

УДК 523.9, 523.9-8, 523.94, 523.98

## Магнитные поля солнечных пятен: сравнение данных КрАО и SDO/HMI

*Р.А. Биктимирова<sup>1</sup>, В.И. Абраменко<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Свердловская обл., Россия, 620026*bictr97@gmail.com*<sup>2</sup> ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», Научный, Крым, 298409*vabramenko@gmail.com*

Поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.

**Аннотация.** Переведены в цифровой формат данные об измерении максимального магнитного поля в солнечных пятнах, полученные в Крымской астрофизической обсерватории Российской академии наук (КрАО РАН) в виде зарисовок. Исследовано около 1000 пятен, наблюдавшихся в 2014 году. Эти данные были сопоставлены с данными SDO/HMI (значениями магнитного поля по лучу зрения  $B_z(HMI)$  и значениями модуля полного вектора магнитного поля  $B(HMI)$ ). Сравнивались максимальные значения модуля поля в одних и тех же пятнах. Показано, что имеет место прямо пропорциональная зависимость между крымскими данными и космическими данными обоих типов. Линейная аппроксимация для всего интервала измерений поля (1–4) килогаусс (kG) показывает коэффициент корреляции Пирсона 0.71 (95 % доверительный интервал: 0.68–0.74) и наклон линейной регрессии  $0.65 \pm 0.02$  для обоих типов космических данных. Линейная аппроксимация в области сильных полей  $B(CrAO) > 1.8$  kG показывает примерно тот же коэффициент корреляции, но значительно более близкий к единице наклон линейной регрессии: 0.90 для ( $B_z(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ) и 0.84 для ( $B(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ). При слабых полях  $B(CrAO) < 1.8$  kG наблюдается нелинейное отклонение (завышение) космических данных. Характер нелинейности частично можно объяснить особенностями крымской методики измерений, однако этот вопрос требует дальнейшего исследования возможных источников нелинейности в космических данных. Сделан вывод о том, что данные по измерению магнитного поля в КрАО показывают хорошее согласие со значениями современного космического аппарата SDO/HMI, поэтому их можно использовать в научных целях.

**Ключевые слова:** Солнце, магнитные поля

### 1 Введение

Солнце и излучаемая им энергия представляют собой основной источник жизни на Земле. Этим обусловлен интерес к проблемам физики Солнца. Магнитное поле Солнца ответственно за солнечную активность, которая проявляется как вспышки, генерирующие гигантские выбросы массы в гелиосферу и потоки ускоренных заряженных частиц. Эти факторы определяют космическую погоду в окрестностях нашей планеты. В силу этих причин измерение магнитных полей на Солнце представляет большой интерес. Солнечный цикл, длящийся около 11 лет, представляет собой перекачку двух компонент глобального магнитного поля Солнца: крупномасштабного магнитного диполя (полоидальное магнитное поле) и тороидального магнитного поля с помощью солнечного динамо. Во время максимума цикла нередко возникают активные области, в том числе сильные вспышки – результат взрывного выделения свободной магнитной энергии активной области. Для создания эффективных методов прогноза вспышек необходимо знать как можно больше о динамо-процессе, как о его теоретической основе, так и о закономерностях его проявлений в прошлом, и, в первую очередь, о солнечных пятнах и магнитном поле в них. В связи с этим особенно важны длинные временные ряды однородных измерений магнитных полей в пятнах.

В Крымской астрофизической обсерватории накоплен архив<sup>1</sup> наблюдений максимальных магнитных полей в пятнах, начиная с 1956 г. (около 6 солнечных циклов). Для возможности использования накопленных данных необходимо провести их валидацию, т. е. путем сравнения значений магнитных полей, полученных в КрАО, и магнитных полей, полученных на современных солнечных инструментах, установить физическое соответствие измеряемых величин, точность их измерения и наличие или отсутствие систематических отклонений.

