

УДК 523.94, 523.9-1/-8

Магнитное поле Солнца как звезды по результатам стоксометрических измерений в Саянской обсерватории в 1999-2005 гг.

М.Л. Демидов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: demid@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 2 декабря 2005 г.

Аннотация. Общее магнитное поле (ОМП), или магнитное поле Солнца как звезды, является важным параметром солнечного магнетизма. Измеряемое по эффекту Зеемана в магниточувствительных спектральных линиях, оно характеризует глобальный разбаланс магнитных полей по видимому солнечному диску. Известно большое число исследований временных вариаций ОМП, связанных с анализом цикличности активности и вращения Солнца, проявлениями в межпланетной среде и в геомагнитной активности и т. д. С появлением стоксометрических измерений стало возможным, наряду с прежними, ставить и решать принципиально новые физические задачи, связанные, в частности, с изучением статистических характеристик тонкоструктурной составляющей солнечного магнетизма. Впервые в мире стоксометрические измерения ОМП начаты в 1999 г. и поставлены на регулярную основу в Саянской обсерватории. Основные результаты таких измерений за прошедшие годы представлены в настоящем докладе. Наибольшее внимание уделено результатам сопоставления измерений в разных спектральных линиях и обсерваториях, которые наиболее естественно представляется объяснить преобладающим вкладом мелкомасштабных магнитных элементов с килогауссовой напряженностью.

MAGNETIC FIELD OF THE SUN AS A STAR ACCORDING TO STOKES-METER MEASUREMENTS AT THE SAYAN OBSERVATORY IN 1999-2005, *by Demidov V.L.* The solar mean magnetic field (SMMF), or in an other words magnetic field of the Sun-as-a-star, is an important parameter of solar magnetism. It's measured in magneto-sensitive spectral lines using the Zeeman effect and it characterizes the magnetic fields disbalance across the visible solar disk. A numerous SMMF temporal variations researches are known, that are related to the cyclic activity and rotation of the Sun, their manifestations in the interplanetary medium and geomagnetic activity, etc. With appearance of Stokes-meter data it became possible to present and solve, along with the previous ones, the principal new physical tasks. In particular, these tasks are connected with study of statistical properties of fine-structure component of solar magnetism. SMMF Stokes-meter observations had been pioneerely started and have been continuing on the regular basis at the Sayan observatory since 1999. The basic results of such observations during the passed years are presented in this paper. The main attention is concentrated on the comparison results of measurements in different spectral lines and observatories.

Evidently, these results could quite naturally be explained by the predominant contribution from the small-scale magnetic elements with kG magnetic field strength.

Ключевые слова: Солнце, Солнце как звезда, общее магнитное поле, параметры Стокса

1 Введение

Одной из актуальных задач астрономии, прогресс в решении которой несомненен, является непосредственное наблюдение (пока, в основном, это делается косвенными методами) дисков, пространственной структуры других звезд. Тогда появится возможность и магнитные поля на звездах измерять не только интегральные, но и с пространственным разрешением. На Солнце такая возможность реализуется естественным образом и это представляет большую ценность для тестирования наблюдений магнитных полей на звездах, особенно солнечного типа. Уже только по этой причине измерения общего магнитного поля Солнца (ОМП), часто называемого также магнитным полем Солнца как звезды (МПСЗ), представляются чрезвычайно актуальными. Существуют и другие мотивы как солнечного, так и более прикладного характера. Поэтому представляется вполне естественным, что измерения ОМП Солнца, начатые впервые в Крымской астрофизической обсерватории (Северный, 1969) почти 40 лет назад, стали выполняться и на других инструментах (Шеррер, 1973; Шеррер и др., 1977; Григорьев и Демидов, 1987; Котов и др., 1998; Чаплин и др., 2003; Чаплин и др., 2004).

Таблица 1. Основные сведения о наблюдениях ОМП Солнца в Саянской обсерватории в 2001-2005 годы (по состоянию на 25.08.05), линия FeI 525.02 нм

Год	Число дней с наблюдениями ОМП	Средняя напряженность по модулю, мкТ	Среднее значение, мкТ
2001	150	33	0.7
2002	129	41	15
2003	136	69	13
2004	145	40	-2
2005	74	26	2

