

УДК 523.94, 523.9-1/-8

Сопоставление наблюдений магнитных полей Солнца, выполненных в разных обсерваториях: особенности пространственного распределения по диску

М.Л. Демидов, Е.М. Голубева

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

Поступила в редакцию 2 декабря 2005 г.

Аннотация. Сопоставление наблюдений магнитных полей Солнца, выполненных в различных спектральных линиях, давно является важным средством диагностики магнитогидродинамических условий в солнечной атмосфере, особенно на масштабах, меньших пространственного разрешения телескопов. В настоящей работе приводится исследование распределений по диску Солнца отношений напряженности магнитных полей, измеренных с небольшой разницей во времени в Саянской обсерватории, Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (Станфорд), обсерваториях Китт-Пик, Маунт Вилсон, SOHO/MDI. Найдено, что в некоторых комбинациях данных такие распределения существенно неоднородны. А именно, наряду с более-менее очевидными центрo-лимбовыми вариациями имеет место значительная экваториально-полярная асимметрия. Отмечается важное значение полученных результатов для диагностики структуры магнитных полей в солнечной атмосфере, а также для задач расчета магнитных полей в короне и в гелиосфере.

THE COMPARISON OF SOLAR MAGNETIC FIELD OBSERVATIONS TAKEN AT DIFFERENT OBSERVATORIES: PECULIARITIES OF SPATIAL DISTRIBUTIONS ACROSS THE DISK, *by M.L. Demidov, E.M. Golubeva.* Comparison of solar magnetic field observations performed in different spectral lines have been for a long time and is still a significant tool for diagnostics of magnetohydrodynamic conditions in the solar atmosphere, especially on the scales smaller than spatial resolution of available telescopes. In this paper we explore distributions of magnetic field strength ratios on the solar disk, using the data obtained with short time difference at Sayan Observatory, Wilcox Solar Observatory (Stanford), Kitt Peak Observatory, Mt. Wilson Observatory, and SOHO/MDI. It was found that these distributions are essentially inhomogeneous in some combinations of the data sets. Namely, along with more-or-less obvious center-to-limb variations, there is a significant equator-to-poles asymmetry. It is noticeably that obtained results are of great importance for diagnostics of spatial structure of magnetic fields in the solar atmosphere, and for calculations of magnetic fields in the corona and heliosphere.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, центрo-лимбовые вариации

1 Введение

Характерной особенностью солнечных магнитных полей является их сильная неоднородность на различных пространственных масштабах, от глобальных до мельчайших. В последнем случае,

когда размеры неоднородностей существенно меньше пределов углового разрешения телескопов, адекватная интерпретация результатов измерений представляет собой сложную физическую проблему. Ее решение представляется невозможным без привлечения расчетов уравнений переноса поляризованного излучения в сложно структурированной среде в рамках тех или иных модельных предположений.

Необходимость такого подхода стала очевидной, начиная с первых экспериментов по сопоставлению магнитографических наблюдений в различных спектральных линиях. Здесь уместно отметить, что в этой области, как и во многих других, приоритетные результаты были получены в Крымской астрофизической обсерватории (Гопасюк и др., 1973). Наибольшую известность в этом плане получила статья (Стенфло, 1973), в которой для диагностики “скрытой” структуры магнитных полей использованы и эффективно промоделированы наблюдения в линиях одного мультиплета, а именно, в линиях FeI $\lambda 525.02$ нм и FeI $\lambda 524.70$ нм, все атомные параметры которых, за исключением фактора Ландэ, схожи. Однако и сопоставление наблюдений в других комбинациях спектральных линий является источником важной информации (Говард и Стенфло, 1972; Соланки, 1993; Стенфло, 1994).

С внедрением в практику стоксометрических методов измерений солнечных магнитных полей, упомянутый выше подход стал необходим уже с точки зрения наблюдений даже в одной линии, поскольку профили Стокса часто показывают такие характеристики, объяснить которые однородными моделями, или неоднородными только по глубине, не представляется возможным.