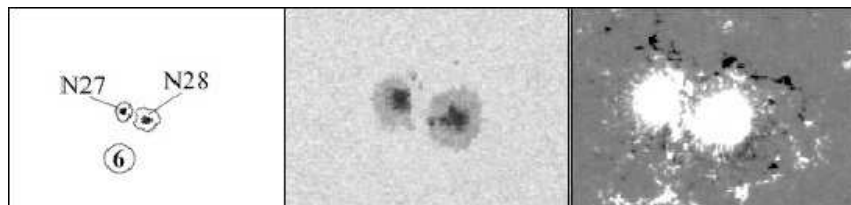
## 2 Методика сравнения магнитных полей

### 2.1 Измерение и метод получения данных значений вектора магнитного поля в КрАО

Величина максимального магнитного поля и его полярность в солнечном пятне измеряется в КрАО методом, предложенным в работе (Северный, Степанов, 1956). Метод заключается в измерении расщепления спектральной линии FeI 6302 Å под действием магнитного поля с помощью поляроидной мозаики. Полоски поляроида выделяют попеременно колебания взаимно перпендикулярных направлений. Перед мозаикой стоит четвертьволновая пластинка для превращения круговой поляризации в линейную. Зигзагообразное изображение линии позволяет определить знак поля по лучу зрения. Абсолютная величина магнитного поля  $|\mathbf{B}|$  в Гс определяется по сдвигу линии на основе формулы (Плотников, Куценко, 2018):

$$\Delta\lambda = g \frac{\lambda^2 e}{4\pi m_e c^2} |\mathbf{B}|, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны спектральной линии;  $B$  – напряженность магнитного поля в гауссах;  $g$  – фактор Ланде;  $m_e$  – масса электрона;  $c$  – скорость света (см/с). Поля с максимальной напряженностью менее 1000 Гс не могут быть измерены таким способом. Но если рассматривать только поля в пятнах, то это ограничение несущественно, так как обычно в порах и пятнах магнитное поле не ниже 1000 Гс (Стещенко, 1967). Точность измерения составляет 100 Гс. Измеренные значения поля на зарисовках наносятся в сотнях гаусс с указанием полярности, например, N27 означает +2700 Гс (см. рис. 1, слева).



**Рис. 1.** Пример сопоставления магнитных полей пятен. Слева: зарисовка КрАО магнитных полей пятен (буква указывает полярность, цифры – напряженность поля в сотнях Гс); в центре: HMI-изображение активной области в белом свете; справа: HMI-магнитограмма. Максимальная напряженность продольного магнитного поля по данным HMI в левом (правом) пятне составляет 2480 (2270) Гс, максимальная напряженность модуля полного вектора магнитного поля составляет 2610 (2530) Гс

Результаты измерений магнитных полей выставляются на сайт КрАО в виде зарисовок. Далее необходимо занести эти значения магнитных полей в текстовый файл-таблицу для дальнейшего сопоставления с данными SDO/HMI. Фрагмент текстового файла представлен в виде таблицы 1.

### 2.2 Методика получения данных с космического аппарата SDO/HMI

Для сравнения с данными магнитных полей, измеренных в КрАО, мы использовали данные, полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту станции Solar Dynamics Observatory (SDO/HMI, Schou et al., 2012). Измерения магнитного поля на станции проводятся в

<sup>1</sup> <https://sun.crao.ru/observations/sunspots-magnetic-field>

Таблица 1. Фрагмент файла сопоставления магнитных полей

| Дата       | Время, UT | NOAA  | $B(CrAO)$ , Гс | $B_z(HMI)$ , G | $B_f(HMI)$ , G |
|------------|-----------|-------|----------------|----------------|----------------|
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -1000          | -1700          | -2190          |
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -1000          | -1780          | -2120          |
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -1000          | -1200          | -1200          |
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -1900          | -2200          | -2500          |
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -2000          | -1920          | -2100          |
| 2014.06.08 | 07:55     | 12085 | -1800          | -1840          | -1880          |

линии FeI 6173 Å с 2010 года. Для сравнения был взят 2014 год – год максимума 24-го солнечного цикла.

