	6	
									-	20.7	23.3	11	
NGC4151 Сейфер- товская галак- тика	$H_\beta$	Сканер БТА	-	21	6	70	170	6	-	-13	-16	-	27
									-13	-	-14	11	
									-	-16	-14	13	
NGC4151 Сейфер- товская галак- тика	$H_\beta$	Сканер БТА	-	21	6	70	170	6	-	-3.3	-2.8	-	14
									-3.3	-	-3.1	5	
									-	-2.8	-3.1	10	



3. СЛУЧАЙНАЯ ОШИБКА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
КАК ПАРАМЕТР ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОМЕТРА

Световой поток  $F_{+\sigma}$  и  $F_{-\sigma}$  от  $O$  - компонент линии пропорционален количеству импульсов  $N_{+\sigma}$  и  $N_{-\sigma}$ , регистрируемых в измерительных каналах магнитометра (см. рис. 1).

В этом случае магнитное поле звезды:

$$B = \frac{K_B (N_{+\sigma} - N_{-\sigma})}{N_{+\sigma} + N_{-\sigma} - N_{\phi}} \quad [\text{Гс}], \quad (7)$$

так как, согласно формуле (2),

$$\Delta I_n = \frac{N'_{+\sigma} - N'_{-\sigma}}{N'_{+\sigma} + N'_{-\sigma}},$$

где  $N'_{+\sigma} = N_{+\sigma} - 0.5 \cdot N_{\phi}$ , а  $N'_{-\sigma} = N_{-\sigma} - 0.5 \cdot N_{\phi}$ . В формуле (7)  $N_{\phi}$  определяет количество шумовых импульсов.

Величина случайной погрешности измерения магнитного поля, определяемого в (7), оценивается дисперсией (например, Долинский, 1971):

$$D(B) = K_B \cdot [(P'_x)^2 \cdot D(x) + (P'_y)^2 \cdot D(y)], \quad (8)$$

$$\text{где } P = \frac{N_{+\sigma} - N_{-\sigma}}{N_{+\sigma} + N_{-\sigma} - N_{\phi}} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2 - N_{\phi}}, \quad x = N_1/N_2, \quad y = N_{\phi}/N_2.$$

В общем случае, согласно (8), среднеквадратическая ошибка  $\sigma_B$  измерения среднего значения поля равна:

$$\sigma_B = \frac{K_B \sqrt{(2\bar{N}_2 - \bar{N}_{\phi})^2 (\bar{N}_1^2 \cdot s_2^2 + \bar{N}_2^2 \cdot s_1^2) + (\bar{N}_2 - \bar{N}_1)^2 (\bar{N}_{\phi} \cdot s_2 + \bar{N}_2 \cdot s_{\phi}^2)^2}}{\bar{N}_2 (\bar{N}_1 + \bar{N}_2 - \bar{N}_{\phi})^2} \quad [\text{Гс}], \quad (9)$$

$$\text{где } s_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{1i} - \bar{N}_1)^2}{n(n-1)}, \quad s_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{2i} - \bar{N}_2)^2}{n(n-1)}, \quad s_{\phi}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{\phi i} - \bar{N}_{\phi})^2}{n(n-1)},$$

$n$  - количество измерений, по которому определяется среднее значение количества импульсов  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$ , прошедших, соответственно, через информационный и опорный измерительные каналы магнитометра за время наблюдений  $t$  [с].

Для достаточно большого количества измерений эффективность магнитометра можно оценить среднеквадратической ошибкой, полученной из (9), для распределения Пуассона:

$$\sigma_{\bar{B}} = \frac{K_B \sqrt{\bar{N}_1 \cdot \bar{N}_2 (\bar{N}_1 + \bar{N}_2) (2\bar{N}_2 - \bar{N}_\phi)^2 + \bar{N}_2 \cdot \bar{N}_\phi (\bar{N}_2 + \bar{N}_\phi) (\bar{N}_2 - \bar{N}_1)^2}}{\bar{N}_2 (\bar{N}_1 + \bar{N}_2 - \bar{N}_\phi)^2} \quad [\Gamma c], \quad (10)$$

где  $\bar{N}_\phi = N_\phi \cdot t/n$ ,  $N_\phi = const$  - общее количество шумовых импульсов, регистрируемых измерительными каналами магнитометра за 1 секунду.

При  $N_\phi = 0$  формула (10) приводится к известному виду:

$$\sigma_{\bar{B}} = \frac{2K_B}{\bar{N}_1 + \bar{N}_2} \cdot \sqrt{\bar{N}_1 \cdot \bar{N}_2 / (\bar{N}_1 + \bar{N}_2)} \quad [\Gamma c], \quad (11)$$

а при  $\bar{N}_1 \approx \bar{N}_2$  и  $\bar{N}_\phi = 0$ , эффективность магнитометра определяется как

$$\sigma_{\bar{B}} = K_B \sqrt{2\bar{N}} \quad [\Gamma c]. \quad (12)$$

Если  $\bar{N}_\phi \neq 0$ , а  $\bar{N}_2 \approx \bar{N}_1$ , то

$$\sigma_{\bar{B}} = \frac{K_B \sqrt{2\bar{N}}}{2\bar{N} - \bar{N}_\phi} \quad [\Gamma c].$$

Использование формулы (12) для оценки погрешности измерений больших магнитных полей может оказаться некорректным, так как нарушается условие  $\bar{N}_1 \approx \bar{N}_2$ . При нарушении условия  $\bar{N}_1 \approx \bar{N}_2$  истинное значение  $\sigma'_B = K_V \cdot \sigma_{\bar{B}}$ , где коэффициент  $K_V$  определяется выражением

$$K_V = \frac{2 \sqrt{\bar{N}_1 / \bar{N}_2}}{1 + \bar{N}_1 / \bar{N}_2},$$

полученным из (11) и (12), а  $\bar{N} = (\bar{N}_1 + \bar{N}_2)/2$ . Значения  $K_V$  представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициент  $K_V$ , связывающий истинную ошибку измерения магнитного поля  $\sigma'_B$  с ошибкой  $\sigma_{\bar{B}}$ , рассчитанной по формуле (12), при нарушении условия  $\bar{N}_1 \approx \bar{N}_2$

$\bar{N}_1/\bar{N}_2$	0.01	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	5.0	10	20	100
$K_V$	0.20	0.43	0.57	0.87	0.94	1.00	0.94	0.74	0.57	0.43	0.20

При наблюдении слабых объектов ( $m=13-17$ ) критерием возможности применения формулы (12) для определения  $\sigma_{\bar{B}}$  может оказаться отношение сигнал/шум  $2\bar{N}/\bar{N}_\phi$ . С учетом  $2\bar{N}/\bar{N}_\phi$  оценка истинной погрешности измерения поля  $\sigma'_B = K_\phi \cdot \sigma_{\bar{B}}$ , где  $K_\phi = 1/(1 - \bar{N}_\phi/2\bar{N})$ .

Значения коэффициентов  $K_\phi$  приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициент  $K_{\phi}$ , связывающий истинную ошибку измерения магнитного поля  $\sigma'_B$  с ошибкой  $\sigma_B$ , рассчитанной по формуле (12), в зависимости от отношения сигнал/шум.

$2 \bar{N}/\bar{N}_{\phi}$	100	50	20	10	5.0	2.0	1.5	1.2	1.05	1.01	1.00
$K_{\phi}$	1.01	1.02	1.05	1.11	1.25	2.00	3.00	6.00	21	101	$\infty$

Величина  $2\bar{N}$  может быть записана следующим образом:

$$2\bar{N} = 2N \cdot t = N_s \cdot t,$$

где  $N_s$  - количество импульсов (за 1 секунду), пропорциональное части светового потока, выделяемой щелями магнитометра из общего потока, проходящего поляриметрический анализатор и спектрограф (см. рис. 1, 2 и 3).