Помимо сопоставления измерений магнитных полей, полученных на одном инструменте в разных линиях, важным элементом солнечной физики является также сопоставление измерений в различных обсерваториях. Такие работы, совершенно очевидно, актуальны в техническом аспекте, поскольку позволяют выполнять взаимную калибровку инструментов и оценивать возможные инструментальные эффекты (Хофманн и др., 1988; Ронан и др., 1992; Арг и др., 2002; Жанг и др., 2003). Представляют такие работы значительный интерес и в контексте проблемы диагностики физических условий в солнечной атмосфере (Нортон и Ульрич, 2000), и с точки зрения проблем изучения временных вариаций (на основе “сшивки” различных рядов данных) солнечного магнетизма и связи таких вариаций с изменениями других параметров, в частности, светимости (Уэнзлер и др., 2004; Уэнзлер и др., 2005; Зэм и др., 2005). Все большее значение приобретают такие работы для тех аспектов актуальной программы “космической погоды”, которые связаны с расчетами магнитных полей в короне и в межпланетной среде (Вонг, Шили, 1988).

Характерным свойством прежних многочисленных работ по сопоставлению данных разных обсерваторий (список процитированных статей отнюдь не исчерпывает всех публикаций) является то, что в них не исследованы особенности распределений коэффициентов различия по всему диску Солнца. Наблюдения ограничивались либо только активными областями, либо некоторыми избранными участками диска. Максимально, что было сделано с использованием полнодисковых данных – это анализ центролимбовых вариаций, или анализ в нескольких особым образом выбранных зонах (Зэм и др., 2005).

Данная работа представляет следующий шаг в исследованиях в данном направлении. Здесь представлены результаты сопоставления охватывающих полный солнечный диск наблюдений магнитных полей, выполненных на телескопе СТОП (Пещеров и др., 1999) Саянской обсерватории (Sayan Observatory – SO), в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (Wilcox Solar Observatory – WSO), в обсерватории Маунт Вилсон (Mount Wilson Observatory – MWO), в обсерватории Китт-Пик (Kitt Peak – KP), а также с прибора MDI (Michelson Doppler Imager), установленного на спутнике SOHO. Причем основной акцент сделан на анализе коэффициентов различия именно по всему диску Солнца в целом.

2 Экспериментальные данные

За основу в работе были взяты 30 саянских магнитограмм полного диска, полученные за период времени с 01.04.2001 по 26.12.2001 гг. при наблюдении в линии FeI $\lambda 525.02$ нм с угловым разрешением

100". Эти магнитограммы были сопоставлены с измерениями крупномасштабных магнитных полей (КМП) в WSO (спектральная линия FeI $\lambda 525.02$ нм, пространственное разрешение 175"), с измерениями, выполненными с более высоким пространственным разрешением в обсерваториях KP (линия FeI $\lambda 868.86$ нм, разрешение 1.15") и MWO (линии FeI $\lambda 525.02$ нм и NaI $\lambda 589.59$ нм, разрешение 3.75"), а также данными SOHO/MDI (линия NiI $\lambda 676.78$ нм, разрешение 1.98").

Поскольку в наземных наблюдениях неизбежны пропуски из-за неблагоприятной погоды, оказалось возможным сравнить 20 пар магнитограмм в комбинации обсерваторий SO-WSO, 27 пар магнитограмм SO-KP и по 26 пар магнитограмм SO-MWO для обеих спектральных линий, используемых в MWO. Во всех этих случаях принималась во внимание разница во времени наблюдений, обусловленная долготной разнесенностью обсерваторий (WSO и MWO находятся в Калифорнии, а KP – в Аризоне, США). При этом учитывался поворот Солнца по закону дифференциального вращения (Говард, Харви, 1970) за промежуток времени между сопоставляемыми измерениями. Временной сдвиг не превышал 18 часов. Тем не менее, специально выполненный анализ показал, что компенсация за вращение Солнца существенно влияет на результаты.

Так как измерения солнечных магнитных полей на спутнике SOHO производятся регулярно через 96 минут, каждой из 30-ти исходных магнитограмм SO была сопоставлена магнитограмма SOHO. Выбор последней осуществлялся так, чтобы разница по времени измерений была по возможности минимальной. При этом компенсация за солнечное вращение не производилась.

В каждой паре сравниваемых обсерваторий данные были приведены к единому пространственному разрешению. При этом в качестве исходного принималось более низкое разрешение. Для сравнения с магнитограммами WSO саянские измерения были проинтерполированы (с использованием стандартной функции IDL) на соответствующую координатную сетку WSO (где матрица исходных данных имеет размерность 21×11 , на диске 195 точек). Данные KP, MWO и SOHO были усреднены по апертуре SO (матрица данных 21×21 , на диске 349 точек).