Отметим, что все данные по ОМП вплоть до недавнего времени (см. ниже) получались и получаются в магнитографическом режиме, т. е. по регистрации при работе анализатора поляризации флуктуаций интенсивности света в крыльях магниточувствительных линий. Флуктуации обусловлены эффектом Зеемана и в первом приближении их амплитуда пропорциональна величине продольной составляющей магнитного поля. Недостатки такого положения дел при современном уровне развития технических средств очевидны – практика спектрополяриметрических измерений Солнца с высоким пространственным разрешением убедительно показала это, позволив получить принципиально новые данные о солнечном магнетизме. Поэтому организация в 1999 г. наблюдений ОМП в стоксометрическом режиме на телескопе СТОП (солнечный телескоп оперативных прогнозов) Саянской солнечной обсерватории (ССО) представляется весьма важным событием (Демидов и др., 2002). В настоящем докладе представлены некоторые из результатов исследований ОМП, полученных на основании таких измерений в 1999-2005 гг. Основные статистические сведения о наблюдательном материале за 2001-2005 гг. (результаты предыдущих лет приведены в (Демидов и др., 2002)) обобщены в таблице 1.

2 Инструмент. Наблюдательные данные

Спектрополяриметрические наблюдения на СТОП стали возможными благодаря замене ФЭУ (фотоэлектронных умножителей), традиционно используемых в магнитографических измерениях в качестве фотоприемников, ПЗС-линейкой. Естественно, такая замена сопровождалась перестройкой и модернизацией управляющей и регистрирующей аппаратуры, разработкой нового программного обеспечения для управления телескопом и обработки данных. При этом сохранился применяемый с самого начала наблюдений на СТОП метод непрерывного контроля нулевого уровня – с помощью полуволновой фазовой пластинки, вводимой в пучок света перед целостатом. Более того, выяснилось, что без использования такого метода контроля нулевого уровня спектрополяриметрические измерения ОМП на СТОП были бы вообще невозможны, поскольку при слабых напряженностях магнитного поля искажающие инструментальные эффекты соизмеримы или даже превышают полезные сигналы. И переход к контрольным измерениям в области немагнитной линии, например FeI 512.4 нм, практически бесполезен. Так что относительно скромные габариты СТОП (диаметр линзового объектива составляет 18 см) являются его определенным достоинством, так как при больших размерах осуществлять процесс ввода-вывода перед целостатом фазовой пластинки большого диаметра каждые 3-4 секунды (как при наблюдениях на СТОП крупномасштабных магнитных полей (КМП)) или даже 8-10 секунд (как при наблюдениях ОМП) технически гораздо сложнее.

Регулярные измерения ОМП на СТОП выполняются в участке спектра шириной около 1 нм в районе линии FeI 525.02 нм, хотя эпизодически проводятся экспериментальные наблюдения и в других участках спектра. Типичное время стандартных измерений ОМП Солнца на СТОП составляет 15-20 минут (100 циклов измерений “с пластинкой – без пластинки” с временем накопления сигнала 8-10 секунд в каждом цикле и около 2 секунд на смену положения пластинки). Пример типичной записи ОМП для одного из дней, в данном случае 10 декабря 2002 г., приведен на рис. 1. Напряженность ОМП в этот день, если бы измерения велись в магнитографическом режиме (такой режим моделируется на СТОП численным образом), составила бы $B = -0.83$ Гс, линия FeI 525.02 нм. В данном случае распределения параметра Стокса V по контурам спектральных линий (V -профили) достаточно “правильные”, соответствующие классическим профилям при однородном магнитном поле. Хотя сразу бросается в глаза несоответствие амплитуд V -профилей факторам Ландэ (g -фактор). Действительно, у линии FeI 525.02 нм $g = 3$, а у соседней линии FeI 525.06 нм $g = 1.5$, а амплитуда V -профиля у линии FeI 525.06 нм даже больше! Несколько забегаю вперед отмечу, что наиболее вероятная причина такого положения дел заключается в проявлении магнитных полей высокой напряженности, когда сказываются нелинейные члены эффекта Зеемана (Стенфло, 1994).

Однако поскольку распределение магнитных полей по диску Солнца часто весьма неоднородно, такие “правильные” V -профили имеют место при наблюдениях ОМП далеко не всегда. На рис. 2 приведены несколько примеров I - и V -профилей Стокса спектральных линий FeI 525.02 нм и FeI 525.06 нм для нескольких дней наблюдений – как и на рис. 1 для 10 декабря, а также для 25 и 30 декабря 2002 г. Формальные “магнитографические” напряженности (в линии FeI 525.02) составили $B = +0.72$ Гс для 25 декабря и $B = -0.41$ Гс для 30 декабря. Кроме того, на этом же рисунке рядом с каждой панелью приведены в мозаичном виде карты распределения полярностей КМП, построенные по наблюдениям на СТОП. Видно, что форма V -профилей Стокса находится в прямой зависимости от структуры полярностей в центральной области солнечного диска. При преобладании одной полярности профили более-менее симметричны, при смешении полярностей – или очень слабые, или очень неправильной формы, ничего общего с классическими V -профилями не имеющие.