Из формул (5) и (12) можно получить

$$\sigma_B \approx 10^2 \cdot \frac{\lambda_{1/2} (R_0 + 1)}{\lambda_0 \cdot |1 - R_0| \sqrt{N_s \cdot t}} \text{ [Гц]}. \quad (13)$$

Количество импульсов  $N_s$ , регистрируемое магнитометром за 1 секунду от звезды величины  $m$ , определяется выражением

$$N_s = \frac{\Delta\lambda_{1/2} \cdot N_s^0 \cdot (R_0 + 1)}{\Delta\lambda_{1/2}^0 \cdot (R_0^0 + 1)} \cdot 2.512^{(m^0 - m)} \text{ [и/с]}, \quad (14)$$

где  $N_s^0$  - количество импульсов от стандартной звезды, имеющей параметры  $\Delta\lambda_{1/2}^0$  и  $R_0^0$  той же, что и у исследуемой звезды, спектральной линии. Для расчета за стандартную звезду выбирается звезда нулевой величины спектрального класса AOV с  $N_s^0 = 1.2 \cdot 10^7$  и/с, которые регистрируются в крыльях спектральной линии  $H_{\beta}$  ( $\lambda_0 = 4861 \text{ \AA}$ ), имеющей  $\Delta\lambda_{1/2}^0 = 20 \text{ \AA}$  и  $R_0^0 = 0.3$ . Величина  $N_s^0$  обеспечивается в стандартной схеме магнитометра при хорошей прозрачности, малом зенитном расстоянии звезды и изображениях  $\alpha < 2''$ .

Общая формула оценки эффективности магнитометра получается из выражений (13) и (14)

$$\sigma_B \approx 10^{12} \cdot \frac{\sqrt{(R_0 + 1) \cdot (R_0^0 + 1) \cdot \Delta\lambda_{1/2} \cdot \Delta\lambda_{1/2}^0}}{\lambda_0^2 \cdot |1 - R_0| \cdot \sqrt{t \cdot N_s^0 \cdot 2.512^{(m^0 - m)}}} \text{ [Гц]}. \quad (15)$$

где  $\Delta\lambda_{1/2}$ ,  $\Delta\lambda_{1/2}^0$ ,  $\lambda_0$  измеряются в ангстремах,  $N_s^0$  в импульсах в секунду, а  $t$  - в секундах.

Количество света, полезно используемого магнитометром, определяется его оптической схемой и ее оптическими свойствами, размером изображения звезды (FWM) и геометрией входной щели спектрографа - шириной  $S$  и высотой  $H$ , измеряемых в секундах дуги.

Масштаб изображения на входной щели  $\beta = 2.75''/\text{мм}$  (в главном фокусе БТА при относительном отверстии поляризационного анализатора и спектрографа, равном  $1/12.5$ ).

В стандартной схеме магнитометра отношение фокусного расстояния коллиматора спектрографа к фокусному расстоянию камеры равно 2. При относительном равенстве щелей магнитометра, входной и выходной, и их спектральной ширине, равной  $0.5 \Delta\lambda_{1/2}$ , полуширина  $S/2$  щели связана с полушириной  $\Delta\lambda_{1/2}$  линии соотношением

$$S/2 = 0.5 \cdot \beta \cdot \Delta\lambda_{1/2} \cdot d\ell/d\lambda,$$

где  $d\lambda/d\ell$  - обратная линейная дисперсия спектрографа, равная  $15 \text{ \AA}/\text{мм}$  в случае применения дифракционной решетки, имеющей 1302 штрихов (на 1 мм длины).

Полуввысота  $H/2$  входной щели определяется масштабом изображения и линейным размером  $h$  [мм] высоты выходной щели

$$H/2 = \beta \cdot h.$$

Размер  $h$  в большинстве случаев выбирается равным 1.5 мм, при этом отсутствуют потери света по высоте щели для изображений, не превышающих  $\alpha \approx 4''$ .

Количество света, пропускаемое щелью, оценивается коэффициентом

$$K_s = \Phi \cdot \left( \frac{2.35 \cdot S/2}{\alpha \cdot \sqrt{2}} \right) \cdot \Phi \left( \frac{2.35 \cdot H/2}{\alpha \cdot \sqrt{2}} \right).$$

Значения коэффициента  $K_s$ , связывающие изображения звезды с размером щели, определяются по известной табулированной функции  $\text{erf}(x) = \Phi(x)$ , значения которой сведены в табл. 4.

Подстановка в выражения (13) и (14)  $\lambda_0$ ,  $\Delta\lambda_{1/2}^0$ ,  $R_0^0$  и  $N_s^0 \cdot t$  при  $t$  - продолжительности наблюдений, равной 1 часу, а также введение в выражения коэффициента  $K_s$ , коэффициента  $K_\lambda = \lambda_{0(H\beta)}^2 / \lambda_0^2$  (который для  $H_\beta$  имеет значение 1, для  $H_\gamma$  - 1.254, а для  $H_\epsilon$  II ( $\lambda_0 = 4686 \text{ \AA}$ ) - 1.076), коэффициента  $K_E$ , учитывающего распределение энергии в спектре исследуемого объекта (относительно области  $H_\beta$ ), и коэффициента  $K_F$  - эффективности магнитометра, зависящей от изменений оптической схемы или ее элементов, применение более эффективных светоприемников и т. д., позволяют получить удобные для расчета формулы:

$$\sigma_B \approx 2.5^{m/2} \cdot K_\lambda \cdot \frac{\sqrt{(R_0 + 1) \Delta\lambda_{1/2}}}{|1 - R_0| \sqrt{t \cdot K_s \cdot K_E \cdot K_F}} [\text{Гс}], \quad (17)$$

$$N_s = 4.5 \cdot 10^5 \cdot 2.5^{-m} \cdot K_s \cdot K_E \cdot K_F \cdot \Delta\lambda_{1/2} \cdot (R_0 + 1) [\text{и/с}], \quad (18)$$

где  $\Delta\lambda_{1/2}$  [А],  $t$  [ч].

Таблица 4. Коэффициент  $K_S$ , учитывающий потери света на входной щели, в зависимости от диаметра изображения звезды и размера щели

$\alpha$ [..."]	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10	
$\Delta\lambda_{1/2}$ [А]	$K_S$												
$S$ [..."]	$K_S$												
2	0.4	0.62	0.33	0.23	0.17	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02
3	0.5	0.81	0.48	0.33	0.25	0.17	0.13	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
6	1.1	0.99	0.81	0.61	0.48	0.33	0.25	0.19	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07
10	1.8	1.00	0.97	0.85	0.72	0.53	0.40	0.32	0.25	0.20	0.16	0.14	0.11
20	3.7	1.00	1.00	1.00	0.97	0.85	0.71	0.58	0.47	0.39	0.32	0.26	0.22
40	7.3	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.95	0.87	0.76	0.65	0.56	0.48	0.41
80	15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.95	0.89	0.82	0.75	0.68	0.61

Существующая оптическая схема магнитометра является универсальной и предназначена для измерения магнитных полей звезд с полуширинами спектральных линий  $\Delta\lambda_{1/2} = 3-4$  А (сверхгиганты),  $\Delta\lambda_{1/2} = 15-20$  А (быстро-вращающиеся Ар звезды),  $\Delta\lambda_{1/2} > 20$  А (звезды типа Вольфа-Райе, белые карлики) и т. д. Возможно также измерение круговой и линейной поляризации в спектральных полосах. В этом варианте схемы для спектральной полосы  $\Delta\lambda_p$  оценка эффективности магнитометра, работающего в режиме поляриметра (равноточное измерение  $u$ - и  $q$ -параметров Стокса) проводится по формуле

$$\sigma_p^- \approx 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2.5^{m/2} / \sqrt{\Delta\lambda_p \cdot t \cdot K_S \cdot K_E \cdot K_F} \quad [\%], \quad (18)$$

а количество импульсов  $N_p$ , регистрируемое поляриметром за 1 с, определяется соотношением

$$N_p = 10^6 \cdot 2.5^{-m} \cdot K_S \cdot K_E \cdot K_F \cdot \Delta\lambda_p \quad [\text{и/с}], \quad (19)$$

где  $\Delta\lambda_p$  выражено в ангстремах, а  $t$  - в часах.