3 Результаты сравнительного анализа

Результаты корреляционного и регрессионного анализа саянского ряда данных КМП и данных перечисленных выше обсерваторий приведены на рис. 1. Можно видеть весьма хорошее соответствие измерений в SO-WSO и SO-MWO (FeI $\lambda 525.02$ нм), что вполне ожидаемо, т. к. сопоставляются наблюдения в одной и той же спектральной линии. Отмечаются весьма значительные систематические различия (при столь же высоких коэффициентах корреляции, как в комбинации SO-WSO) в случаях SO-MWO (NaI $\lambda 589.59$ нм), SO-KP и SO-SOHO.

Этот результат интересен сам по себе. Однако с учетом весьма любопытных результатов, полученных ранее при сопоставлении наблюдений КМП на СТОП в четырех спектральных линиях в окрестности FeI $\lambda 525.02$ нм (Демидов и др., 2004), несомненный интерес представляет более детальное исследование распределений соответствующих коэффициентов регрессии R по диску Солнца.

Такое исследование было выполнено. С этой целью были определены коэффициенты регрессии R для каждого "пиксела" матрицы данных в каждой паре сопоставляемых обсерваторий. А именно, для каждого индивидуального элемента "магнитного изображения", определяемого, как отмечалось выше, наблюдениями с более низким пространственным разрешением, формировались два соответствующих ряда напряженностей, измеренных в сопоставляемых обсерваториях. Далее, для этих напряженностей методом приведенной главной оси рассчитывались параметры уравнения линейной регрессии в выделенном "пикселе". Результаты выполненного таким образом анализа представлены на рис. 2 в удобном для зрительного восприятия мозаичном виде. На правых панелях этого рисунка показаны соответствующие распределения коэффициентов корреляции ρ . Информация о распределении ρ представляется также весьма полезной, поскольку позволяет судить о надежности получаемых в тех или иных участках диска Солнца коэффициентов регрессии.

Из анализа рис. 2 можно видеть, что во всех сопоставляемых парах данных имеют место заметные центролимбовые вариации (ЦЛВ) коэффициента регрессии R. Они весьма несущественны