Для получения данных SDO/HMI необходимо было найти соответствующую группу пятен и скачать нужную магнитограмму и изображение в белом свете, доступные на сайте Joint Science Operations Center (JSOC)<sup>2</sup>. Использовались магнитограммы как продольной составляющей поля (line-of-sight, hmi.M-720s), так и модуля полного вектора магнитного поля SDO/HMI (hmi.sharp-720s) с пространственным разрешением 1'' (размер одного пикселя 0.5'') и уровнем шума около 6 Гс (Liu et al., 2012). Методом визуального контроля каждая активная область на Солнце, наблюдаемая в КрАО, сопоставлялась с соответствующей активной областью SDO/HMI по изображению в белом свете и по магнитограмме (рис. 1). Затем в каждом пятне, зарегистрированном в КрАО, IDL-программой определялась максимальная напряженность продольного магнитного поля и модуля полного вектора магнитного поля на карте HMI. Результаты заносились в соответствующую строку таблицы 1. Всего было обработано 991 пятно.

### 3 Результаты

Если представить данные нашей файл-таблицы в графическом виде как зависимость космических измерений от наземных и учитывать при этом знак поля, то результат статистической обработки, например, коэффициент корреляции, получается искусственно завышенным, потому что все точки сгруппированы в виде гантели в первом и третьем квадрантах. Для получения более объективной информации о характере зависимости предлагается сопоставлять абсолютные величины полей. Такой подход оправдан, так как в 98 % случаев знак поля совпадал по наземным и космическим данным. Пятна с расхождением в знаке не учитывались.

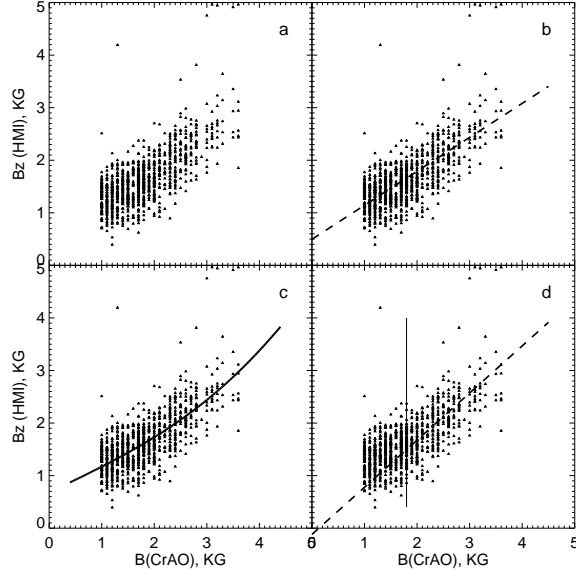
Диаграмма сопоставления абсолютных величин крымских данных ( $B(CrAO)$ ) и космических данных о продольном поле  $B_z(HMI)$  показана на рис. 2. Аналогичная диаграмма о сопоставлении с полным вектором  $B(HMI)$  приведена на рис. 3. Панель *a* показывает, что существует прямо пропорциональная зависимость между данными, однако присутствует намек на нелинейность. Для продольного поля линейная аппроксимация по всем данным (панель *b*) показывает коэффициент корреляции 0.708 и пересечение линии регрессии с вертикальной осью в точке около 0.5 kG и наклон меньше единицы (параметры линейной аппроксимации приведены в табл. 2), что свидетельствует о некотором завышении HMI-измерений на слабых полях и, напротив, занижении на сильных.

В работе (Pevtsov et al., 2019) показано, что при измерении магнитного поля методом, подобным тому, что используется в КрАО, появляется нелинейность, связанная с использованием стеклянной пластинки для измерения сдвига в направлении дисперсии. Расщепление сигма-компонент  $\Delta x$  (которое прямо пропорционально полю, см. выражение (1) в работе Pevtsov et al., 2019) нелинейно связано с измеряемым углом поворота пластинки  $\alpha$  (выражение (2) в работе Pevtsov et al., 2019):