Эффективность магнитометра при измерении только круговой поляризации ( $v$ -параметр) для равных времен наблюдений круговой и линейной поляризаций оценивается как  $\sigma_v^- = 0.67 \cdot \sigma_p^-$ , так как измеряется один параметр, а не два, как в случае линейной, и отсутствуют потери света на четвертьволновой пластине.

В качестве примера получены оценки для звезды нулевой величины, по формулам (16) и (18) проведен расчет ошибок измерений магнитного поля  $\sigma_B^0$  и поляризации  $\sigma_p^0$ , по формулам (17) и (19) определено количество импульсов  $N_s^0$  и  $N_p^0$ , регистрируемых от этой звезды за 1 с. В выражениях (16), (17), (18) и (19) значения  $K_S$ ,  $K_E$ ,  $K_F$  и  $K_\lambda$  равны 1, а время наблюдений - 1 часу. В табл. 5 приведены значения  $\sigma_B^0$  [Гс] и  $N_s^0$  [и/с], а в табл. 6 - значения  $\sigma_p^0$  [%] и  $N_p^0$  [и/с].

Таблица 5. Зависимость ошибки измерения магнитного поля  $\sigma_B^0$  и скорости счета  $N_S^0$  от параметров  $\Delta\lambda_{1/2}$  и  $R_0$  спектральной линии  $H_\beta$  звезды нулевой величины за 1 час наблюдений на БТА

$\Delta\lambda_{1/2}$ [Å]	2	3	6	10	20	40	80
$R_0$	$\sigma_B^0$ [Гс]						
	$N_S^0$ [и/с]						
0.1	1.6	2.0	2.8	3.7	5.2	7.4	10
	$10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$10^7$	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$
0.3	2.3	2.8	4.0	5.2	7.3	10	15
	$1.2 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^6$	$3.6 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^7$	$4.8 \cdot 10^7$
0.5	3.7	4.2	6.0	7.7	11	15	22
	$1.4 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^7$	$5.5 \cdot 10^7$
0.7	6.1	7.5	11	14	19	27	39
	$1.6 \cdot 10^6$	$2.3 \cdot 10^6$	$4.7 \cdot 10^6$	$7.8 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^7$	$3.1 \cdot 10^7$	$6.3 \cdot 10^7$
0.9	19	24	34	43	62	87	120
	$1.7 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^6$	$5.2 \cdot 10^6$	$8.7 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$
1.5	4.5	5.5	7.7	10	14	20	28
	$2.3 \cdot 10^6$	$3.4 \cdot 10^6$	$6.9 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^7$	$4.6 \cdot 10^7$	$9.2 \cdot 10^7$
2.0	2.5	3.0	4.3	5.5	7.7	11	15
	$2.8 \cdot 10^6$	$4.1 \cdot 10^6$	$8.3 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^7$	$5.5 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$
3.0	1.4	1.7	2.4	3.2	4.5	6.3	8.9
	$3.7 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^7$	$7.4 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^8$
5.0	0.86	1.1	1.5	1.9	2.7	3.9	5.5
	$5.5 \cdot 10^6$	$8.3 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^7$	$5.5 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^8$
10	0.56	0.65	0.91	1.2	1.7	2.4	3.3
	$10^7$	$1.5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$10^8$	$2 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$
20	0.34	0.42	0.59	0.75	1.1	1.5	2.2
	$1.9 \cdot 10^7$	$2.9 \cdot 10^7$	$5.8 \cdot 10^7$	$9.6 \cdot 10^7$	$1.9 \cdot 10^8$	$3.8 \cdot 10^8$	$7.7 \cdot 10^8$
40	0.24	0.30	0.41	0.54	0.75	1.1	1.5
	$3.8 \cdot 10^7$	$5.6 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8$	$3.8 \cdot 10^8$	$7.5 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^9$

Таблица 6. Зависимость ошибки измерения линейной поляризации  $\sigma_p^0$  и скорости счета  $N_p^0$  от спектральной полосы  $\Delta\lambda_p$  звезды нулевой величины за 1 ч наблюдений на БТА

$\Delta\lambda_p$ [А]	1.5	3.0	10	30	100	300	1000	3000
$\sigma_p^0$ [%]	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$
$N_p^0$ [и/с]	$1.5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10^7$	$3 \cdot 10^7$	$10^8$	$3 \cdot 10^8$	$10^9$	$3 \cdot 10^9$

Примечание к табл. 5 и 6: При сокращении времени наблюдений до 15 мин ошибки измерений возрастает в 2 раза относительно ошибок, приведенных в таблицах, а при 6-минутных наблюдениях - в 3 раза.

Если объект наблюдается впервые и неизвестна величина его магнитного поля, а также закон ее изменения во времени, то согласно примечанию к табл. 5 и 6, с целью более эффективного использования магнитометра на БТА, может быть применено разбиение наблюдений на этапы. Первый - 6-минутные наблюдения, второй - 15-минутные (в 15 мин входят первые 6), и третий - от 1 ч до 2 ч. Наблюдения продолжительностью более 2 ч малоэффективны по затратам наблюдательного времени и могут проводиться в исключительных случаях, например, когда необходим устойчивый нулевой результат или предполагается последующая обработка временного ряда. Переход от первого этапа к последующим осуществляется только после анализа среднего и ошибки его измерения. Например, после окончания второго этапа (15-минутных наблюдений) было получено среднее значение измеряемого магнитного поля, вдвое превышающее ошибку его измерения. В этом случае принятие решения о продолжении наблюдений достаточно убедительно, так как на третьем этапе может быть получен результат с достаточной степенью достоверности  $3\sigma_B$ . Если же результат измерения не превысил ошибки, то наблюдения рациональнее прекратить. После первого этапа критерием для продолжения наблюдений является равенство ошибки и среднего.

Таблица 7. Зависимость ошибки измерения магнитного поля  $\sigma_B^0$  от размера изображения  $\alpha$  и полуширины  $\Delta\lambda_{1/2}$  спектральной линии звезды нулевой величины

$\alpha$ [..."]	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
$\Delta\lambda_{1/2}$ [А]	$\sigma_B^0$ [Гс]											
2	4.7	6.4	7.7	8.9	11	13	14	16	18	20	22	24
3	4.7	6.0	7.3	8.4	10	12	13	15	17	19	21	23
6	6.0	6.7	7.7	8.6	10	12	14	15	17	19	21	23
10	7.7	7.7	8.3	9.1	11	12	14	15	17	19	21	23
20	11	11	11	11	12	13	14	16	18	19	21	23
40	15	15	15	15	15	15	16	17	19	20	22	23
80	22	22	22	22	22	22	23	23	24	25	27	28

Как было показано выше, одним из факторов, определяющих ошибку измерения магнитного поля, является размер изображения на входной щели спектрографа, ширина которой в свою очередь однозначно связана с полушириной спектральной линии. Учет этого фактора может способствовать правильному выбору объекта наблюдений, а также позволит оценить продолжительность наблюдений при некоторой, заранее заданной, ошибке измерений. В табл. 7 приведены значения  $\sigma_B^0$  [Гс]. Расчет выполнен для звезды нулевой величины и линии с остаточной интенсивностью  $R_0 = 0.5$ .

Из табл. 7 следует, что ошибка измерений магнитного поля, начиная с изображений  $\alpha = 3''$  и больше, практически не зависит от полуширины спектральной линии, а при изменении изображений от  $\alpha = 3''$  до  $\alpha = 10''$  - возрастает приблизительно в 2 раза.