3 Результаты

Располагая информацией о I - и V -профилях Стокса одновременно в нескольких спектральных линиях, можно исследовать характеристики ОМП Солнца на более глубоком физическом уровне,

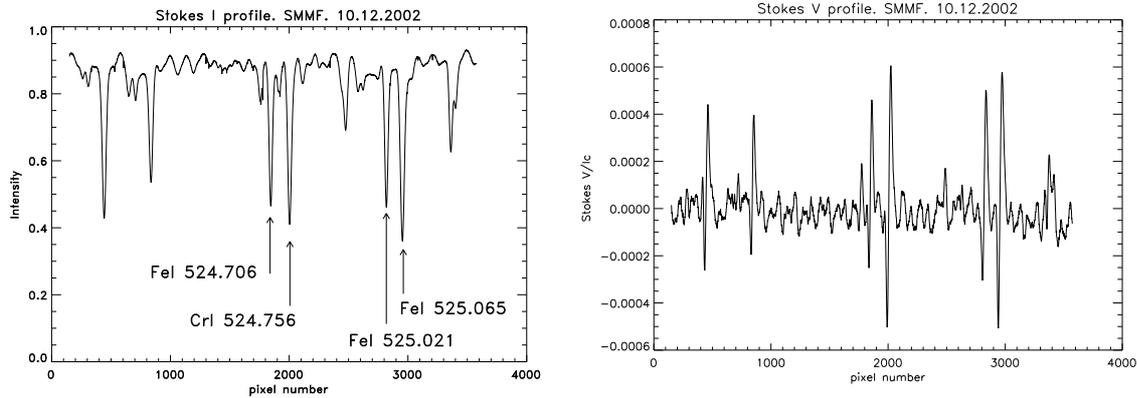


Рис. 1. Пример распределения I - (левая панель) и V - (правая панель) параметров Стокса в участке спектра шириной около 1 нм вблизи линии FeI 525.02 нм при наблюдениях магнитного поля Солнца как звезды. Дата наблюдений 10 декабря 2002 г., “магнитографическая” напряженность в линии FeI 525.02 нм составляет $B = -0.83$ Гс

чем это было доступно при наличии только магнитографических данных. Например, только по виду V -профиля можно судить (а в будущем и моделировать) о степени неоднородности магнитных полей в апертуре наблюдений. Тот факт, что даже при преобладании магнитных полей одной полярности V -профили спектральных линий остаются, как правило, достаточно асимметричными, позволяет предположить, что и для интерпретации наблюдений ОМП применимы те же механизмы формирования поляризованного излучения, которые привлекаются для объяснения особенностей профилей Стокса при наблюдениях с высоким пространственным разрешением. Такие механизмы предполагают существование мелкомасштабных магнитных элементов с высокой напряженностью (порядка 1 кГс) и наличие движений плазмы со значительными скоростями. И магнитное поле, и лучевые скорости обладают значительными градиентами по лучу зрения.

В пользу применимости такой гипотезы для объяснений наблюдений ОМП свидетельствуют и результаты сопоставления напряженностей в различных спектральных линиях, о чем говорилось выше. Результаты регрессионного анализа значений напряженности ОМП в различных комбинациях четырех спектральных линий представлены в таблице 2. Можно видеть, что при очень высоких значениях коэффициентов корреляции (что является логическим следствием одновременности наблюдений), напряженности значительно и статистически значимо отличаются. Теоретическое моделирование (Верецкий и Демидов, 2002) позволяет сделать вывод, что наилучшим образом экспериментальные данные удастся объяснить, если предположить, что напряженность магнитного поля в магнитных силовых трубках составляет около 1 кГс.

