

ПРОГРАММА MAGREG ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗД ПО СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

И.С.САВАНОВ

Поступила 9 ноября 2018

Принята к печати 18 декабря 2019

С целью определения величины продольной компоненты магнитного поля звезд B_z создана вычислительная программа magreg, написанная на языке IDL. Работа программы тестировалась по наблюдениям ряда объектов, выполненных в CAO РАН на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа CAO. На примере хорошо изученной магнитной звезды γ Eri выполнен детальный анализ наблюдательных данных, зарегистрированных для этого объекта 29.08.2015г. Полученные результаты сопоставлены с литературными источниками. Наша дальнейшая задача состоит в анализе всего наблюдательного массива данных спектрополяриметрических наблюдений γ Eri с 6-м телескопом CAO РАН с целью получения наиболее однородного набора оценок параметра B_z .

Ключевые слова: *звезды: спектрополяриметрия: магнитные поля: переменность: пятна*

1. *Введение.* На протяжении последних десятилетий измерение и мониторинг изменений магнитного поля химически пекулярных звезд верхней части Главной последовательности остаются актуальными задачами астрофизики. Важную роль в этих исследованиях играют спектрополяриметрические наблюдения. Для определения величины продольной компоненты магнитного поля B_z наиболее часто применяется методика, предложенная автором в [1]. Результаты ее подробного обсуждения можно найти в [2], а также в [3] при анализе данных каталога спектрополяриметрических наблюдений с FORS1 на телескопе VLT. Согласно этой методике [1,2], величина продольной компоненты магнитного поля определяется при ряде предположений - например, о слабом магнитном поле объекта (как правило, менее 10 кГс). Кроме того, считается, что выполняется условие о том, что уширение профилей спектральных линий носит инструментальный характер. При этом также предполагается отсутствие значительного уширения вследствие вращения. Эти требования должны заведомо выполняться для изучаемых объектов.

2. *Определение величины B_z .* Величина продольной компоненты

магнитного поля B_z определяется по отношению параметров Стокса V/I (см. в [2]) из уравнения

$$\frac{V}{I} = -g_{eff} \frac{e}{4\pi m_e c^2} \lambda^2 \frac{1}{I_\lambda} \frac{dI}{d\lambda} B_z, \quad (1)$$

где g_{eff} - эффективный фактор Ланде, λ - длина волны в Å.

В [1] было показано, что при спектрополяриметрических измерениях, основанных на изучении линий водорода или гелия, хорошо обоснованным является выбор величины g_{eff} , близкий к единице. Кроме того, значение $g_{eff} = 1.2$, согласно [2], служит хорошим приближением для спектров Ар-звезд. Как и в [2-5], определение B_z в рамках нашего исследования было выполнено методом регрессионного анализа. Метод позволяет получить одновременно оценки ошибок параметров регрессии и, следовательно, погрешность B_z . Указанные публикации содержат формулы для оценки величины погрешности B_z , а также обсуждение того, стоит ли вводить дополнительное увеличение величины погрешности B_z , (см формулу (11) в [4]).

3. Вычислительная программа. Созданная нами вычислительная программа определения величины B_z *magreg* написана на языке IDL и позволяет использовать многочисленные внутренние программные средства для определения погрешностей при решении задач регрессионного анализа. Кроме того, возможно применение программ библиотек <https://idlastro.gsfc.nasa.gov>, <http://www.idlcoyote.com>.

Проведенные вычисления показали хорошее согласие между результатами оценок параметров уравнения (1) и их погрешностей, полученных с применением различных подпрограмм. Окончательный выбор был сделан в пользу стандартных программ IDL и решения задачи с использованием уравнений из [2]. Помимо удаления выбросов (значений, превышающих 3σ), наша программа также допускает получение усеченной оценки параметров задачи регрессионного анализа (*clipping algorithms* - см. в [3]). В частности, наибольшее внимание мы уделили возможности проведения дополнительной оценки B_z в предположении об ограничении изменений аргументов зависимости регрессионного анализа. Для увеличения устойчивости регрессионного анализа по отношению к граничным (расположенным на краях) значениям аргумента, мы проводили ограничения изменений аргументов зависимости регрессионного анализа величины $Cx = g_{eff} \frac{e}{4\pi m_e c^2} \lambda^2 \frac{1}{I_\lambda} \frac{dI}{d\lambda}$. Вместе с основным решением вычислительная программа выдает соответствующее "ограниченное" решение.