При использовании для измерений двух линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , коэффициенты  $K_\lambda$  и  $K_F$  в формулах (16) и (17) принимают соответственно значения 1.127 и 1.6. В этом случае для звезды нулевой величины и линий с  $\Delta\lambda_{1/2} = 20 \text{ \AA}$  и  $R_0 = 0.5$  за один час наблюдений  $\sigma_B^0 = 9.8 \text{ Гс}$ , при  $N_s^0 = 2.1 \cdot 10^7$  и/с. Для сравнения (табл. 5) - при работе по одной линии  $H_\beta$   $\sigma_B^0 = 11 \text{ Гс}$ ,  $N_s^0 = 1.4 \cdot 10^7$  и/с.

В 1988 - 1989 гг. для уменьшения световых потерь при работе по линиям  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  выполнено просветление оптики магнитометра на область 4000 - 5000  $\text{\AA}$  и изменена оптическая схема коллиматора спектрографа UAGS (вместо трех непросветленных линз установлена одна просветленная). В табл. 8 приведены значения  $\sigma_B^-$  и  $N_s$  для  $\Delta\lambda_{1/2} = 20 \text{ \AA}$ ,  $K_\lambda = 1.127$ ,  $R_0 = 0.5$  и  $K_F = 4.5$ . Продолжительность наблюдений - один час.

Таблица 8. Значения ошибки измерения магнитного поля  $\sigma_B^-$  и скорости счета  $N_s$  для звезд 0-17 величины за 1 ч наблюдений на БТА (для линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ )

m	0	5	7	10	12	15	17
$\sigma_B^-$ [Гс]	5.8	58	146	580	1460	5800	14600
$N_s$ [и/с]	$6.1 \cdot 10^7$	$6.1 \cdot 10^5$	$9.6 \cdot 10^4$	$6.1 \cdot 10^3$	960	61	9.6

Таблица 9. Значения ошибки измерения линейной поляризации  $\sigma_p^-$  и скорости счета  $N_p$  при работе в спектральной полосе  $\Delta\lambda_p = 10 \text{ \AA}$  звезд 0-17 величины за 1 ч наблюдений на БТА

m	0	5	7	10	12	15	17
$\sigma_p^-$ [%]	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	0.15	0.61	1.5
$N_p$ [и/с]	$2.5 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^2$	25	4

В табл. 9 приведены значения  $\sigma_p^-$  и  $N_p$  при измерении линейной поляризации в схеме с просветленной оптикой (рабочая область 4000-5000  $\text{\AA}$ ) в спектральной полосе  $\Delta\lambda_p = 10 \text{ \AA}$  и продолжительностью наблюдений, равной 1 ч.

Для оценки относительной эффективности водородного магнитометра проведено сравнение его проникающей способности с проникающей способностью спектрополяриметра Эдинбургской обсерватории (Вальстенкрофт и др., 1983).



Поляриметр, выполненный на монохроматоре Черни-Тернера, предназначен для измерения четырех параметров Стокса. Скорость счета  $N_S$ , полученная на спектрополяриметре в линии  $H_\beta$  в полосе 10 А на 1.5-м телескопе от звезды  $\alpha$  CVn и  $\alpha$  Aur, соответственно, 53000 и/с и 39000 и/с, что в пересчете на звезду нулевой величины, наблюдаемую на 6-м телескопе, дает  $1.16 \cdot 10^7$  и/с и  $6.7 \cdot 10^6$  и/с. Для сравнения выбирается звезда  $\alpha^2$  CVn, так как она ближе по спектральному классу к стандартной звезде, взятой для расчетов эффективности водородного магнитометра. Для магнитометра при той же спектральной полосе ( $\Delta\lambda_{1/2} = 20$  А,  $\Delta\lambda_s = 10$  А) скорость счета  $N_S = 6.1 \cdot 10^7$  и/с. Значение  $N_S$  взято из табл. 8. Сравнение эффективности водородного магнитометра и спектрополяриметра Эдинбургской обсерватории показывает более высокую проникающую способность водородного магнитометра (~ в 5 раз). Большая проникающая способность обеспечивается за счет использования двух линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , просветленного комплекта оптики и двухлучевого варианта оптической схемы.

#### 4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При работе с магнитометром обработка результатов измерений выполняется на ЭВМ непосредственно в процессе наблюдений.

Рассчитываются значения поля для каждого из измерений:

$$B_i = \frac{K_B(N_A - N_i)}{2 N_A} \text{ [Гс]},$$

где  $N_A$  - постоянная величина (см. рис.1), равная количеству импульсов, регистрируемых в одном (опорном) канале магнитометра, при этом во втором (информационном) канале регистрируется  $N_i$  число импульсов (опорный канал управляет информационным). По ним определяется среднее значение  $\bar{B}$  и ошибка среднего  $s_{\bar{B}}$ :

Анализ результатов расчета ошибок  $\sigma_{\bar{B}}$  (12) и  $s_{\bar{B}}$  позволяет осуществить контроль за работой аппаратуры и условиями проведения наблюдений (сбои, помехи, превышение допустимой величины светового потока, инструментальная и атмосферная поляризация, собственная поляризация объекта и т. п.).

В качестве примера в табл. 10 приведены некоторые результаты измерений магнитных полей звезд по двум спектральным линиям  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , полученным в процессе наблюдений на БТА.

В табл. 10 включены измерения программных и контрольных звезд, выполненные при нормальных условиях наблюдений. Отличие ошибок  $\sigma_{\bar{B}}$  и  $s_{\bar{B}}$  для значений, приведенных в таблице, колеблется в пределах 1.2-17 %, - большие значения характерны для малых выборок, например, №№ 3 и 5.

В процессе наблюдений и при обработке результатов измерений также исключались промахи (например, Румшинский, 1971) по критерию  $>3\sigma_{\bar{B}}$ , где  $\sigma_{\bar{B}}$  - среднеквадратическая ошибка одного измерения. При исключении промахов исходный массив сохранялся в ЗУ ЭВМ (магнитные диски и ленты). Корректность принятого метода исключения промахов обеспечивалась равноточностью измерений. Условием равноточности измерений является неизменность заданного

количества импульсов  $N_A$  в опорном канале во время наблюдения одного объекта.

Таблица 10. Результаты измерений магнитных полей некоторых объектов

№	Объект	m	$\Delta\lambda_s$ [Å]	$2N_{\max}$ [и/с]	$K_B$ [Гс]	$\bar{B}$ [Гс]	$\sigma_{\bar{B}}$ [Гс]	$s_{\bar{B}}$ [Гс]
1	52 Her	4.9	10	152030	$24 \cdot 10^5$	+950	186	179
2	53 Cam	6.0	10	47000	$28 \cdot 10^5$	+3935	138	140
3	HD 215441	8.7	10	6240	$32 \cdot 10^5$	+10600	1800	2100
4	HD 215441	8.7	10	4300	$32 \cdot 10^5$	+8000	1620	1600
5	HD 215441	8.7		2125	$32 \cdot 10^5$	+13600	3620	3100
6	HD 210418	3.5	10	525305	$28 \cdot 10^5$	+69	79	74
7	$\alpha$ UMi	2.0	5.0	513890	$12.6 \cdot 10^5$	-8	35	34
8	$\nu$ Ser	4.3	1.5	1700	$5 \cdot 10$	+1418	177	182
9	WD 0713+584	12	18	1880	$45 \cdot 10^5$	-111	3190	3170
10	Лампа	-	-	632100	100*	$5.3 \cdot 10^4$ *	$2.5 \cdot 10^{-3}$ *	$2.25 \cdot 10^{-3}$ *

\* Значения поляризации приведены в %.

Примечания к табл. 10:

1.  $\Delta\lambda_s$  - ширина щели магнитометра.

