

## НОВЫЙ ПОДХОД К МНОГОВОЛНОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА КАК ЗВЕЗДЫ

<sup>1,3,a</sup> С. Плачинда, <sup>2</sup> М. Демидов, <sup>1,3</sup> В. Бутковская, <sup>2</sup> В. Логвинов

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

theretryfrostnova@gmail.com

<sup>3</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

<sup>a</sup>psi1951@yahoo.com

## A NEW APPROACH TO MULTIWAVELENGTH OBSERVATIONS OF THE SUN-AS-A-STAR MAGNETIC FIELD

<sup>1,3,a</sup> S. Plachinda, <sup>2</sup> M. Demidov, <sup>1,3</sup> V. Butkovskaya, <sup>2</sup> V. Logvinov

<sup>1</sup>Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia

<sup>2</sup>Institute Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

theretryfrostnova@gmail.com

<sup>3</sup>Main Astronomical Observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>a</sup>psi1951@yahoo.com

**Аннотация.** Мы применили метод центра тяжести, разработанный в Крымской астрофизической обсерватории для измерений магнитных полей звезд и расчета общего магнитного поля (ОМП)  $B_1$  Солнца как звезды по спектрополяриметрическим наблюдениям, полученным в Саянской солнечной обсерватории (ССО) 28 июня 2015 г. Для контроля правильности измерений рассчитывалось тестовое магнитное поле  $B_{\text{null}}$ , которое при отсутствии инструментальных артефактов должно быть статистически незначимым. В наблюдениях ССО  $B_{\text{null}}=0$  в пределах среднеквадратичной ошибки. Магнитное поле, рассчитанное по линии FeI 525.02 нм ( $B_1=0.17\pm 0.01$  Гс), хорошо согласуется с измерениями Солнечной обсерватории им. Уилкокса (WSO) для линии FeI 525.02:  $B_1=0.20\pm 0.05$  Гс для той же даты. Мы обнаружили, что магнитное поле, измеренное в ССО по разным спектральным линиям, статистически значимо различается, а также нашли указание на зависимость продольного магнитного поля от эффективной глубины формирования спектральной линии. Получено, что V-профили Стокса асимметричны и отношение  $B_{1,525.02}/B_{1,\text{sp.line}}$  колеблется от 0.4 до 1.5, где  $B_{1,\text{sp.line}}$  — напряженность ОМП, рассчитанная по разным спектральным линиям. Результаты показывают, что ОМП Солнца на дату наблюдений неравномерно не только по поверхности, но и по глубине в фотосфере.

**Ключевые слова:** Солнце, магнитное поле, магнитометр, V-профили Стокса, ОМП.

**Abstract.** We applied the center-of-gravity method developed at the Crimean Astrophysical Observatory to measure the magnetic field of stars to calculate the general magnetic field (GMF)  $B_1$  of the Sun as a star from spectropolarimetric observations obtained at the Sayan Solar Observatory (SSO) on June 28, 2015. To control the correctness of the measurements, the test magnetic field  $B_{\text{null}}$  was calculated, which in the absence of instrumental artifacts should be statistically insignificant. In the SSO observations,  $B_{\text{null}}=0$  within the mean square error. The magnetic field calculated from the line FeI 525.02 nm  $B_1=0.17\pm 0.01$  G agrees well with the measurement of the Wilcox Solar Observatory (WSO) magnetometer for the line FeI 525.02:  $B_1=0.20\pm 0.05$  G on the same date. We have found that the magnetic field measured from different spectral lines differs statistically significantly, and we have also found an indication of the dependence between the longitudinal magnetic field and the effective depth of formation of the spectral line. The Stokes V-profiles are asymmetric, and the ratio  $B_{1,525.02}/B_{1,\text{sp.line}}$  ranges from 0.4 to 1.5, where  $B_{1,\text{sp.line}}$  is GMF calculated using different spectral lines. The results show that GMF of the Sun as a star on the date of observations is nonuniform not only over the surface, but also with depth in the photosphere.

**Keywords:** GMF, magnetic field, magnetometer, Stokes V-profiles, Sun.

## ВВЕДЕНИЕ

Основным критерием потенциальной обитаемости экзопланеты является ее нахождение в зоне обитаемости родительской звезды. Второй важный критерий — низкая магнитная активность родительской звезды. По аналогии с Солнцем возможная экстремальная активность звезд с конвективными оболочками может быть оценена по информации о характеристиках крупномасштабных магнитных полей и локальных магнитных полей (магнитных трубок). Солнце является основным источником наших знаний о звездной физике и естественной лабораторией для изучения магнетизма и связанных с ним явлений на других звездах. Изучение неоднородности магнитного поля Солнца как звезды и проявлений этой неоднородности в наблюдательных данных способствует совершенствованию методов изучения геометрии и неоднородности магнитных полей звезд.