В качестве исходных данных при использовании нашей программы могут рассматриваться результаты спектральных наблюдений в различных интервалах длин волн - как выделенные из полного спектра определенные участки, так

и объединение нескольких участков. Необходимость такой опции при проведении оценок величины B_z рассмотрена в [5]. В частности, эта опция позволяет определять магнитное поле только по линиям водорода, или только по участкам, содержащим линии металлов (без водородных линий), или только по индивидуальным линиям и проч. (см. ниже).

4. Тестирование программы. Работа программы проверялась при применении к наблюдениям ряда объектов, выполненных в CAO РАН на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа CAO РАН. При таких наблюдениях был использован анализатор круговой поляризации в сочетании с поворотной пластинкой $\lambda/4$ [6]. Спектральное разрешение составляло $R=15000$. Применялась ПЗС-матрица размером 2000×2000 элементов. Полученный материал чаще всего охватывал спектральный диапазон $4380\text{--}4950 \text{ \AA}$. Обработка данных проводилась стандартным методом в системе MIDAS с пакетом программ ZEEMAN [7]. Первичная обработка включала в себя построение и последующее вычитание из всех рабочих снимков усредненного кадра подложки (bias), калибровку по длинам волн с использованием спектра ThAr-лампы, экстракцию одномерного спектра и его нормировку на континуум.

В первую очередь для тестирования наша программа была применена к наблюдениям звезд - стандартов, не обладающих магнитным полем. Так, например, по указанной выше методике для звезды с нулевым общим магнитным полем HD 210762 измеренная нами величина продольной компоненты магнитного поля B_z составила -12 ± 9 Гс.

Многие программы поляриметрических наблюдений в CAO РАН включают хорошо изученную магнитную звезду γ Equ, для которой опубликованы многочисленные измерения продольной компоненты ее магнитного поля (см., например, [8,9]). Как правило, измерения B_z γ Equ в CAO РАН проводятся с целью калибровки и проверки работы поляриметрического инструмента.

Для более детального анализа мы рассмотрели наблюдательные данные, зарегистрированные для γ Equ 29.08.2015г. на 6-м телескопе CAO РАН. Спектральный материал был получен в диапазоне длин волн $4380\text{--}4950 \text{ \AA}$, его первичная обработка была проведена по указанной выше стандартной процедуре.

В табл.1 приведены основные результаты определений величины продольной

Таблица 1

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ ПРОДОЛЬНОЙ
КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ B_z (Гс) γ Equ**

Спектр. диапазон	4380-4950 А	4861 ± 60 А	4380- 4800 А
Полная величина	-492 ± 9	-345 ± 28	-506 ± 11
Усеченная оценка	-681 ± 30	-568 ± 91	-568 ± 91

компоненты магнитного поля B_z γ Eqr. Анализ проводился для 3-х спектральных диапазонов: а) полного - 4380-4950 Å ; б) содержащего линию водорода H (ядро и крылья) - 4861 ± 60 Å и в) спектрального диапазона, включающего линии металлов (4380-4800 Å). Для каждого диапазона приведены два решения - по всему диапазону параметров C_x и усеченная оценка C_x (диапазон $\pm 3 \cdot 10^{-6}$) (рис.1).