2. В № 7 поток  $2N_{\max}$  от звезды  $\alpha$  UMi искусственно ослаблен приблизительно в 2 раза (уменьшена ширина входной щели), так как при средней скорости счета, превышающей  $5 \cdot 10^5$  и/с, нарушается закон нормального распределения и, как следствие, условие  $\sigma_{\bar{B}} \approx s_{\bar{B}}$ .

3. В № 10 выполнено измерение круговой поляризации светового потока лампы накаливания, питаемой от стабилизированного источника напряжения.

4. В № 8 магнитное поле измерялось по одной спектральной линии  $H_{\beta}$ .

К настоящему времени на магнитометре проведено более 200 измерений магнитных полей и поляризации объектов, из них около 70 % - на БТА. Выполнен ряд работ, в которых использованы результаты этих измерений. Например, Глаголевский и др. (1982), Микулашек и др. (1984), Глаголевский и др. (1985); Глаголевский и др. (1986), Илиев и др. (1988), Герт (1988), Микулашек (1988), Хубриг (1988), Глаголевский и др. (1989), Бычков и др. (1989).

Помимо программных наблюдений на БТА, И. И. Романюком и автором были проведены на телескопе "Цейсс-600" измерения круговой поляризации ряда звезд в полосе  $\lambda_0 = 5200 \text{ Å}$ , а у звезды HD 192163 в линии He II  $\lambda_0 = 4686 \text{ Å}$  (табл. 11).

Таблица 11. Результаты наблюдений круговой поляризации звезд, выполненных на телескопе "Цейсс-600"

Объект	Дата	Время ( UT + 3 <sup>h</sup> )				N <sub>общ</sub> [импульсы]	P <sub>(л-п)</sub> [%]	P <sub>(л+п)</sub> [%]	σ <sub>P</sub> [%]
		Нач.		Кон.					
		h	м	h	м				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α Lyr	2/3- -09-1982	21	58	22	42	3.20·10 <sup>8</sup>	+3.6·10 <sup>-3</sup>	-6.0·10 <sup>-4</sup>	5.6·10 <sup>-3</sup>
	7/8- -09-1982	22	03	22	43	9.60·10 <sup>7</sup>	+1.3·10 <sup>-2</sup>	+1.7·10 <sup>-2</sup>	1.0·10 <sup>-2</sup>
γ Ari  южный компо- нент двойной звездной системы	2/3- -09-1982	23	23	03	11	1.44·10 <sup>7</sup>	-3.3·10 <sup>-2</sup>	-1.4·10 <sup>-2</sup>	2.6·10 <sup>-2</sup>
	6/7- -09-1982	00	01	03	46	1.92·10 <sup>7</sup>	+2.1·10 <sup>-2</sup>	-1.6·10 <sup>-2</sup>	2.3·10 <sup>-2</sup>
	24/25- -11-1982	19	18	21	38	2.88·10 <sup>7</sup>	-1.0·10 <sup>-2</sup>	+6.1·10 <sup>-3</sup>	1.9·10 <sup>-2</sup>
	25/26- -11-1982	19	38	21	07	2.88·10 <sup>7</sup>	+1.4·10 <sup>-2</sup>	-3.8·10 <sup>-2</sup>	1.9·10 <sup>-2</sup>
	26/27- -11-1982	18	44	20	07	2.88·10 <sup>7</sup>	+1.3·10 <sup>-2</sup>	+8.6·10 <sup>-3</sup>	1.9·10 <sup>-2</sup>
	27/28- -11-1982	18	37	20	40	2.88·10 <sup>7</sup>	+3.2·10 <sup>-2</sup>	+2.6·10 <sup>-3</sup>	1.9·10 <sup>-2</sup>
γ Ari  северный компо- нент двойной звездной системы	2/3- -09-1982	03	13	04	17	4.80·10 <sup>6</sup>	+6.2·10 <sup>-2</sup>	-2.4·10 <sup>-2</sup>	4.6·10 <sup>-2</sup>
	6/7- -09-1982	03	48	04	43	6.40·10 <sup>6</sup>	-2.8·10 <sup>-2</sup>	+9.9·10 <sup>-3</sup>	4.0·10 <sup>-2</sup>
	24/25- -11-1982	21	40	23	38	1.92·10 <sup>7</sup>	+1.3·10 <sup>-2</sup>	+2.8·10 <sup>-2</sup>	2.3·10 <sup>-2</sup>
	25/26- -11-1982	21	08	22	12	1.92·10 <sup>7</sup>	-3.1·10 <sup>-2</sup>	+2.0·10 <sup>-3</sup>	2.3·10 <sup>-2</sup>
	26/27- -11-1982	20	09	20	58	1.92·10 <sup>7</sup>	+1.4·10 <sup>-2</sup>	+1.1·10 <sup>-2</sup>	2.3·10 <sup>-2</sup>
	27/28- -11-1982	20	44	21	59	1.92·10 <sup>7</sup>	-1.1·10 <sup>-3</sup>	+2.3·10 <sup>-2</sup>	2.3·10 <sup>-2</sup>
α Cyg	6/7- -09-1982	22	42	23	52	1.12·10 <sup>8</sup>	-6.6·10 <sup>-3</sup>	+8.8·10 <sup>-3</sup>	9.5·10 <sup>-3</sup>
	7/8- -09-1982	22	51	23	37	9.60·10 <sup>7</sup>	+3.3·10 <sup>-3</sup>	-5.6·10 <sup>-4</sup>	1.0·10 <sup>-2</sup>
	23/24- -12-1982	17	09	18	20	9.60·10 <sup>7</sup>	+8.0·10 <sup>-3</sup>	-1.1·10 <sup>-2</sup>	1.0·10 <sup>-2</sup>
	24/25- -12-1982	17	16	17	59	9.60·10 <sup>7</sup>	-7.3·10 <sup>-3</sup>	-1.2·10 <sup>-2</sup>	1.0·10 <sup>-2</sup>

Таблица 11 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	25/26- -12-1982	17	21	17	57	$9.60 \cdot 10^7$	$+1.3 \cdot 10^{-2}$	$-1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
α And	23/24- -11-1982	23	39	00	24	$9.00 \cdot 10^7$	$+6.8 \cdot 10^{-4}$	$-1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -11-1982	18	28	19	08	$1.12 \cdot 10^8$	$-2.1 \cdot 10^{-2}$	$+1.8 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$
	25/26- -11-1982	18	43	19	14	$9.60 \cdot 10^7$	$+5.4 \cdot 10^{-3}$	$+4.3 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	26/27- -11-1982	18	11	18	37	$9.60 \cdot 10^7$	$+1.3 \cdot 10^{-2}$	$+6.9 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	27/28- -11-1982	17	53	18	21	$9.60 \cdot 10^7$	$+5.6 \cdot 10^{-3}$	$+7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	23/24- -12-1982	19	05	19	59	$9.60 \cdot 10^7$	$-7.5 \cdot 10^{-4}$	$-3.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -12-1982	18	15	19	09	$9.60 \cdot 10^7$	$+1.2 \cdot 10^{-2}$	$-2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	25/26- -12-1982	18	01	19	03	$9.60 \cdot 10^7$	$-3.2 \cdot 10^{-3}$	$-1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	23/24- -11-1982	01	35	04	38	$1.60 \cdot 10^7$	$-5.5 \cdot 10^{-2}$	$+1.8 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -11-1982	00	22	04	29	$2.56 \cdot 10^7$	$+4.7 \cdot 10^{-3}$	$+2.0 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$
56 Tau HD 27309	25/26- -11-1982	23	15	04	06	$4.80 \cdot 10^7$	$-2.1 \cdot 10^{-2}$	$+1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	26/27- -11-1982	21	57	04	05	$6.72 \cdot 10^7$	$-4.6 \cdot 10^{-3}$	$+9.0 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
	27/28- -11-1982	21	19	03	42	$5.12 \cdot 10^7$	$+5.9 \cdot 10^{-3}$	$+1.6 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	23/24- -12-1982	20	52	02	31	$5.76 \cdot 10^7$	$-5.3 \cdot 10^{-3}$	$+1.9 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -12-1982	20	35	01	46	$4.80 \cdot 10^7$	$+5.4 \cdot 10^{-3}$	$-1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	25/26- -12-1982	19	51	01	05	$4.32 \cdot 10^7$	$-3.0 \cdot 10^{-2}$	$-1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$
	1/2- -03-1983	20	59	22	40	$1.60 \cdot 10^7$	$-1.2 \cdot 10^{-2}$	$-1.4 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$
	17/18- -10-1983	02	33	05	24	$5.20 \cdot 10^7$	$+6.0 \cdot 10^{-3}$	-	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	25/26- -11-1983	03	04	04	38	-	$+2.1 \cdot 10^{-2}$	-	$2.2 \cdot 10^{-2}$
	23/24- -11-1982	04	45	06	13	$1.28 \cdot 10^8$	$+6.7 \cdot 10^{-3}$	$+6.6 \cdot 10^{-3}$	$8.8 \cdot 10^{-3}$
24/25- -11-1982	04	38	05	06	$9.60 \cdot 10^6$	$+1.3 \cdot 10^{-2}$	$+7.0 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	