Естественно представляет интерес вопрос о том, как соотносятся новые, стоксометрические измерения ОМП Солнца с другими данными. Сопоставление с результатами наблюдений в 2003 г. в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (COU)-(WSO), наиболее однородными вплоть до настоящего времени, представлено на левой панели рис. 3 (данные CCO-(SSO), естественно, соответствуют наблюдениям в линии FeI 525.02 нм). При коэффициенте корреляции массивов $r = 0.92$ (число пар точек $N = 137$) уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$B_{WSO} = 0.03(\pm 0.05) + 0.93(\pm 0.03)B_{SSO} \quad (1)$$

Сопоставление Саянских измерений ОМП Солнца с данными обсерватории Китт Пик (КП)-(КР) (на интернет-сайте которой приведены, помимо прочей информации, результаты усреднения магнитограмм по всему диску) для интервала времени с 03.07.2000 по 12.04.2001 (57 дней с общими наблюдениями) представлены на правой панели рис. 3. При весьма высоком коэффициенте

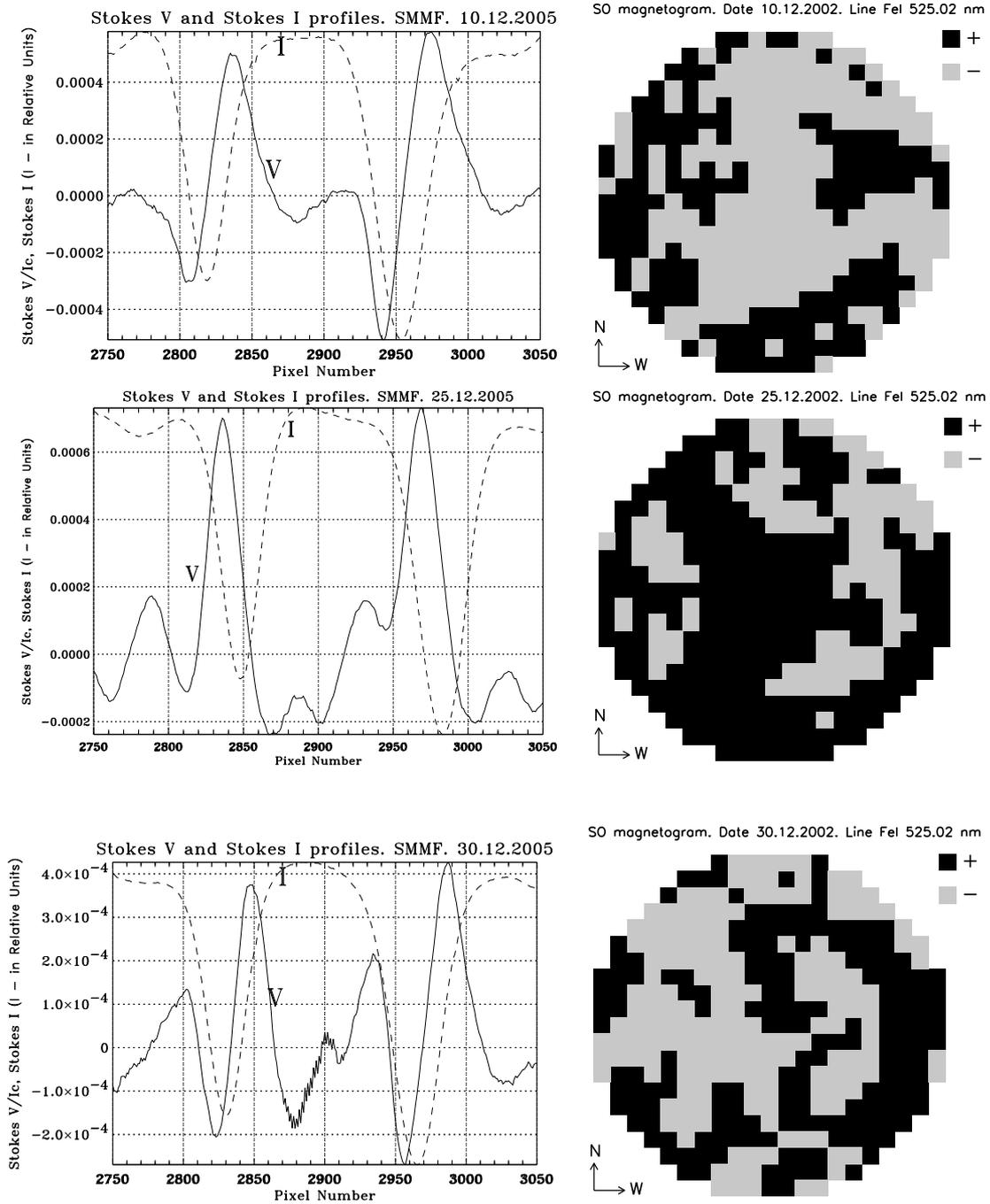


Рис. 2. Левая панель: сопоставление I - (в произвольном масштабе) и V -профилей Стокса для линий FeI 525.02 нм и FeI 525.06 нм для 3-х дней наблюдений ОМП Солнца – 10, 25, и 30 декабря 2002 г. Правая панель: карты распределения полярностей крупномасштабных магнитных полей (наблюдения на СТОП с разрешением $100''$) по диску Солнца в те же дни, что и на левой панели

