

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 118, № 2, 5–12 (2022)

УДК 523.9, 523.9-8, 523.94, 523.98

Сопоставление значений магнитных полей в активных областях на Солнце, полученных различными инструментами

Р.А. Сулейманова

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
bictr97@gmail.com

Поступила в редакцию 15 июня 2022 г.

Аннотация. Проведено сравнение магнитных потоков в активных областях (АО), измеренных аппаратами SOHO/MDI и SDO/HMI. Получены коэффициенты перехода от HMI- к MDI-данным: 1.46 для АО, наблюдавшихся на расстоянии не более 10° от центрального меридиана и 1.29 для АО, наблюдавшихся на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$. Были проведены сравнения значений максимального магнитного поля в пятнах, полученных в 2014 году по измерениям телескопа SDO/HMI и наземного телескопа БСТ-2 в Крымской астрофизической обсерватории РАН. Сопоставление проводилось методом ортогональной регрессии. Показано, что наилучшее соответствие между данными с двух инструментов достигается при сопоставлении крымских данных с HMI-данными о полном векторе поля (коэффициент корреляции 0.71), нежели о его продольной составляющей (коэффициент корреляции 0.66). Такой вывод свидетельствует о том, что измерения поля по сдвигу спектральной линии (метод, применяемый на БСТ-2) дают величину полного вектора поля со знаком его продольной компоненты. Результаты сопоставления свидетельствуют о возможности применять крымские данные о магнитных полях пятен, что особо ценно при изучении солнечных циклов до космической эры.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля

1 Введение

Магнитное поле Солнца определяет солнечную активность. Оно проявляет себя в возникновении и эволюции солнечных пятен, в существовании солнечного цикла. Оно ответственно за взрывные процессы, такие как вспышки и корональные выбросы массы, а также за длительные периоды отсутствия активности Солнца, например, глобальные минимумы активности. Все эти факторы определяют космическую погоду в окрестностях нашей планеты. По этой причине важно изучать магнитное поле на длительных однородных интервалах времени. Надежные измерения магнитных полей Солнца из космоса стали доступны с 1996 года, когда появились первые снимки солнечного диска, снятые космическим аппаратом Solar and Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager (SOHO/MDI) (Scherrer et al., 1995). С 2010 года стали доступны магнитографические данные, полученные инструментом Solar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) (Scherrer et al., 2012). Длинный однородный ряд данных для более ранних лет представляет собой особый научный интерес. В этой связи представляется возможным использовать данные телескопа БСТ-2 в Крымской астрофизической обсерватории РАН (КрАО РАН), где с 1956 года по единой методике проводятся измерения максимальных магнитных полей в пятнах. Для этого необходимо исследовать совместимость данных космических аппаратов MDI, HMI и телескопа БСТ-2, что и является целью данной работы.

2 Данные и методы

В настоящей работе используются данные таких инструментов как HMI космического аппарата SDO (Liu et al., 2012; Schou et al., 2012), MDI космического аппарата SOHO (Scherrer et al., 1995) и данные телескопа БСТ-2 (Северный, Степанов, 1956) Крымской астрофизической обсерватории РАН.

Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) является частью космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO). Данный инструмент является фильтрографом, снимающим полный диск Солнца с разрешающей способностью $1''$ и размером пикселя $0.5'' \times 0.5''$. Измерение магнитных полей происходит в линии поглощения Fe I 6173 Å. Так как при сравнении магнитных потоков HMI и MDI необходимы изображения по лучу зрения (line-of-sight (LOS) магнитограммы), в работе используются данные передней камеры (front camera, более подробное описание см. Schou et al., 2012; Liu et al., 2012). Набор фильтрограмм этой камеры строится из серий изображений, построенных на шести точках спектральной линии при двух различных состояниях поляризации (Schou et al., 2012).

Для сравнения с данными телескопа БСТ-2 используются магнитограммы боковой камеры (side camera, более подробное описание см. Schou et al., 2012; Liu et al., 2012), так как она строит серию изображений на шести точках спектральной линии при шести различных состояниях поляризации. Это дает возможность получения магнитограмм полного вектора магнитного поля. Готовые для научного анализа магнитограммы находятся в свободном доступе на официальном сайте объединенного научного операционного центра (Joint Science Operations Center, JSOC¹).