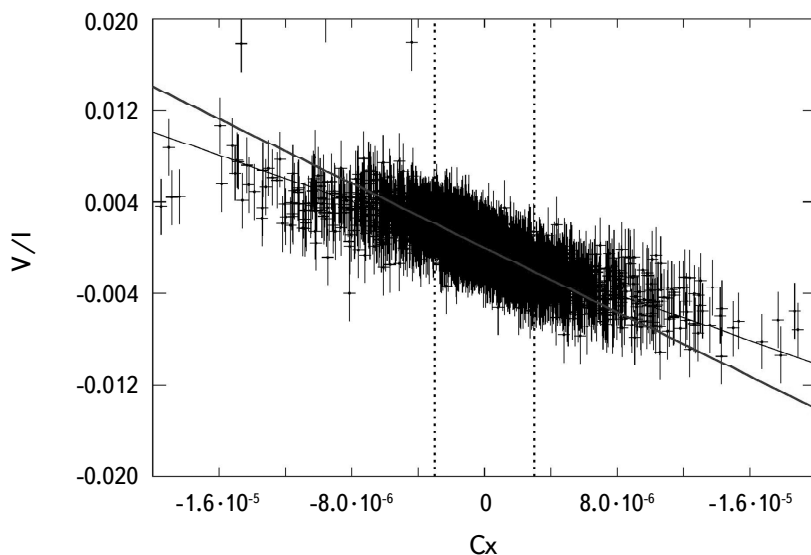


Рис.1. Результаты определения величины продольной компоненты магнитного поля B_z γ Eqr, полученные методом регрессионного анализа для полного спектрального диапазона - 4380-4950 Å . Наклон регрессионных линий пропорционален величине B_z . Тонкая сплошная линия соответствует решению для всех данных, толстая сплошная - усеченному решению (см. текст). Усеченное решение получено по набору C_x в диапазоне $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ (вертикальные штриховые линии). Отскакивающие точки (выбросы значений, превышающие 3σ , приведенные на графике) при нахождении решения исключались.

Данные табл.1 позволяют сделать следующие заключения. Во-первых, наибольшее (по модулю) значение величины продольной компоненты магнитного поля B_z для γ Eqr достигается при анализе данных из спектрального диапазона, включающего линии металлов, а наименьшее - по диапазону, содержащему линию водорода. Как и следовало ожидать, параметр B_z , установленный по всему диапазону (с линиями металлов и с линией водорода), имеет величину, лежащую в промежутке между этими значениями. Во-вторых, усеченная оценка (третья строка таблицы) дает большее (по модулю) значение величины B_z . Различия могут составлять 40-60%.

Различия в величинах продольной компоненты магнитного поля B_z , определяемых по линиям металлов и линиям водорода, ранее уже рассматривались в литературе [10,11]. Они были установлены, как в случаях измерений

B_z по индивидуальным линиям [10], так и при нахождении методом регрессии [11].

Так, например, в [10] измерения компоненты магнитного поля B_z γ Eqr по линиям металлов составили -1140 Гс, в то время как по линиям водорода -390 Гс, почти в три раза меньшую величину. Столь высокие различия (по сравнению с установленными нами), по-видимому, обусловлены проведением измерений только по ядру водородной линии, а не по всему профилю с крыльями.

Введенная в [10] величина H/M (отношение величин магнитного поля по линиям водорода и по линиям металлов), согласно этому исследованию для γ Eqr составляет 0.34 ± 0.03 . Наблюдения были получены в интервале времени HJD 2454521-2455077. Для другого объекта (HD178892), рассмотренного в [10], H/M составило величину -0.62 ± 0.08 .

Работа [11] содержит результаты определения величины продольной компоненты магнитного поля для ряда магнитных Ap/Bp звезд с помощью прибора ISIS на телескопе WHT (табл.1 в [11]). Указанные 10 измерений B_z для γ Eqr были выполнены в конце августа (29-31.08.2015г.) при различных оптических конфигурациях, с различными дифракционными решетками и прочее. Полученная величина H/M составила в среднем 0.76 ± 0.14 . Эти наблюдения были выполнены практически одновременно с нашими на БТА (HJD 2457263), при этом найденная нами величина H/M оказалась равной 0.8 и практически совпала с измерениями [11].

Возможность влияния запятненности поверхности химически пекулярных звезд на различия в величинах продольной компоненты магнитного поля B_z , определяемых по линиям металлов (в пятнах) и линиям водорода (равномерное распределение по поверхности звезды), обсуждается в [10]. Вероятно, данное обстоятельство и является причиной систематических различий в измерениях B_z .