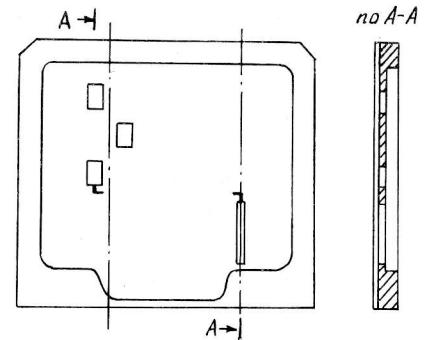
Таблица 11 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ Gem	25/26- -11-1982	04	13	04	37	$4.80 \cdot 10^7$	$+4.0 \cdot 10^{-3}$	$+1.6 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
	26/27- -11-1982	04	28	04	55	$9.60 \cdot 10^7$	$+1.1 \cdot 10^{-2}$	$-7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	27/28 -11-1982	04	35	05	42	$1.12 \cdot 10^8$	$+3.5 \cdot 10^{-3}$	$-5.9 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$
	23/24- -12-1982	02	55	04	20	$9.60 \cdot 10^7$	$-1.2 \cdot 10^{-2}$	$+3.9 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -12-1982	02	30	03	35	$9.60 \cdot 10^7$	$+4.7 \cdot 10^{-3}$	$-2.6 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
1/2- -03-1983	22	48	00	07	$1.04 \cdot 10^8$	$+1.4 \cdot 10^{-2}$	$+2.9 \cdot 10^{-2}$	$9.8 \cdot 10^{-3}$	
α <sup>2</sup> CVn	26/27- -11-1982	05	13	06	25	$1.28 \cdot 10^8$	$+9.5 \cdot 10^{-4}$	$+5.0 \cdot 10^{-3}$	$8.8 \cdot 10^{-2}$
	23/24- -12-1982	04	46	05	12	$4.00 \cdot 10^7$	$-9.7 \cdot 10^{-3}$	$+1.7 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$
	24/25- -12-1982	04	21	06	41	$9.60 \cdot 10^7$	$-2.1 \cdot 10^{-3}$	$-1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
HD192163	22/23- -09-1983	03	00	04	10	-	$+5.3 \cdot 10^{-2}$	-	$7.9 \cdot 10^{-2}$
	16/17- -10-1983	21	00	23	40	-	$-1.4 \cdot 10^{-1}$	-	$3.9 \cdot 10^{-2}$
	17/18- -10-1983	20	00	23	00	-	$+4.2 \cdot 10^{-2}$	-	$3.4 \cdot 10^{-2}$
	18/19- -10-1983	19	30	01	00	-	$+4.2 \cdot 10^{-2}$	-	$2.8 \cdot 10^{-2}$
	25/26- -11-1983	20	50	21	50	-	$-9.1 \cdot 10^{-2}$	-	$8.8 \cdot 10^{-2}$
	26/27- -11-1983	19	00	19	30	-	$-1.2 \cdot 10^{-1}$	-	$1.1 \cdot 10^{-1}$
	19/20- -07-1984	04	15	05	00	-	$+4.5 \cdot 10^{-2}$	-	$1.2 \cdot 10^{-2}$

Измерения выполнялись по методике, применяемой для наблюдений магнитных полей. Для всех звезд, кроме звезды HD 192163, измерения велись в области полосы  $\lambda_0 = 5200 \text{ \AA}$  со щелями  $\Delta\lambda_s = 84 \text{ \AA}$ . На рис. 7 приведены схема расположения щелей на корпусе маски, предназначенной для измерения круговой поляризации в полосе  $\lambda_0 = 5200 \text{ \AA}$ , и "разрез" корпуса маски по линии А-А. На рис. 8 показана схема расположения измерительных щелей относительно центра этой полосы. На схеме положение заштрихованных щелей соответствует измерению, обозначенному  $P_L$ , а пунктирных -  $P_\Pi$ . В табл. 11 приведены значения поляризации  $P_{(L-\Pi)} = (P_L - P_\Pi)/2$  и  $P_{(L+\Pi)} = (P_L + P_\Pi)/2$ . Определялись ошибки измерений  $\sigma_p^-$  и  $s_p^-$ . При определении  $s_p^-$  вместо значений поля  $V_i$  использовались значения поляризации  $P_i$ . Для расчета  $\sigma_p^-$  и  $P_i$  взят коэффициент  $K_B = 100 \%$ . В табл. 11

приведены только значения  $\sigma_p^-$ , так как для представленных результатов измерений  $\sigma_p^- \approx s_p^-$ . На рис. 7 нижняя, реперная щель  $\Delta\lambda_s = 5 \text{ \AA}$ , смещенная относительно измерительных щелей на  $339 \text{ \AA}$ , предназначена для наведения маски на линию  $H_\beta$ . После наведения реперной щели на  $H_\beta$  измерительные щели оказываются в области полосы  $\lambda_0 = 5200 \text{ \AA}$ . Как было показано выше, из положения наведения на линию  $H_\beta$  в положение  $P_d$  и  $P_{II}$  маска переводится механическим переключателем щелей (установка щелей на изображения спектра, обозначенные на рис. 8, как  $P_{+\sigma}$  и  $P_{-\sigma}$ ). Процедура переключения щелей показана на рис. 3.

Рис. 7. Корпус маски со щелями для измерения круговой поляризации в полосе  $\lambda_0 = 5200 \text{ \AA}$ . Слева на корпусе измерительные щели, справа - щель для наведения на линию. Штрих-пунктирная линия справа - центр полосы  $\lambda_0 = 5200 \text{ \AA}$ , слева - центр линии  $H_\beta$ .



Измерение круговой поляризации звезды Вольфа-Райе HD 192163 проводилось в крыльях линии He II  $\lambda_0 = 4686 \text{ \AA}$  по той же методике. Применялись щели  $\Delta\lambda_s = 14 \text{ \AA}$  при таком же расстоянии ( $14 \text{ \AA}$ ) от центра линии до центра щели. Если рассматривать круговую поляризацию в крыльях линии He II звезды HD 192163 как результат воздействия на излучающую среду магнитного поля (возможно влияние на результат измерения круговой поляризации линейно-поляризованной составляющей излучения оболочки звезды), то 16-17/10 1983 г. и 19-20/07 1984 г. у звезды регистрировалось магнитное поле величиной  $\bar{B} = +1960 \text{ Гс}$  при  $\sigma_{\bar{B}} = \pm 550 \text{ Гс}$  и соответственно  $\bar{B} = -630 \text{ Гс}$  при  $\sigma_{\bar{B}} = \pm 170 \text{ Гс}$ . Значение коэффициента  $K_B$  для звезды HD 192163 приведено в табл. 1, а величины поляризации для расчета магнитного поля звезды и ошибки его измерения взяты из табл. 11 и переведены из процентов в относительные единицы.