Michelson Doppler Imager (MDI), предшественник аппарата SDO, является частью космического аппарата Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Данный инструмент также является фильтрографом, снимающим полный диск Солнца с разрешающей способностью $4''$ и размером пикселя $2'' \times 2''$ (Scherrer et al., 1995). В четырех точках вдоль линии поглощения Ni I 6768 Å строятся четыре фильтрограммы, с помощью которых получается карта доплеровских скоростей на диске Солнца. Данные LOS-магнитограмм представляют собой разность доплерограмм для правосторонней и левосторонней круговых поляризаций. Данные также находятся в свободном доступе и предоставляются JSOC².

Башенный солнечный телескоп – 2 (БСТ-2) является действующим солнечным телескопом в обсерватории КрАО РАН. С 1956 года на нем ведутся наблюдения Солнца и измеряются максимальные магнитные поля солнечных пятен. Используя эффект Зеемана, наблюдается расщепление линии Fe I 6302 Å. Непосредственно перед щелью спектрографа устанавливается анализатор, состоящий из четвертьволновой пластинки и поляроидной мозаики. Он предназначен для выделения правосторонней и левосторонней круговой поляризации. Четвертьволновая пластинка преобразует круговую поляризацию в линейную, а мозаика попеременно выделяет взаимно перпендикулярные направления линейно поляризованного света. Измеряя расстояние отклонения от центральной линии железа, можно измерить максимальное магнитное поле солнечного пятна (Северный, Степанов, 1956).

Так как расщепление спектральных линий зависит только от свойств атома и абсолютной величины магнитного поля, а направление вектора магнитного поля по отношению к наблюдателю определяется поляризацией и амплитудой спектральных компонент, можно предположить, что по отклонению от центральной линии на БСТ-2 измеряется модуль полного вектора магнитного поля, а по стороне отклонения (вправо или влево) от центральной линии определяется его знак (Плотников, Куценко, 2018). Точность измерений магнитных полей составляет 100 Мкс см^{-2} , при этом магнитные поля ниже 1000 Мкс см^{-2} измерить с достаточной точностью нельзя. Данные измерений находятся в общем доступе на сайте КрАО РАН³ в виде зарисовок.

Одним из результатов работы Биктимирова, Абраменко (2020) являются оцифрованные значения магнитных полей солнечных пятен, измеренные БСТ-2 в 2014 году. Эти данные были использованы и здесь.

¹ <http://hmi.stanford.edu/magnetic/>

² http://jsoc.stanford.edu/MDI/MDI_Magnetograms.html

³ <https://sun.crao.ru/observations/sunspots-magnetic-field>

2.1 Соотношение магнитных потоков, измеренных MDI и HMI

В работе [Liu et al. \(2012\)](#) было проведено сравнение данных магнитных полей, измеренных MDI и HMI. Оно происходило на основе попиксельного сравнения следующим образом. Было снижено разрешение магнитограмм HMI до разрешения MDI с помощью сглаживания двумерной функцией Гаусса. Для каждой магнитограммы MDI была произведена коррекция искривления, а также смещения позиционного угла. Далее были взяты исправленные магнитограммы MDI и на их основе были вычислены углы поворота магнитограмм HMI. Размытые и повернутые магнитограммы HMI, которые были попиксельно сравнены с магнитограммой MDI, являлись прокси-магнитограммой. Полученную прокси-магнитограмму сравнивали с магнитограммой MDI, при этом были взяты пиксели на расстоянии не дальше 60° от центра Солнца. Было получено соотношение между значениями магнитных полей

$$B_{LOS}(MDI) = -0.18 + 1.40B_{LOS}(HMI),$$

где $B_{LOS}(MDI)$ и $B_{LOS}(HMI)$ в ед. Мкс см^{-2} . Далее авторы провели сравнение для разных областей солнечного диска. Данные брались такие же, как и в предыдущем сравнении. Были взяты пиксели в трех зонах: $[-30^\circ; 30^\circ]$ и $[30^\circ; 45^\circ]$, $[45^\circ; 70^\circ]$ в обе стороны от центрального меридиана, и получены коэффициенты перехода 1.43, 1.40 и 1.26 соответственно. Авторы сделали вывод, что коэффициент перехода между данными магнитных полей, измеренными MDI и HMI, изменяется в зависимости от расстояния от центра диска.