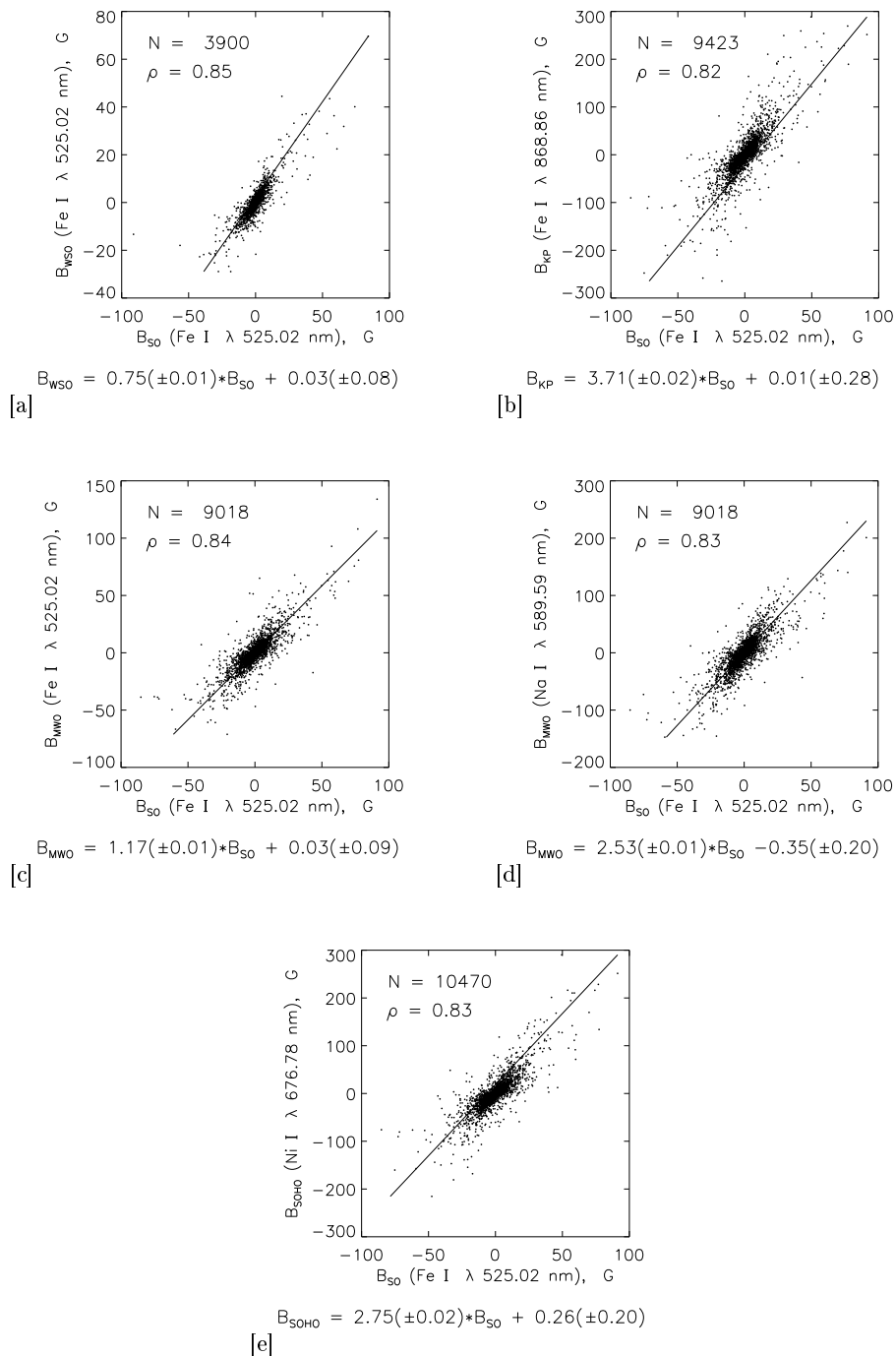


Рис. 1. Результаты корреляционного и регрессионного анализа данных обсерваторий SO-WSO (a), SO-KP (b), SO-MWO (c, d), SO-SOHO (e). Число рассмотренных пар магнитограмм составляет 20, 27, 26 и 30 для каждой пары обсерваторий соответственно. Здесь N – общее число точек, ρ – коэффициент корреляции. Внизу приведены соответствующие уравнения линейной регрессии