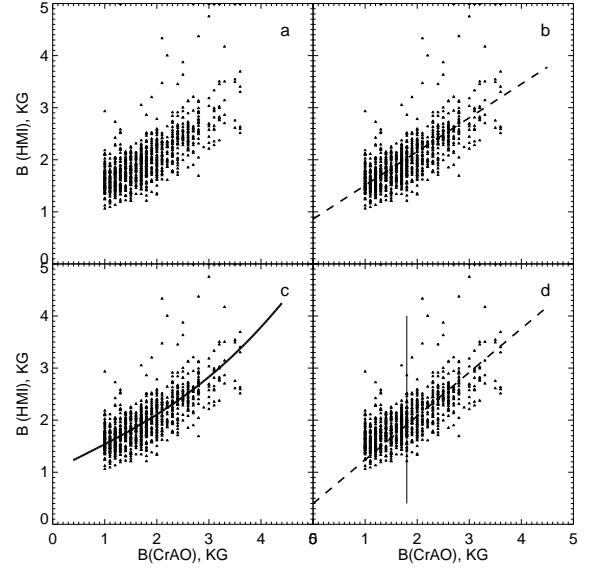
$$\Delta x = t \sin(\alpha) \left( 1 - \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)}} \right), \quad (2)$$

где  $t$  и  $n$  – толщина и коэффициент преломления пластинки. Если принять, что крымские измерения – это проху угла поворота, а космические измерения – проху реального поля, то формулу (2)

<sup>2</sup> <http://jsoc.stanford.edu>



**Рис. 2.** Диаграмма соотношения модуля магнитного поля, измеренного в КрАО, с модулем продольной составляющей магнитного поля, измеренного с помощью SDO/HMI, и различные виды аппроксимации данных: а) нет аппроксимации; б) линейная аппроксимация по всему множеству данных; в) нелинейная аппроксимация по формуле (2); д) линейная аппроксимация по данным  $|B(CrAO)| > 1800$  Гс (вертикальная линия). Оси в единицах килогаусс (kG). Параметры линейной и нелинейной аппроксимаций приведены в табл. 2 и в табл. 3 соответственно



**Рис. 3.** Диаграмма соотношения магнитного поля, измеренного в КрАО, с модулем полного вектора поля, измеренным с помощью SDO/HMI, и различные виды аппроксимации данных: а) нет аппроксимации; б) линейная аппроксимация по всему множеству данных; в) нелинейная аппроксимация по формуле (2); д) линейная аппроксимация по данным  $|B(CrAO)| > 1800$  Гс. Параметры линейной и нелинейной аппроксимаций приведены в табл. 2 и в табл. 3 соответственно

**Таблица 2.** Параметры линейной аппроксимации

| Параметр         | $B(CrAO) - B_z(HMI)$ ,<br>интервал (1–4) kG | $B(CrAO) - B_z(HMI)$ ,<br>интервал (1.8–4) kG | $B(CrAO) - B(HMI)$ ,<br>интервал (1–4) kG | $B(CrAO) - B(HMI)$ ,<br>интервал (1.8–4) kG |
|------------------|---|---|---|---|
| N                | 991   | 377   | 991                                       | 377   |
| $\rho$           | 0.708                                       | 0.650   | 0.712                                     | 0.606                                       |
| 95 %( $\rho$ )   | 0.676–0.737                                 | 0.588–0.704                                   | 0.680–0.741                               | 0.538–0.666                                 |
| $\chi^2$         | 142.7                                       | 73.1  | 140.6                                     | 80.8  |
| reduced $\chi^2$ | 0.144                                       | 0.194   | 0.142                                     | 0.214                                       |
| slope            | $0.646 \pm 0.020$                           | $0.897 \pm 0.054$                             | $0.648 \pm 0.020$                         | $0.840 \pm 0.037$                           |
| $y_{sect}$ , kG  | $0.50 \pm 0.04$                             | $-0.12 \pm 0.13$                              | $0.86 \pm 0.04$                           | $0.40 \pm 0.08$                             |

можно применить для аппроксимации данных. На панелях с рисунков 2 и 3 представлен результат применения нелинейной аппроксимации, следуя выражению:

$$B_z(HMI) = C_0 + C_1 \Delta x, B(HMI) = C_0 + C_1 \Delta x, \quad (3)$$

где масштабирующие коэффициенты  $C_1$  и сдвиги по вертикальной оси  $C_0$  подобраны так, чтобы аппроксимирующая кривая наилучшим образом описывала данные (чтобы значение  $\chi^2$  было по