## 5. НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАГНИТОМЕТРА

Дальнейшее повышение эффективности магнитометра возможно за счет применения, наряду с универсальной оптико-механической схемой, взаимозаменяемых модульных конструкций, ориентированных на решение узкого класса задач. Например, магнитометр, в котором оптические элементы поляризационного тракта объединяются в сменные оптико-механические блоки и используются совместно с модульными конструкциями: а) спектрографа или полихроматора со скрещенной дисперсией и панорамным светоприемником; б) фотометрического устройства со светофильтрами, рассчитанными на широкие спектральные полосы (измерение поляризации в этих полосах); в) монохроматоров, предназначенных для измерения магнитных полей и поляризации по одиночным спектральным линиям.

В случае работы в достаточно узком интервале длин волн или по одной линии

повышение эффективности магнитометра возможно за счет увеличения отражающей способности покрытия дифракционной решетки монохроматора вплоть до превращения ее в узкополосный фильтр, например, - эшелле с выделением рабочего порядка на ее многослойном покрытии.

Концентрация света дифракционными решетками в максимуме рабочего порядка достигает 85-90 %, при этом общие потери света на решетке доходят до 40-50 % и зависят от условий эксплуатации и срока службы. При удачном покрытии количество света, отражаемого решеткой в заданном узком интервале длин волн, будет практически ограничено только ее концентрирующей способностью и коэффициентом отражения покрытия, который для интервала длин волн 100-200 А может составлять 99 %. С увеличением количества слоев покрытия его характеристика становится более крутой, повышается коэффициент отражения в максимуме, а крылья характеристики опускаются. Кроме того, многослойные покрытия могут выполнять роль защитного слоя, так как прочность их, как правило, выше прочности алюминиевого покрытия.

Возможность многослойного покрытия дифракционной решетки обсуждалась автором со специалистами ЛОМО. Принципиально существует возможность нанесения многослойного покрытия на реплику решетки. Но для проверки этой возможности необходима разработка технологического процесса нанесения таких покрытий и проведение экспериментальных работ.

Для измерения магнитных полей по одной спектральной линии, согласно вышесказанному, наиболее эффективна схема магнитометра с монохроматором и специально просветленной оптикой, включая дифракционную решетку с многослойным покрытием.

На рис. 9 приведена схема магнитометра, состоящая из поляриметрического анализатора, автоколлимационного дифракционного монохроматора и фотометрического устройства со светофильтрами. Приведенный вариант магнитометра рассчитан на измерения магнитного поля по линии  $H_{\beta}$  и круговой поляризации непрерывного спектра в окрестности этой линии.

Модуль поляриметрического анализатора состоит из двух блоков: а) блока электрооптического фазового элемента, включающего: отрицательную линзу 1 с просветленной наружной поверхностью, сам фазовый элемент 2 с кольцевыми электродами и защитное стекло 3, также с односторонним просветлением; б) блока поляризационного расщепителя, состоящего из положительной линзы 4 с просветленной наружной поверхностью, кубика исландского шпата 5 и просветленного защитного стекла 6 или четвертьволновой фазовой пластины. При специальном подборе элементов поляриметрического анализатора, способа

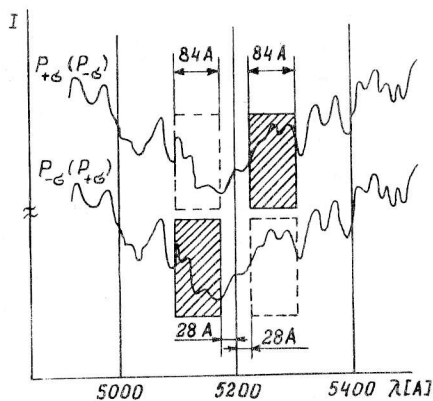


Рис. 8. Схема расположения и переключения щелей относительно лучей  $P_{+\sigma}$  ( $P_{-\sigma}$ ),  $P_{-\sigma}$  ( $P_{+\sigma}$ ) и центра полосы  $\lambda_0 = 5200$  А. Сплошные и заштрихованные щели - "левое" крыло, пунктирные, не заштрихованные - "правое" крыло. Обозначения  $P_{+\sigma}$  и ( $P_{-\sigma}$ ) соответствуют смене полярности  $U_2$  (см. рис. 1).

соединения их в блоки и просветлении с учетом рабочего диапазона длин волн (область линии  $H_{\beta}$ ) светопропускание анализатора может быть доведено до 86 %. Величина пропускания получена из измерений конкретных образцов, характеристик просветляющих покрытий и способов соединения элементов в блоки, например, соединение на оптическом контакте.

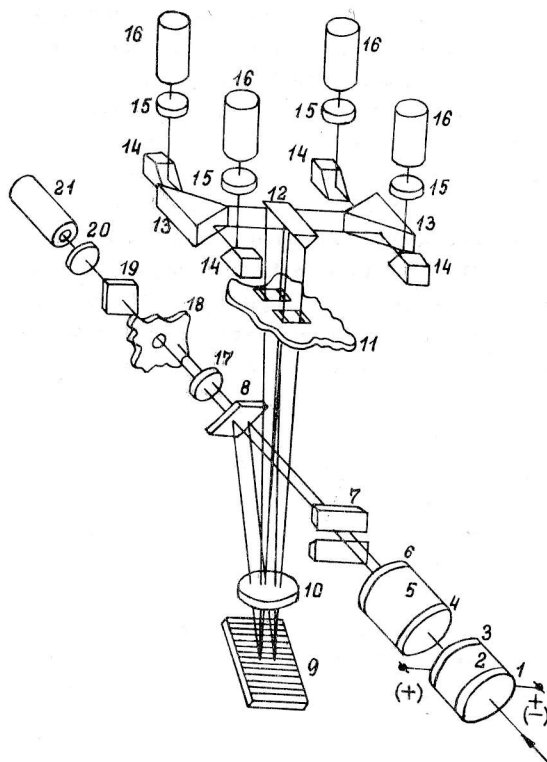


Рис. 9. Оптическая схема магнитометра с монохроматором.  
 1 - отрицательная линза,  
 2 - электрооптический фазовый элемент,  
 3 - защитное стекло,  
 4, 10, 15, 17, 20 - положительные линзы,  
 5 - поляризационный расщепитель,  
 6 - защитное стекло или четвертьволновая пластина,  
 7 - входная щель,  
 8 - спектроделитель,  
 9 - дифракционная решетка,  
 11 - маска с выходными щелями,  
 12, 13, 14 - зеркала,  
 16, 21 - ФЭУ,  
 18 - диафрагма,  
 19 - сменные светофильтры.

Модуль монохроматора состоит из трех узлов: а) узла входной щели 7, включающего также в себя оптический подсмотр щели и водородную лампу спектра сравнения с оптикой (на рис. 9 не показаны); б) самого монохроматора со спектроделителем 8 со специальным покрытием, выполняющим (совместно с многослойным покрытием решетки) роль порядкоразделительного фильтра, дифракционной решетки 9 и положительной линзы 10; в) узла выходных щелей 11 с зеркально-линзовым устройством 12, 13, 14, 15, собирающим свет на фотокатоды четырех ФЭУ 16.

Модуль фотометрического устройства состоит из линзы 17, строящей изображение одного луча на диафрагме 18 (второй луч отсекается), сменного светофильтра 19 и линзы 20, собирающей свет на фотокатод ФЭУ 21.