Мы рассчитали ОМП Солнца по стоксометрическим наблюдениям, полученным на солнечном телескопе оперативных прогнозов (СТОП) в ССО [Demidov et al., 2002], и сравнили магнитное поле, измеренное по линии FeI 525.02 нм, с магнитографическими наблюдениями WSO. СТОП предназначен для измерения магнитного поля Солнца как звезды и слабых крупномасштабных магнитных полей (КМП) по всему диску одновременно в нескольких спектральных линиях. В работе [Demidov et al., 2002] показано достаточно хорошее совпадение V-профилей Стокса ОМП Солнца как звезды и V-профилей, рассчитанных посредством интегрирования КМП по поверхности Солнца.

Для поиска проявления очень тонких (порядка килогаусс) магнитных силовых трубок в спокойных областях (см., например, [Balthasar, Demidov, 2012; Demidov, Balthasar, 2009, 2012]) мы рассчитали маг-

Таблица 1

ОМП Солнца как звезды, зарегистрированное 28 июня 2015 г.

Элемент	Длина волны	Фактор Ланде $g$	$B_1$	$\sigma_B$	$B_{\text{null}}$	$\sigma_{\text{null}}$
FeI	524.70	1.99	0.111	0.016	-0.018	0.019
CrI	524.75	2.51	0.268	0.012	0.002	0.013
FeI	525.02	3.00	0.172	0.011	0.004	0.020
FeI	524.06	1.50	0.315	0.023	0.015	0.039
FeI	524.34	1.51	0.390	0.023	0.014	0.046

нитное поле по отдельным спектральным линиям и проверили, есть ли статистически значимые различия между полученными значениями. Поскольку имеются данные о наличии крупномасштабных структур поверхностного магнитного поля, а также о его неоднородности по глубине, мы исследовали также зависимость магнитного поля от эффективной глубины формирования спектральных линий.

**МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Высокоточные спектрополяриметрические наблюдения проводились в ССО на СТОП, оснащенный линейной ПЗС-матрицей. Параметры Стокса I и V (рис. 1) пяти спектральных линий вблизи известной линии FeI 525.02 нм рассчитаны методом центра тяжести, используемым в КрАО для измерений магнитных полей звезд. Поляризованные спектры, записанные ПЗС-линейкой, не корректируются на плоское поле, поскольку  $\Delta\lambda \ll \Delta\lambda_{\text{pix}}$ .

Расчет продольного магнитного поля по отдельным спектральным линиям или их участкам проводится по формуле для центра тяжести (см., например, [Butkovskaya, Plachinda, 2007])

$$B_1 = \frac{714.53 \cdot 10^4}{g\lambda} \left\{ \left( \frac{\int \Delta v (r^*(v) - r(v)) dv}{\int \Delta (r^*(v) - r(v)) dv} \right)_1 - \left( \frac{\int \Delta v (r^*(v) - r(v)) dv}{\int \Delta (r^*(v) - r(v)) dv} \right)_2 \right\}, \quad (1)$$

где  $\Delta v$  — расщепление энергетических уровней атома в магнитном поле (км/с);  $g$  — фактор Ланде;  $\lambda$  — длина волны центра тяжести спектральной линии (Å);  $(r^*(v))$  — функция отсечки поляризованного профиля от континуума;  $(v)$  — функция поляризованного профиля. Индексы 1 и 2 — порядковые номера экспозиций, используемых для расчетов при ортогональных состояниях анализатора поляризации.

Значения ОМП Солнца, рассчитанные на дату 28 июня 2015 г. по пяти спектральным линиям, центральные остаточные интенсивности которых не превышают 0.5, даны в табл. 1. В первых трех столбцах указаны химический элемент, длина волны и фактор

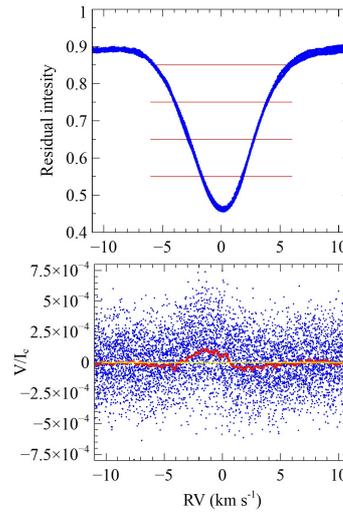


Рис. 1. Наблюдаемые профили FeI с левой и правой круговой поляризацией  $\lambda$  525.02 нм (вверху); итоговый V-профиль Стокса (внизу)