5. Заключение. Для нахождения величины продольной компоненты магнитного поля B_z создана вычислительная программа *magreg*, написанная на языке IDL. Работа программы проверялась при применении к наблюдениям ряда объектов, выполненных в CAO РАН на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа CAO, в первую очередь - к наблюдениям звезд - стандартов, не обладающих магнитным полем. В качестве примера выполнен детальный анализ наблюдательных данных за 29.08.2015г. для хорошо изученной магнитной звезды γ Eqr (измерения B_z которой в CAO РАН проводятся с целью калибровки и проверки работы поляриметрического инструмента) с известными многочисленными измерениями продольной компоненты магнитного поля. Показано, что наибольшее по модулю значение величины продольной компоненты магнитного поля B_z для γ Eqr достигается при анализе

данных из спектрального диапазона, включающего линии металлов, а наименьшее - по диапазону, содержащему линию водорода. Усеченная оценка величины продольной компоненты магнитного поля B_z дает большее (по модулю) значение, чем оценка основного решения. Наши заключения хорошо согласуются с приводимыми в других литературных источниках.

В дальнейшем мы планируем применить разработанную нами программу для анализа всего наблюдательного массива данных спектрополяриметрических наблюдений γ Equ с целью получения наиболее однородного набора оценок параметра B_z (см. в [12]).

Помимо этого, программа *magreg* найдет применение при продолжении исследований изменений продольной компоненты магнитного поля у быстро-вращающегося одиночного хромосферно-активного гиганта FK Com [13,14] и получении оценок параметра B_z ряда sdB-sdO субкарликов (см. в [15,16]).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект N 18-12-00423).

Институт астрономии Российской академии наук, Москва,
Россия, e-mail: igs231@mail.ru

MAGREG PROGRAM FOR THE DETERMINATION OF THE LONGITUDINAL COMPONENT OF THE STELLAR MAGNETIC FIELD FROM SPECTROPOLARIMETRIC OBSERVATIONS

I.S.SAVANOV

In order to determine the value of the longitudinal component of the stars magnetic field B_z a computational program *magreg* written in the IDL language was created. Program was tested using the observations of objects performed at the SAO RAS with the Main Stellar Spectrograph of the 6-meter SAO RAS telescope. Using the well-studied magnetic star γ Equ as example a detailed analysis of its observational data registrated on August 29, 2015 is made. The obtained results are compared with literary sources. Our further task is to analyze the entire observational dataset of the spectropolarimetric observations γ Equ performed on 6-meter telescope of SAO RAS with the aim of obtaining the most uniform set of estimates of the B_z parameter.

Keywords: *stars: spectropolarimetry: magnetic fields: variability: spots*

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.Landsteet*, *Astrophys. J.*, **258**, 639, 1982.
2. *S.Bagnulo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **389**, 191, 2002.
3. *S.Bagnulo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **583**, A115, 2015.
4. *S.Bagnulo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **538**, A129, 2012.
5. *C.Scalia et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **472**, 3554, 2017.
6. *G.A.Chountonov*, in: *Magnetic stars*, *Proc. Intern. Conf., Spec. Astrophys. Observ.*, Russia, August 27-31, 2003, eds Yu.Glagolevskij, D.Kudryavtsev, I.Romanyuk (Nizhnij Arkhyz: SAO RAS, 2004), p.286.
7. *D.O.Kudryavtsev*, *Baltic Astron.*, **9**, 649, 2000.
8. *V.D.Bychkov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **455**, 2567, 2016.
9. *I.S.Savanov et al.*, *Astron. Bull.*, **73**, 463, 2018.
10. *D.O.Kudryavtsev, I.I.Romanyuk*, *Astron. Nachr.*, **333**, 41, 2012.
11. *S.Bagnulo, J.D.Landstreet*, *Astron. Astrophys.*, **618**, 113, 2018.
12. *I.S.Savanov et al.*, *Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars*, *Proc. of the international conference June 3-7, 2013*, M.V.Lomonosov State University, Moscow, Russia. Eds.: G.Mathys, E.Griffin, O.Kochukhov, R.Monier, G.Wahlgren, Moscow: Publishing house "Pero", 2014, p.386.
13. *V.B.Puzin et al.*, *Astron. Bull.*, **69**, 321, 2014.
14. *V.B.Puzin et al.*, *Astron. Bull.*, **71**, 189, 2016.
15. *I.S.Savanov et al.*, *Astron. Rep.*, **55**, 111, 2011.
16. *I.S.Savanov et al.*, *Astron. Rep.*, **57**, 751, 2013.