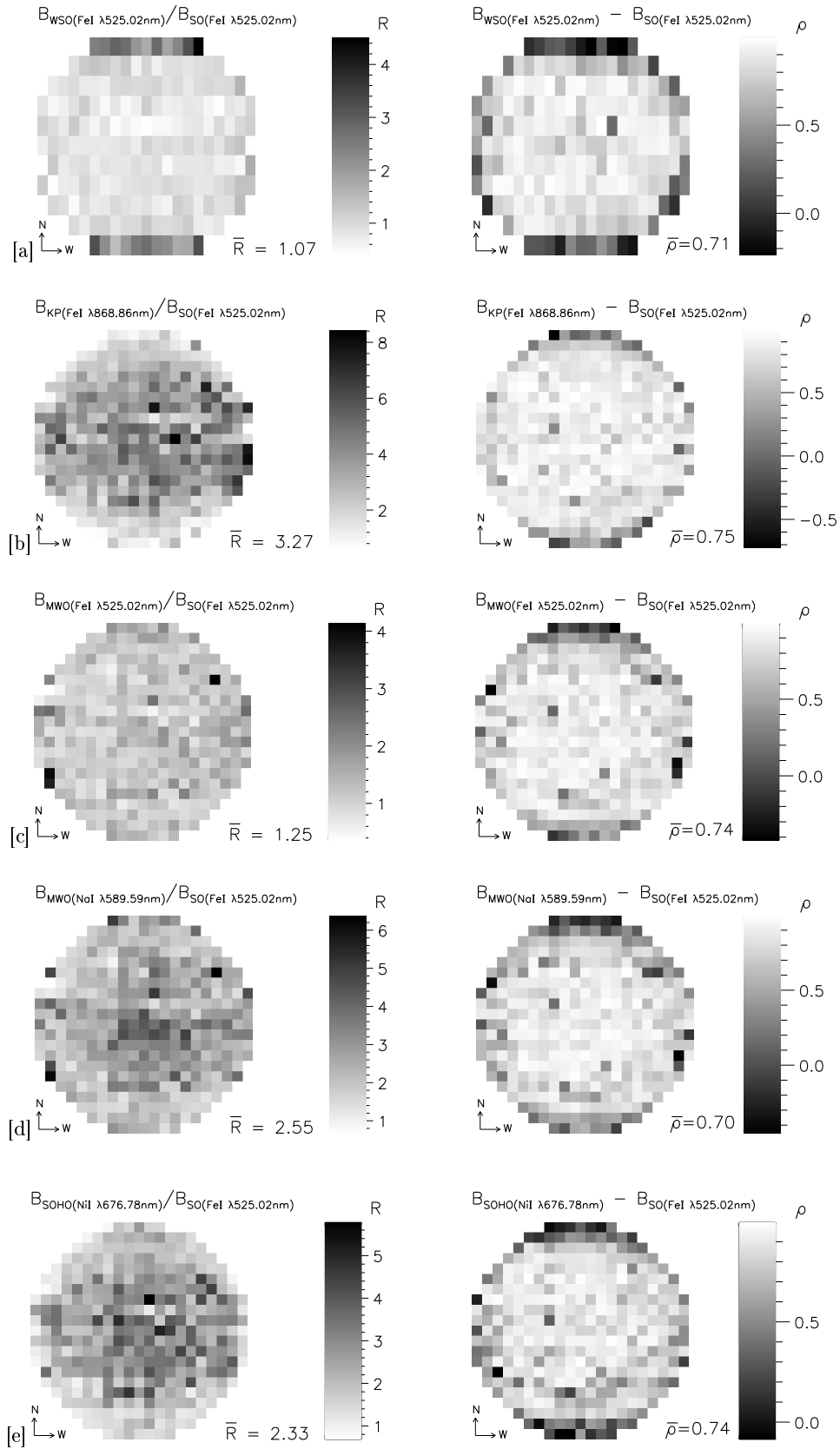


Рис. 2. Распределения коэффициентов регрессии (коэффициентов различия) R (слева) и соответствующих коэффициентов корреляции ρ (справа) напряженностей солнечных магнитных полей, измеренных в обсерваториях SO-WSO (a), SO-KP (b), SO-MWO (c, d), SO-SOHO (e). Число рассмотренных пар магнитограмм составляет 20, 27, 26 и 30 для рассматриваемых комбинаций данных соответственно