крайней мере не больше, чем для линейной аппроксимации). Значения параметров аппроксимации приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Параметры нелинейной аппроксимации

| Параметр                | $B(CrAO) - B_z(HMI)$ ,<br>интервал (1–4) kG | $B(CrAO) - B(HMI)$ ,<br>интервал (1–4) kG |
|-------------------------|---|---|
| N                       | 991   | 991                                       |
| $C_0$ , kG              | $0.68 \pm 0.02$                             | $1.04 \pm 0.02$                           |
| $C_1$                   | $1.12 \pm 0.04$                             | $1.14 \pm 0.06$                           |
| $\chi^2$                | 138.9                                       | 137.4                                     |
| <i>reduced</i> $\chi^2$ | 0.140                                       | 0.139                                     |

Согласно критерию  $\chi^2$ , эта аппроксимация лучше, чем линейная (панель *b*), но весьма незначительно. Однако здесь присутствует одна важная особенность, которая не позволяет нам считать этот вид аппроксимации наилучшим и вполне отражающим действительность. А именно, нелинейность между расщеплением и углом поворота характеризуется тем, что она весьма слабая при слабых полях и усиливается при сильных (Pevtsov et al., 2019). Однако распределение данных показывает обратную картину (см. панель *d*): линейная зависимость лучше проявляется на сильных полях, а на слабых полях (менее примерно 1.8 kG) явно прослеживается нелинейное завышение космических данных. Из рис. 2 (панель *d*) следует, что для данных  $B(CrAO) > 1.8$  kG пересечение линии регрессии с вертикальной осью происходит в точке около  $-0.1$  kG, что существенно лучше, чем для линейной регрессии по всем данным (ср. панель *b*) и свидетельствует в пользу того, что в области сильных полей линейность между крымскими и HMI-данными выполняется лучше. Аналогичный вывод можно сделать и из рис. 3. Таким образом, пока нельзя уверенно заключить, что нелинейный характер статистической связи между данными HMI и КрАО обусловлен исключительно особенностями методики крымских измерений.

Сопоставление рисунков 2 и 3, а также данных в таблицах 2 и 3, показывает, что нет существенной разницы в параметрах аппроксимации при сопоставлении крымских данных с продольным либо полным полем HMI. Есть слабый намек на лучшее согласие с  $B_z(HMI)$  (наклон линии регрессии ближе к единице и точка пересечения с вертикальной осью ближе к нулю для пары  $B(CrAO) - B_z(HMI)$ , чем для пары  $B(CrAO) - B(HMI)$ ). Однако этот вывод требует дальнейшего уточнения на более широком статистическом материале.

## 4 Заключение

В ходе выполнения работы переведены в цифровой формат данные о магнитном поле  $B(CrAO)$  с зарисовок примерно 1000 солнечных пятен, наблюдавшихся в КрАО в 2014 году. Эти данные были сопоставлены с данными SDO/HMI (значения магнитного поля по лучу зрения  $B_z(HMI)$  и значения модуля полного вектора магнитного поля  $B(HMI)$ ). Сравнивались максимальные значения модуля поля в одних и тех же пятнах. Результаты сопоставления можно сформулировать следующим образом.

Имеет место прямо пропорциональная зависимость между крымскими данными и космическими данными обоих типов.

Линейная аппроксимация для всего интервала измерений поля (1–4) kG показывает коэффициент корреляции Пирсона 0.71 (95 % доверительный интервал: 0.68–0.74) и наклон линейной регрессии  $0.65 \pm 0.02$  и для  $B_z(HMI)$ , и для  $B(HMI)$ .

На диаграммах ( $B_z(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ) и ( $B(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ) явно прослеживается нелинейность статистической связи: в области более слабых полей  $B(CrAO) < 1.8$  kG статистическая зависимость заметно выполаживается. Линейная аппроксимация в области сильных полей  $B(CrAO) > 1.8$  kG показывает примерно тот же коэффициент корреляции, но значительно более близкий к единице наклон линейной регрессии: 0.90 для ( $B_z(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ) и 0.84 для ( $B(HMI)$  vs

$B(CrAO)$ ). Этот факт означает, что в области сильных полей крымские и HMI-данные лучше соответствуют друг другу, чем в области слабых полей.