Мы также провели сравнение данных магнитных потоков, измеренных MDI и HMI. Были выбраны 23 активные области, лежащие вблизи центрального меридиана (10° по долготе) и 23 активные области, лежащие на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$. Каждая область отдельно вырезалась из LOS-магнитограмм полного диска MDI и HMI таким образом, чтобы оба изображения были максимально одинаковыми, т. е. перекрывали одну и ту же область на диске. При подсчете магнитных потоков исправление за эффект проекции (μ -коррекция, [Hagenaar, 2001](#)) проводилось только для активных областей на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$.

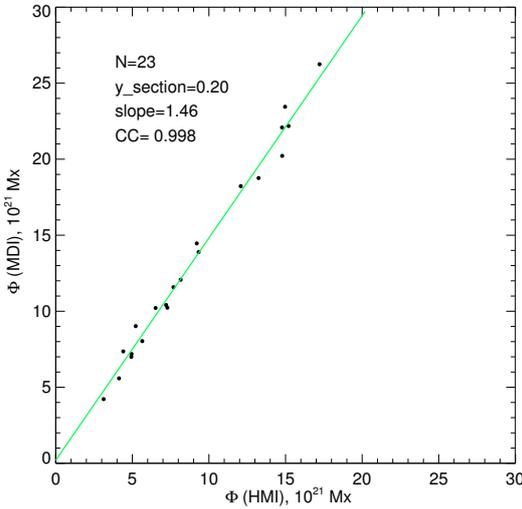


Рис. 1. График соотношения значений магнитных потоков активных областей вблизи центрального меридиана; $\Phi(\text{MDI})$ (по оси Oy) от $\Phi(\text{HMI})$ (по оси Ox)

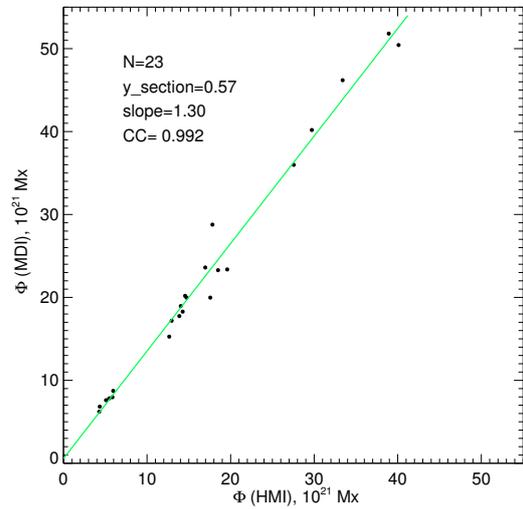


Рис. 2. График соотношения значений магнитных потоков активных областей на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$; $\Phi(\text{MDI})$ (по оси Oy) от $\Phi(\text{HMI})$ (по оси Ox)

Для активных областей вблизи центрального меридиана получено соотношение значений магнитных потоков

$$\Phi(MDI) = (0.22 \pm 0.28) + (1.46 \pm 0.02)\Phi(HMI),$$

где $\Phi(MDI)$ и $\Phi(HMI)$ в ед. 10^{21} Мкс. Коэффициент корреляции 0.998 при 95 % доверительном интервале 0.97–0.99. Полученный график линейной регрессии приведен на рис. 1.

Для активных областей на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$ получено соотношение значений магнитных потоков

$$\Phi(MDI) = (0.56 \pm 0.69) + (1.29 \pm 0.03)\Phi(HMI),$$

где $\Phi(MDI)$ и $\Phi(HMI)$ в ед. 10^{21} Мкс. Коэффициент корреляции также 0.992 при 95 % доверительном интервале 0.97–0.99. Полученный график линейной регрессии приведен на рис. 2.