Ланде для используемых спектральных линий. В следующих четырех столбцах для каждой спектральной линии даны продольное магнитное поле  $B_1$  и его ошибка  $\sigma_B$ , а также тестовое поле  $B_{\text{null}}$  и его ошибка  $\sigma_{\text{null}}$ . Видно, что магнитное поле, измеренное по разным спектральным линиям, различается статистически значимо. На нижней панели рис. 1 показаны асимметричные V-образные профили Стокса.

Следует отметить, что магнитное поле, рассчитанное для линии FeI 525.02 нм ( $B_1=0.17 \pm 0.01$  Гс), хорошо согласуется с данными измерений магнитометра для линии FeI 525.02:  $B_1=0.20 \pm 0.05$  Гс, опубликованными WSO на тот же день.

Таблица 2

Отношения ОМП Солнца, рассчитанные по различным спектральным линиям

$B_{1, 525.02}/B_{1, \text{sp. line}}$	Ratio
$B_{1, 525.02}/B_{1, 524.70}$	1.5
$B_{1, 525.02}/B_{1, 524.75}$	0.6
$B_{1, 525.02}/B_{1, 525.06}$	0.5
$B_{1, 525.02}/B_{1, 525.34}$	0.4

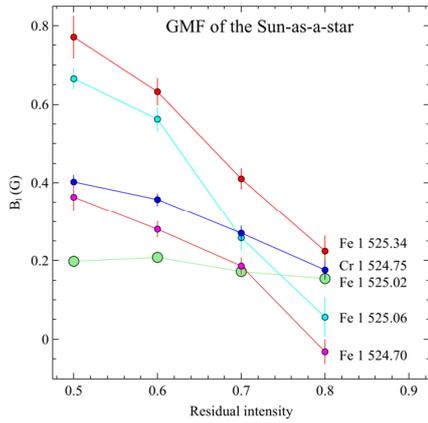


Рис. 2. Зависимость ОМП от остаточной интенсивности различных участков контуров спектральных линий

Для того чтобы найти зависимость продольного магнитного поля от эффективной глубины формирования спектральных линий, каждая линия была разбита на четыре сектора, как показано на рис. 1. Затем по формуле (1) было рассчитано продольное магнитное поле  $B_l$  для каждого из секторов. Результат показан на рис. 2. Для четырех из пяти спектральных линий продольное магнитное поле больше в ядрах спектральных линий и уменьшается в секторах ближе к континууму. Это может свидетельствовать о том, что продольное магнитное поле меняется с глубиной в фотосфере и, следовательно, зависит от эффективной глубины формирования спектральной линии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали совпадение напряженности ОМП Солнца, рассчитанной с применением нашего метода центра тяжести для спектральной линии FeI 525.02 нм ( $B_l=0.17\pm 0.01$  Гс), с магнитным полем,

полученным по наблюдениям магнитометра WSO для FeI 525.02 ( $B_l=0.20\pm 0.05$  Гс). Тестовое поле  $B_{null}$  равно нулю в пределах среднеквадратичной ошибки, что свидетельствует об отсутствии инструментальных артефактов в наших наблюдениях и методе. Мы обнаружили, что  $V$ -параметры Стокса асимметричны, а значения ОМП, рассчитанные по разным спектральным линиям, статистически значимы. Мы предположили, что в фотосфере существует градиент продольного магнитного поля, поэтому расчетное магнитное поле зависит от эффективной глубины формирования спектральной линии, используемой для расчета. Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что ОМП Солнца определяется магнитными полями в фотосфере, неоднородными не только по поверхности, что хорошо известно из солнечной физики. Поэтому мы можем применить наш метод центра тяжести в качестве первого шага для поиска и анализа неоднородности магнитного поля на звездах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Balthasar H., Demidov M.L. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280. P. 355.  
 Butkovskaya V.V., Plachinda S.I. *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 469. P. 1069.  
 Demidov M.L., Balthasar H. *Solar Phys.* 2009. Vol. 260. P. 261.  
 Demidov M.L., Balthasar H. *Solar Phys.* 2012. Vol. 276. P. 43.  
 Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M. *Solar Phys.* 2002. Vol. 209. P. 217.