Светопропускание оптики монохроматора (без учета решетки) и зеркально-линзового устройства, при специальных покрытиях зеркал и просветлении линз для работы в спектральной полосе 100-150 А в области линии  $H_{\beta}$ , оценивается величиной 91 %. Общее светопропускание поляриметрического анализатора и монохроматора с конденсором (магнитометра) - 78 %. Светопропускание существующей оптической схемы магнитометра, также без учета потерь на решетке, для спектральной полосы 600 А (область линий  $H_{\beta}$  и  $H_{\gamma}$ ) -



19 §.

Использование в предлагаемой схеме магнитометра четырех ФЭУ позволит проводить измерения магнитного поля и поляризации отдельно по каждому из крыльев линии первого и второго лучей (см. рис. 9), что особенно важно при наблюдении объектов с развитой оболочкой, двойных систем с перетеканием вещества и т. п. При измерении магнитных полей ярких звезд применение четырех ФЭУ позволит понизить в 4 раза скорость счета каждого ФЭУ по сравнению со схемой магнитометра, в которой используется один ФЭУ. Например, применение магнитометра с четырьмя ФЭУ (рис. 9) и выходными щелями  $\Delta\lambda_s = 10 \text{ \AA}$  для наблюдений звезды  $\epsilon \text{ UMa}$  ( $m = 1.77$ ) позволит получить скорость счета  $N_s = 1.19 \cdot 10^7$  и/с для каждого ФЭУ. Скорость счета определена по формуле (17) с учетом параметров  $\Delta\lambda_{1/2}$  и  $R_0$  спектральной линии  $H_\beta$  этой звезды, приведенных в табл. 1. В случае реализации регистрирующего тракта магнитометра, позволяющего работать с такими скоростями счета, расчетная ошибка измерения магнитного поля звезды  $\epsilon \text{ UMa}$  за 1 ч наблюдений на БТА составит 5.5 Гс. Расчет ошибки проведен по формуле (12) по сумме потоков четырех ФЭУ при  $K_B = 23 \cdot 10^5$  Гс, взятых из табл. 1. Условно квантовая эффективность всех четырех ФЭУ принята одинаковой и равной эффективности ФЭУ, работающего в реальной схеме магнитометра.

В табл. 12 приведены оценки ошибок измерения магнитного поля на магнитометре с монохроматором, по линии  $H_\beta$  с параметрами  $\Delta\lambda_{1/2} = 20 \text{ \AA}$ ,  $R_0 = 0.5$ . Расчет ошибок проводился по формуле (12) по сумме потоков четырех ФЭУ. Оценки получены из относительного сравнения предлагаемой (с монохроматором) и существующей схем магнитометра без учета потерь на решетках.

Таблица 12. Оценки ошибок измерения магнитного поля за 1 час наблюдений на БТА звезд 0-17 величины на магнитометре с монохроматором и четырьмя ФЭУ и оценка скорости счета  $N_s$  для одного ФЭУ (для линии  $H_\beta$ )

m	0	5	7	10	12	15	17
$\sigma_B$ [Гс]	3	30	70	300	700	3000	7000
$N_s$ [и/с]	$6.2 \cdot 10^7$	$6.2 \cdot 10^5$	$9.8 \cdot 10^4$	$6.2 \cdot 10^3$	980	62	9.8

Из табл. 12 следует, что измерения магнитных полей звезд слабее  $m = 17$  практически невозможно из-за плохого отношения сигнал/шум (малые скорости счета для каждого из четырех ФЭУ). Улучшение отношения сигнал/шум возможно за счет применения двух ФЭУ вместо четырех, что позволит получить для звезд с  $m = 18$  скорость счета 7.8 и/с. При специальном подборе ФЭУ и эффективном их термостатировании, по-видимому, возможно измерение магнитных полей звезд с  $m = 19$ , что близко к предельным возможностям 6-м телескопа.

Следует учитывать, что при использовании двух ФЭУ магнитные поля могут измеряться только по спектральной линии с симметричным профилем, в противном случае возможны дополнительные систематические ошибки.

Если для измерений магнитного поля можно использовать несколько спектральных линий (например, водородные линии Ар-звезд, белых карликов и т. д.), то наряду с магнитометром, выполненным на основе полихроматора с

разделением порядков, может быть предложена схема магнитометра, состоящего из нескольких последовательно соединенных модульных монохроматоров, каждый из которых предназначен для измерения поля по одной линии, а последний - фотометрический модуль - для измерения круговой поляризации в широких полосах непрерывного спектра.

При умеренных дисперсиях размер одного модуля-монохроматора (по оптическому лучу, проходящему через спектроделители) не будет превышать 150 мм. Практическое применение схемы возможно только при использовании в ней высококачественных спектроделителей с максимально возможным пропусканием и отражением (пропускание не менее 90 %) и такого же ахроматического электрооптического фазового элемента. Ахроматический элемент необходим также для магнитометра, выполненного на полихроматоре с разделением порядков.

В заключение автор выражает признательность С. Н. Фабрике, И. И. Романюку, В. Е. Панчуку, Н. А. Тихонову и А. А. Панферову за полезные обсуждения работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бочкарев Н. Г.: 1984, *Письма в астрон. ж.*, 10, 8, с. 574.
- Бычков и др. (Bychkov V. D., Glagolevskij V. Yu., Elkin V. G., Kopylova F. G., Najdenov I. D., Romanyuk I. I., Chunakova N. M., Shtol' V. G.): 1989, *Prepr. SAO*, № 29.
- Вольстенкрофт и др. (Wolstencroft R. D., Cormack W. A., Campbell J. U., Smith P. J.): 1984, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 205, p.23.
- Герт (Gerth E.): 1988, *"Magnetic stars"*, L.: Nauka, p. 78.
- Глаголевский Ю. В., Бычков В. Г., Илиев И. Х., Найденов И. Д., Романюк И. И., Штоль В. Г., Чунтонов Г. А., : 1982, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 15, с.14.
- Глаголевский Ю. В., Бычков В. Д., Романюк И. И., Чунакова Н. М.: 1985, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 19, с.28.
- Глаголевский Ю. В., Романюк И. И., Чунакова Н. М., Штоль В. Г.: 1986, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 23, с.37.
- Глаголевский и др. (Glagolevskij V. V., Elkin V. G., Romanyuk I.I., Shtol' V. G.): 1988, *"Magnetic stars"*, L.: Nauka, p.22.
- Глаголевский Ю. В., Романюк И. И., Найденов И. Д., Штоль В. Г.: 1989, *Астрофиз.исслед. (Изв.САО)*, 27, с.34.
- Долинский Е. Ф.: 1971, *Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов*. М.: Изд-во стандартов, с.3.
- Илиев и др. (Iliev I.Kh., Barzova I. S., Glagolevskij Yu. V., Bychkov V. D., Elkin V. G., Romanyuk I. I., Shtol' V. G.): 1988, *"Magnetic stars"*, L.: Nauka, p. 87.
- Мальшев В. И.: 1979, *Введение в экспериментальную спектроскопию*. М.: Наука, с.87.
- Методы астрономии: 1967, . Под ред. В. А. Хильтнера, М.: Мир, с.100.
- Микулашек З., Глаголевский Ю. В., Романюк И. М., Штоль В. Г., Бычков В. Д.: 1984, *"Магнитные звезды"*, Саласпилс, с.13.
- Микулашек (Mikulasek Z.): 1988, *"Magnetic stars"*, L.: Nauka, p.67.

Райт и др., (Wright K. O., Lee E. K., Jacoson J. L., Greenstein J. L.) : 1964,  
*Publ. Dominion Astrophys. Obs., Victoria, XII, p.173.*

Румшинский Л. З. : 1971, *Математическая обработка результатов эксперимента.*  
М. : Наука, с.16.

Штоль В. Г. : 1984, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 17, с. 139.*

Штоль В. Г., Бычков В. Д., Викульев Н. А., Георгиев О. Ю.,  
Глаголевский Ю. В., Драбек С. В., Найденов И. Д., Романюк И. И. : 1985,  
*Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 19, с.66.*

Поступила в редакцию

22 января 1990 г.