Проведенное сравнение магнитных потоков в данной работе совпадает с выводами, сделанными в работе [Liu et al. \(2012\)](#). Коэффициент перехода между магнитными потоками, измеренными аппаратом MDI, и магнитными потоками, измеренными аппаратом HMI, меняется в зависимости от расстояния от центра Солнца к его лимбу: 1.46 в центре солнечного диска и 1.29 у края солнечного диска.

2.2 Соотношение максимальных магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2 и аппаратом HMI

Для подтверждения положения о том, что БСТ-2 измеряет полный вектор магнитного поля ([Плотников, Куценко, 2018](#)), было проведено сравнение между абсолютными значениями максимального магнитного поля, измеренными на телескопе БСТ-2, и абсолютными значениями максимального магнитного поля, измеренными аппаратом HMI: продольная компонента магнитного поля и полный вектор магнитного поля. Были взяты активные области в центре солнечного диска (на расстоянии не дальше 14° от центрального пикселя) и активные области на долготах $[-60^\circ; -40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$. Так как оба ряда измерений (и БСТ-2, и HMI) отягощены ошибками, то, следуя методике, представленной в работе [Наговицын и др. \(2016\)](#), мы использовали метод ортогональной регрессии.

Метод позволяет вычислить коэффициенты линейной зависимости

$$\zeta = m + b\theta$$

в предположении, что оба ряда отягощены ошибками. Здесь θ – ряд измерений магнитных полей КраО, а ζ – ряд измерений магнитных полей аппарата HMI. Детали метода можно найти в работе [Наговицын и др. \(2016\)](#). Вычисления проводились в среде программирования IDL с использованием функции `sxlin.pro`.

Для активных областей вблизи солнечного диска было получено соотношение значений продольной компоненты магнитного поля, измеренных аппаратом HMI, и значений магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2:

$$B_{LOS}(HMI) = (213 \pm 394) + (0.88 \pm 0.22)B(CR),$$

где $B_{LOS}(HMI)$ и $B(CR)$ в ед. Мкс см^{-2} . Получен коэффициент корреляции 0.66 при 95 % доверительном интервале 0.54–0.75. По аналогии с обозначениями в работе [Наговицын и др. \(2016\)](#), крымские измерения обозначены как $B(CR)$.

Для зависимости значений полного вектора магнитного поля, измеренных аппаратом HMI, от значений магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2, получено соотношение

$$B(HMI) = (277 \pm 349) + (0.92 \pm 0.19)B(CR),$$

где $B(HMI)$ и $B(CR)$ в ед. Мкс см^{-2} . Значение коэффициента корреляции 0.71 при 95 % доверительном интервале 0.59–0.79.

Число измерений, коэффициент корреляции, наклон и свободный член ортогональной регрессии для активных областей в центре солнечного диска приведены в таблице 1. Полученный график зависимости значений продольной компоненты магнитного поля, измеренных HMI, от значений магнитных полей, измеренных БСТ-2, приведен на рис. 3. График зависимости значений полного вектора магнитного поля, измеренных HMI, от значений магнитных полей, измеренных БСТ-2, приведен на рис. 4.

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции, значения наклона и свободного члена ортогональной регрессии, полученные при сравнении магнитных полей пятен в центре диска: данные продольной компоненты HMI против данных БСТ-2 (второй столбец), данные полного вектора HMI против данных БСТ-2 (третий столбец)

Величина	$B_{LOS}(HMI)$ vs $B(CR)$	$B(HMI)$ vs $B(CR)$
Число измерений, N	103	103
Коэффициент корреляции, CC	0.66	0.71
Свободный член, $y_section$ (Мкс см ⁻²)	213±394	277±349
Наклон, slope	0.88±0.22	0.92±0.19