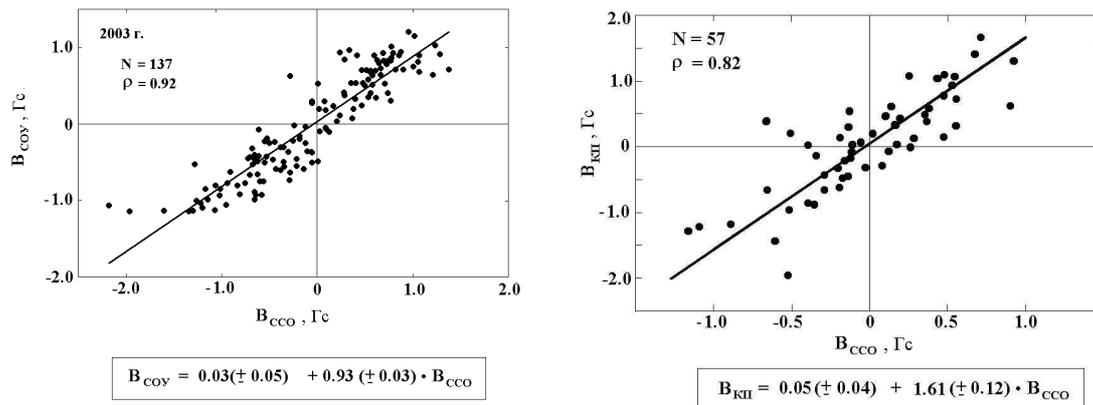


Рис. 3. Сопоставление наблюдений ОМП Солнца в Саянской обсерватории и обсерватории СОУ за 2003 г. (левая панель) и в Саянской обсерватории с данными обсерватории Китт Пик (средние значения напряженности по диску) для периода времени 03.07.2000–12.04.2001 (правая панель)

корреляции $r = 0.82$, имеет место значительное систематическое различие, следующее из уравнения линейной регрессии:

$$B_{KP} = 0.05(\pm 0.04) + 1.61(\pm 0.12)B_{SSO} \quad (2)$$

Несомненно, важную роль в наблюдаемых различиях данных ССО и КП играет факт использования в обсерваториях различных спектральных линий. Отметим также, что результаты сопоставления с данными СОУ многолетних измерений ОМП Солнца в рамках эксперимента BiSON (Birmingham Solar-Oscillation Network) (Чаплин и др., 2003), в котором используется линия калия 769.9 нм, показали, что измеряемые в Станфорде напряженности в два раза меньше.

4 Заключение

Автор благодарен Григорьеву В.М., Пещерову В.С., Верецкому Р.М., Латушко Т.А., Васильевой Г.С. за содействие в получении и обработке наблюдательного материала на телескопе СТОП Саянской обсерватории, а также В.А. Котову (КРАО) за многочисленные обсуждения проблем ОМП Солнца.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ 05-02-16472, НШ 733.2003.2, российско-германского гранта 436 RUS 113/784/0-1.

Литература

- Верецкий и Демидов (Veretsky R.M., Demidov M.L.) // COSPAR colloquia series. 2002. V. 14. P. 71.
 Григорьев и Демидов (Grigoryev V.M., Demidov M.L.) // Solar Phys. 1987. V. 114. P. 147.
 Демидов и др. (Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M.) // Solar Phys. 2002. V. 209. P.217.
 Котов и др. (Kotov V.A., Scherrer P.H., Howard R.F., Haneychuk V.I.) // Astrophys. J. Suppl. Series. 1998. V. 116. P. 103.
 Северный (Severny A) // Nature. 1969. V. 224. N. 5214. P. 53-54.
 Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar magnetic fields. Polarized radiation diagnostics. Kluwer Academic Publisher. 1994. P. 385.
 Шеппер (Scherrer P.H) // Ph.D.Dissertation. 1973. Stanford University. SUIPR Rep. N. 554. P. 151.
 Шеппер и др. (Scherrer P.H., Wilcox J.M., Svalgaard L., Duvall T.L., Dittmer P.H., Gustafson E.K) // Solar Phys. 1977. V. 54. P. 353.

Чаплин и др. (Chaplin, W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., New R., Pinter B.) // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2003. V. 343. P. 813.

Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., New R., Pinter B.) // Solar Phys. 2004. V. 220. P. 307.