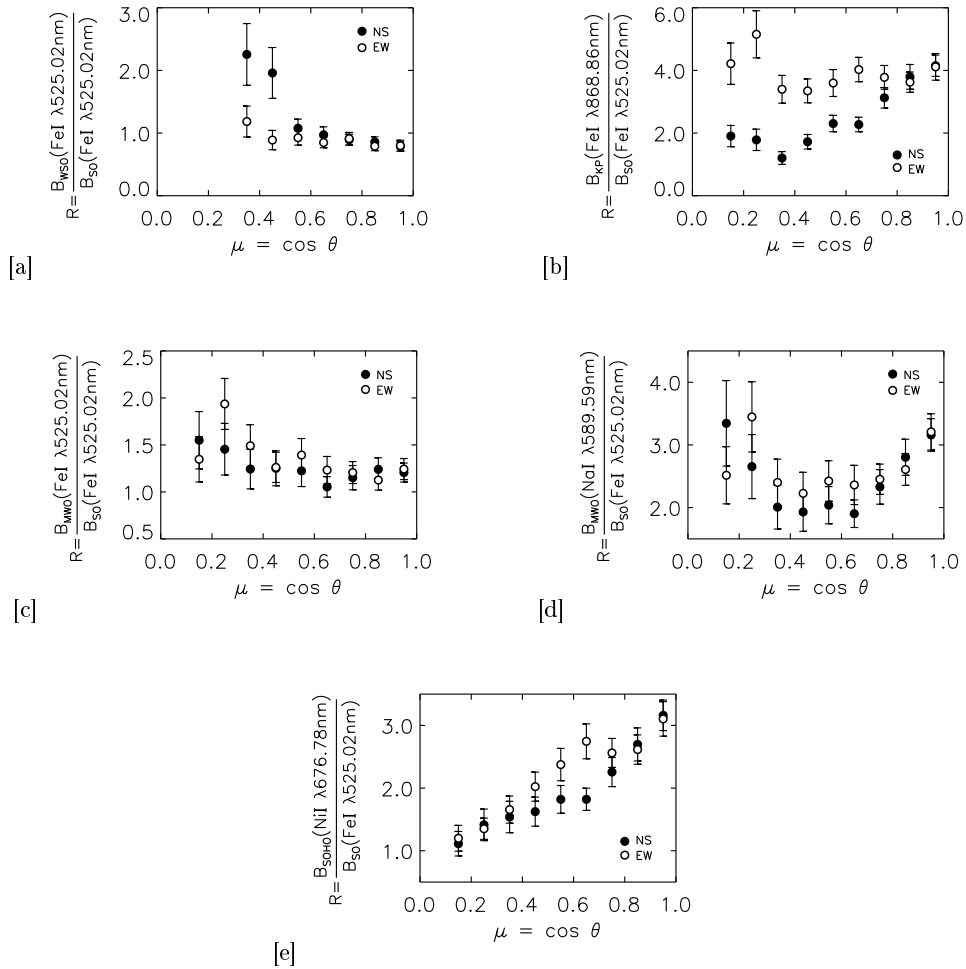


Рис. 3. Центро-лимбовые вариации отношений напряженностей (коэффициентов регрессии R) магнитных полей в “полярных” (NS) и “экваториальных” (EW) секторах солнечного диска, полученные при сопоставлении измерений, выполненных в обсерваториях SO-WSO (a), SO-KP (b), SO-MWO (c, d), SO-SOHO (e). Число рассмотренных пар магнитограмм составляет 20, 27, 26 и 30 соответственно

для SO-WSO и SO-MWO (FeI $\lambda 525.02$ нм) (однако обращают на себя внимание приполярные области, в которых значения R и ρ резко отличаются) и довольно значительны для SO-MWO (NaI $\lambda 589.59$ нм), SO-KP и SO-SOHO. Причем в случае SO-KP легко видеть наличие существенных различий между значениями R в приполярных и в экваториальных лимбовых зонах. Для исследования этого эффекта экваториально-полярной асимметрии, впервые обнаруженного также при анализе наблюдений SO в разных спектральных линиях, был выполнен специальный анализ. А именно, на солнечном диске были определены: 1) кольцевые зоны шириной $\Delta\mu = 0.1$, где μ – гелиоцентрическое расстояние ($\mu = \cos \theta$, θ – гелиоцентрический угол между данной точкой и центром диска); 2) “полярный” (NS) и “экваториальный” (EW) 90-градусные сектора с началом в центре диска. Результаты анализа ЦЛВ R в таких усредненных секторах для всех комбинаций анализируемых рядов данных представлены на рис. 3.

Из анализа графиков видно, что в случаях SO-WSO и SO-MWO (FeI $\lambda 525.02$ нм) ЦЛВ в EW и NS секторах практически идентичны (как того и следовало ожидать, так как в этих наблюдениях используется одна и та же спектральная линия). Исключение составляет узкая окололимбовая зона,

где на полюсах R существенно больше, чем в экваториальной области. В случаях SO-MWO(NaI $\lambda 589.59$ нм) и SO-KP различия в поведении R начинаются уже на небольших гелиоцентрических расстояниях от центра диска. В комбинации SO-KP вблизи лимба значения R в экваториальном направлении в два раза больше, чем в полярном. Поскольку в этом случае используются разные спектральные линии, обнаруженный эффект, по-видимому, аналогичен описанному в (Демидов и др., 2004) и, возможно, обусловлен различием физических условий и магнитных полей на высотах образования соответствующих линий в полярных и экваториальных окололимбовых зонах. В случае сопоставления данных SO и SOHO/MDI экваториально-полярная асимметрия R не наблюдается, но имеет место значительное (в 3 раза) уменьшение при переходе от центра диска к краю.

4 Обсуждение

Интерпретация исследованных ЦЛВ отношений напряженности в различных комбинациях данных, особенно нового явления экваториально-полярной асимметрии представляет собой, безусловно, актуальную и интересную задачу как в научном, так и в прикладном аспектах. По-видимому, единственным возможным способом ее решения является моделирование экспериментальных данных посредством решения уравнений переноса поляризованного излучения в сложно-структурированных средах. В (Демидов и Верецкий, 2004) предпринята попытка воспроизвести достаточно сложными модельными расчетами наблюдаемые в SO усредненные ЦЛВ отношений напряженностей, измеренных в комбинации линий “магнитного отношения” $\text{FeI } \lambda 525.02$ нм и $\text{FeI } \lambda 524.70$ нм, без разграничения на секторы. В модели предполагалось, что поляризованное излучение образуется при прохождении света через среду, состоящую из магнитных силовых трубок и немагнитной плазмы между ними – широко известная двухкомпонентная модель, использованная для аналогичных целей, например, в (Соланки и др., 1998). Свободными параметрами при расчетах являлись размеры трубок и фактор заполнения. Вариациями этих параметров удалось добиться весьма хорошего соответствия для центральных областей диска, но с удалением от центра диска имеет место весьма существенное расхождение. В частности, теория предсказывает прохождение отношения уровня $R = 1$, а эксперимент свидетельствует, что значение отношения (для рассматриваемой комбинации линий) всегда остается меньше единицы. Причины такого расхождения пока не ясны и необходимы дальнейшие исследования и расчеты, в том числе с привлечением новых комбинаций данных, использованных в настоящей работе.