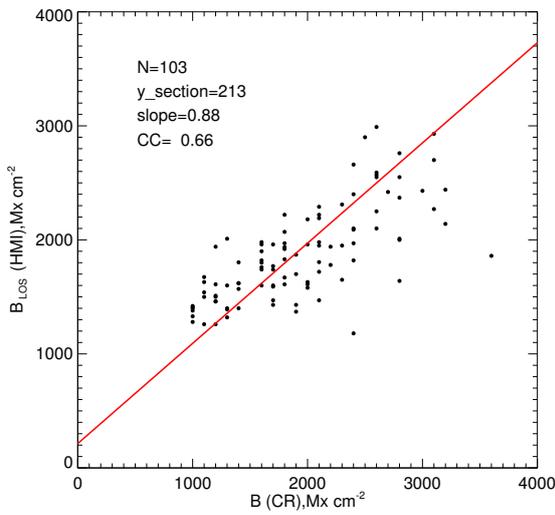


Рис. 3. График зависимости абсолютных значений магнитных полей в центре солнечного диска $B_{LOS}(HMI)$ от $B(CR)$

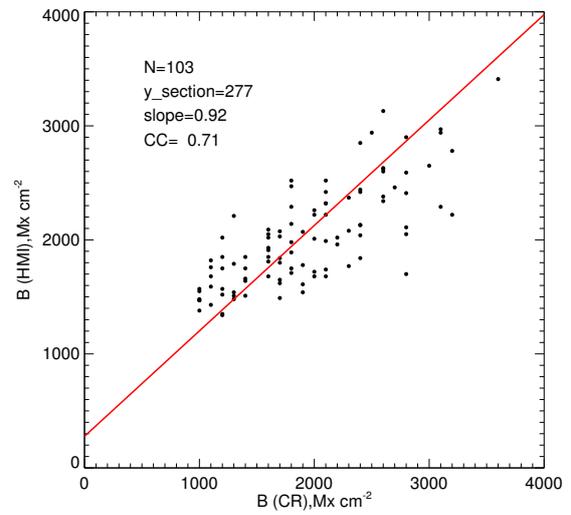


Рис. 4. График зависимости абсолютных значений магнитных полей в центре солнечного диска $B(HMI)$ от $B(CR)$

Для активных областей на долготах $[-60^\circ; -40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$ было получено соотношение значений продольной компоненты магнитного поля, измеренных аппаратом HMI, от значений магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2:

$$B_{LOS}(HMI) = (-278 \pm 137) + (0.94 \pm 0.08)B(CR),$$

где $B_{LOS}(HMI)$ и $B(CR)$ в ед. Мкс см⁻². Получен коэффициент корреляции 0.73 при 95 % доверительном интервале 0.63–0.80.

Для зависимости значений полного вектора магнитного поля, измеренных аппаратом HMI, от значений магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2, получено соотношение

$$B(HMI) = (341 \pm 190) + (0.99 \pm 0.12)B(CR),$$

где $B(HMI)$ и $B(CR)$ в ед. Мкс см⁻². Значение коэффициента корреляции 0.76 при 95 % доверительном интервале 0.66–0.82.

Число измерений, коэффициент корреляции, наклон и свободный член ортогональной регрессии для активных областей на долготах $[-60^\circ; -40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$ приведены в таблице 2, полученный график зависимости значений продольной компоненты магнитного поля, измеренных HMI, от значений магнитных полей, измеренных БСТ-2, приведен на рис. 5. График зависимости значений полного

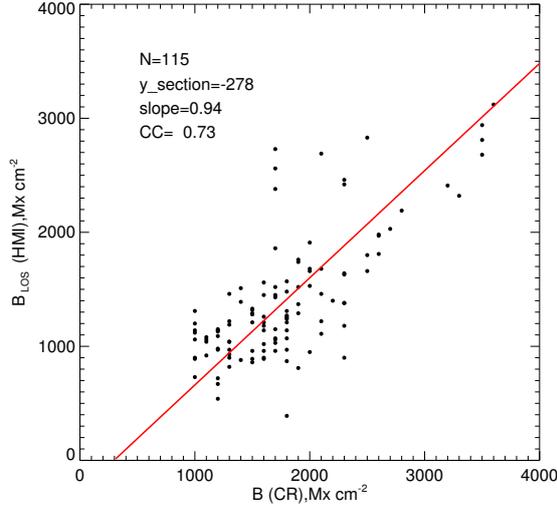


Рис. 5. График зависимости абсолютных значений магнитных полей на долготах $[-60^\circ; 40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$ $B_{LOS}(HMI)$ от $B(CR)$

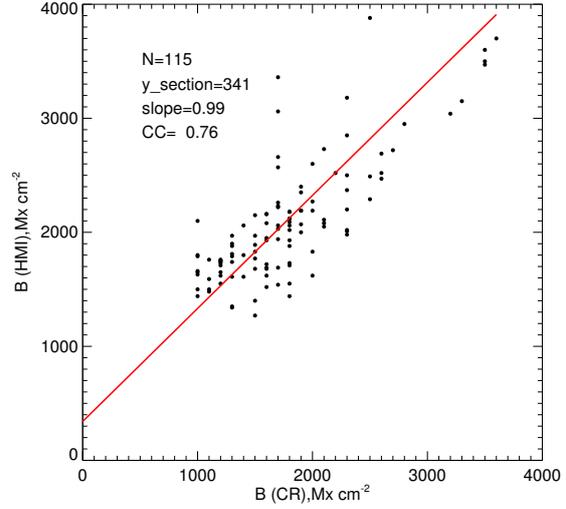


Рис. 6. График зависимости абсолютных значений магнитных полей на долготах $[-60^\circ; -40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$ $B(HMI)$ от $B(CR)$

вектора магнитного поля, измеренных НМИ, от значений магнитных полей, измеренных БСТ-2, приведен на рис. 6.

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции, значения наклона и свободного члена ортогональной регрессии, полученные при сравнении магнитных полей пятен на долготах $[-60^\circ; -40^\circ]$ и $[40^\circ; 60^\circ]$: данные продольной компоненты НМИ против данных БСТ-2 (второй столбец), данные полного вектора НМИ против данных БСТ-2 (третий столбец)

Величина	$B_{LOS}(HMI)$ vs $B(CR)$	$B(HMI)$ vs $B(CR)$
Число измерений, N	115	115
Коэффициент корреляции, CC	0.73	0.71
Свободный член, $y_section$ (Мкс см ⁻²)	-278 ± 137	341 ± 190
Наклон, slope	0.94 ± 0.08	0.99 ± 0.12

Вычисления, приведенные выше, показали, что коэффициент корреляции для отношения значений полного вектора магнитного поля, измеренных аппаратом НМИ, и значений максимальных магнитных полей, измеренных БСТ-2, всегда больше, чем коэффициент корреляции для отношения значений продольной компоненты магнитного поля, измеренных аппаратом НМИ, и значений максимальных магнитных полей, измеренных БСТ-2. Из этого можно сделать вывод, что телескоп БСТ-2 измеряет полный вектор магнитного поля.

В работе [Наговицын и др. \(2016\)](#) проводилось сравнение значений магнитных полей солнечных пятен, измеренных в КраО РАН и в различных наземных обсерваториях (среди них, например, есть обсерватория Маунт-Вилсон, ИЗМИРАН, ГАО РАН и др.). Авторами были получены графики сравнения и уравнения перехода методом ортогональной регрессии. Полученные в нашей работе графики сравнения принадлежат тому же классу точности.

Кроме того, хорошее согласие между данными аппарата НМИ и телескопа БСТ-2 позволяет утверждать, что данные магнитных полей солнечных пятен можно использовать в дальнейших исследованиях.

3 Заключение

В настоящей работе было проведено сравнение данных о магнитных потоках, измеренных аппаратами MDI и HMI. Также были проведены сопоставления данных о магнитных полях пятен, измеренных аппаратом HMI и телескопом БСТ-2.

Получено соотношение значений магнитных потоков АО, наблюдаемых вблизи центрального меридиана: $\Phi(MDI) = 0.22 + 1.46 \Phi(HMI)$. Для АО на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$ аналогичное соотношение имеет вид: $\Phi(MDI) = 0.56 + 1.29 \Phi(HMI)$.

Таким образом, коэффициент перехода между данными магнитных потоков MDI и HMI для АО вблизи центрального меридиана равен 1.46, а для АО на долготах $[-60^\circ; -10^\circ]$ и $[10^\circ; 60^\circ]$ он равен 1.29.