5 Заключение

Авторы благодарны 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. Авторы также выражают благодарность Соммерс Дж., Хоексема Т. (Sommers J., Hoeksema T., Wilcox Solar Observatory) и Харви Дж. (Harvey J., Kitt Peak) за консультации по вопросам наблюдения магнитных полей Солнца в соответствующих обсерваториях. Магнитографические данные обсерваторий Китт Пик и SOHO были получены с сайтов этих обсерваторий. Данные (первого уровня) обсерватории им. Дж. Уилкокса были любезно предоставлены Хоексемой Т., за что авторы выражают ему искреннюю признательность. Авторы благодарны Гречневу В.В. за ценные замечания по использованию возможностей IDL. Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ 05-02-16472, НШ 733.2003.2, российско-германского гранта 436 RUS 113/784/0-1.

Литература

Арг и др. (Arge C.N., Hidner E., Pizzo V.J., Harvey J.W.) // *Geophys. Res.* 2002. V. 107. N. A10. P. 1319.

- Вонг, Шили (Wang Y.M., Sheeley N.R. Jr.) // *Geophys. Res.* 1988. V. 93. N. A10. P. 11227.
- Говард, Харви (Howard R., Harvey J.) // *Solar Phys.* 1970. V. 12. P. 23. 282.
- Говард, Стенфло (Howard R., Stenflo J.O.) // *Solar Phys.* 1972. V. 22. P. 402.
- Гопасюк и др. (Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.) // *Solar Phys.* 1973. V. 31. P. 307.
- Говард и Харви (Howard R., Harvey J.) // *Solar Phys.* 1970. V. 12. P. 23.
- Демидов и Верецкий (Demidov M.L., Veretsky R.M. // *Proceed. IAU Symp. No. 223 Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity* (eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, A.G. Kosovichev). 2004. P. 211.
- Демидов и др. (Демидов М.Л., Верецкий Р.М., Пещеров В.С.)// *Солнечно-земная физика.* 2004. Вып. 6. С. 29
- Зэм и др. (Tham T., Bertollo L., Ulrich R.K., Evans S.)// *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005. V. 156. Is. 2. P. 295.
- Жанг и др. (Zhang H., LaBonte B., and Sakurai T.)// *Solar Phys.* 2003. V. 213. P. 87.
- Нортон и Ульрич (Norton A.A., and Ulrich R.K.)// *Solar Phys.* 2000. V. 192. P. 403.
- Пещеров и др. (Пещеров В.С., Жигалов В.В., Демидов М.Л. и др.) // *Солнечно-земная физика. Труды VII симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Троицк. 1999. С. 260.*
- Ронан и др. (Ronan R.S., Orral F.Q., Mickey D.L., West E.A., Hagyard M.J., Balasubramaniam K.S.) // *Solar Phys.* 1992. V. 138. P. 49.
- Соланки и др. (Solanki S.K., Steiner O., Bunte M., Murphy G., Ploner S.R.O.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 333. P. 721.
- Соланки (Solanki S.M.) // *Space Science Reviews.* 1993. V. 63. P. 1.
- Стенфло (Stenslo J.O.) // *Solar Phys.* 1973. V. 32. N. 1. P. 41.
- Стенфло (Stenslo J.O.) // *Solar magnetic fields. Polarized radiation diagnostics. – Kluwer Academic Publisher.* 1994. P. 385.
- Уэнзлер и др. (Wenzler T., Solanki S.K., Krivova N.A., Fluri D.M.)// *Astron. Astrophys.* 2004. V. 427. P. 1031.
- Уэнзлер и др. (Wenzler T., Solanki S.K., Krivova N.A.)// *Astron. Astrophys.* 2005. V. 432. P. 1057.
- Хофманн и др. (Hofmann A., Grigoryev V.M., Selivanov V.L., Klvana M.) // *Astronomische Nachrichten.* 1988. V. 309. N. 5. P. 331.