Получены коэффициенты корреляции при сравнении абсолютных значений максимальных магнитных полей в пятнах, измеренных аппаратом HMI (продольная компонента магнитного поля и полный вектор магнитного поля), и значений максимальных магнитных полей, измеренных телескопом БСТ-2. Они позволяют подтвердить положение о том, что телескоп БСТ-2 измеряет максимальные значения полного вектора магнитного поля.

Сделан вывод о том, что результаты сравнения измерений магнитных полей, полученных на телескопе БСТ-2 (КрАО РАН) и аппаратом SDO/HMI, дополняют результаты сравнения измерений магнитных полей, полученные в работе [Наговицын и др. \(2016\)](#).

Высокая степень корреляции (0.73) между данными БСТ-2 и HMI позволяет утверждать, что данные о максимальных магнитных полях в пятнах, измеряемые на телескопе БСТ-2, могут быть использованы для продления однородного ряда измерений магнитных полей солнечных пятен в докосмическую эру.

Благодарности. Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Ю.А. Наговицыну и д.ф.-м.н. В.И. Абраменко за консультации и ряд ценных предложений. Сравнение HMI- и MDI-данных проводилось при поддержке гранта РНФ (проект 18-12-00131); сравнение данных HMI и КрАО РАН выполнено при поддержке плана НИР ФГБУН “КрАО РАН” 1021051101548-7-1.3.8.

Литература

- Биктимирова Р.А., Абраменко В.И., 2020. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 116. № 1. С. 7–13. [Biktimirova R.A. Abramenko V.I., 2020. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 116, no. 1, pp. 7–13. (In Russ.)]
- Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А. и др., 2016. Письма в Астрон. журн. Т. 42. № 10. С. 773–782. [Nagovitsyn Yu.A., Pevtsov A.A., Osipova A.A., et al., 2016. *Pis'ma Astron. Zh.*, vol. 42, no. 10, pp. 773–782. (In Russ.)]
- Плотников А.А., Куценко А.С., 2018. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 114. № 2. С. 87–96. [Plotnikov A.A., Kutsenko A.S., 2018. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 114, no. 2, pp. 87–96. (In Russ.)]
- Северный А.Б., Степанов В.Е., 1956. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 16. С. 3–11. [Severnyi A.B., Stepanov V.E., 1956. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 16, pp. 3–11. (In Russ.)]
- Hagenaar H.J., 2001. *Astrophys. J.*, vol. 555, no. 1, pp. 448–461.
- Liu Y., Hoeksema J.T., Scherrer P.H., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 279, pp. 295–316.
- Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., et al., 1995. *Solar Phys.*, vol. 162, pp. 129–188.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 207–227.
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 229–259.

Comparison of the magnetic fields in solar active regions derived with different instruments

R. Suleymanova

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
bictr97@gmail.com

Abstract. A comparison between the magnetic fluxes acquired by SDO/HMI and SOHO/MDI for solar active regions was carried out. The transition coefficient depends on longitude. For active regions near the central meridian, the coefficient amounts to 1.46, and it is 1.29 at longitudes $[-60^\circ; -10^\circ]$ and $[10^\circ; 60^\circ]$.

In this study, the maximum magnetic field measurements in sunspots acquired by SDO/HMI were compared to those acquired by the BST-2 telescope (Crimean Astrophysical Observatory RAS) in 2014. The data from SDO/HMI consists of the line-of-sight magnetic field $B_z(\text{HMI})$ and the modulus of the magnetic field vector $B(\text{HMI})$. For comparison, we used the orthogonal regression method. We found that the best agreement between these two data sets takes place when the BST-2 data are compared with the modulus of the magnetic field vector $B(\text{HMI})$ rather than with the line-of-sight magnetic field $B_z(\text{HMI})$. The former gives us a correlation coefficient of 0.71 versus 0.66 for the latter.

Therefore, the magnetic field measurements from the spectral line shifting (the BST-2 method) gives us a value of the full magnetic field vector with a sign of the longitudinal component. A good agreement between the BST-2 data and the SDO/HMI data allows us to use the Crimean data for sunspots, which is extremely valuable in studying solar cycles during the pre-cosmic era.

Key words: Sun, magnetic fields