Протестирована и нелинейная зависимость, основанная на нелинейном соотношении между измеряемым углом поворота стеклянной пластинки и величиной регистрируемого поля (Pevtsov et al., 2019). Статистически эта аппроксимация лучше, чем линейная, но весьма незначительно. Однако характер этой функциональной нелинейности (квазилинейность на слабых полях и нарастание нелинейности при усилении поля) не согласуется с наблюдаемым типом нелинейности (нелинейное завышение космических значений на слабых полях и улучшение линейной связи на сильных). По-видимому, существуют и другие, неявные причины нелинейности, связанные с особенностями SDO/HMI измерений поля.

Степень статистического согласия крымских данных с продольным полем HMI примерно такая же, как и с полным вектором HMI при весьма слабом преимуществе в пользу продольного поля. Для уточнения этого вывода нужны, по-видимому, дальнейшие исследования на более широком статистическом материале, причем в разные фазы солнечного цикла.

Сделан вывод о том, что данные по измерению магнитного поля в КрАО за 2014 год показывают хорошее согласие со значениями такого современного космического аппарата, как SDO/HMI, поэтому их можно использовать в научных целях.

Отметим, что недавно проведенные сопоставления (Pevtsov et al., 2019) магнитных полей в пятнах по измерениям разных обсерваторий: КрАО, Mount Wilson Observatory (MWO) и инструментом Vector Stokes Magnetograph (VSM) на телескопе Synoptic Optical Long-term Investigation of the Sun (SOLIS) показали хорошее согласие данных и, как следствие, возможность дополнения одного ряда другим без ущерба для надежности выводов. Таким образом, крымские данные по измерениям магнитных полей пятен до сих пор не утратили своей научной ценности.

В будущем мы планируем открыть доступ к данным магнитных полей через Интернет, в частности, в форме сотрудничества с Кисловодской горной астрономической станцией ГАО. Эти данные могут быть использованы для исследования закономерностей солнечной цикличности, в вопросах предсказания последующих солнечных циклов и, следовательно, космической погоды в околоземном пространстве.

**Благодарности.** Авторы благодарят рецензента за ряд очень важных замечаний и предложений, которые помогли существенно улучшить статью.

## Литература

- 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.)]
- Стещенко Н.В., 1967. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 37. С. 21–28. [Steshenko N.V., 1967. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 37, pp. 21–28. (In Russ.)]
- Liu Y., Hoeksema J.T., Scherrer P.H., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 279, pp. 295–316.
- Pevtsov A.A., Tlatova K.A., Pevtsov A.A., et al., 2019. *Astron. Astrophys.*, vol. 628, id. A103.
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 229–259.

## Sunspot magnetic fields: a comparison between the CrAO and SDO/HMI data

*R.A. Biktimirova*<sup>1</sup>, *V.I. Abramenko*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, Mira street 19, Ekaterinburg 620002, Russia  
*bictr97@gmail.com*

<sup>2</sup> Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*vabramenko@gmail.com*

**Abstract.** We performed a digitization of maximum magnetic field measurements in sunspots. The original data were acquired as drawings at the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (CrAO RAS). About 1000 sunspots observed in 2014 have been analyzed. The data were compared to the corresponding measurements from the SDO/HMI instrument (with both the line-of-sight magnetic field  $B_z(HMI)$  and the modulus of the magnetic field vector  $B(HMI)$ ). For the same sunspot, the maximum modulus of the magnetic field derived at CrAO was compared to the corresponding value from HMI. The Crimean data and the space-based data (of the both types) were found to be in direct proportion to each other. A linear approximation over the entire range of measurements (1–4) kilogauss (kG) shows a Pearson correlation coefficient of 0.71 (with the 95 % confidence boundaries of 0.68–0.74) and a slope of linear regression of  $0.65 \pm 0.02$  for the both types of the space-based data. A linear approximation over the range of strong fields  $B(CrAO) > 1.8$  kG gives a similar correlation, however the slope of linear regression is far closer to unity, and constitutes 0.90 for the relationship ( $B_z(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ) and 0.84 for the relationship ( $B(HMI)$  vs  $B(CrAO)$ ). In the range of weak fields  $B(CrAO) < 1.8$  kG a non-linear deviation (exceeding) of the space-based data is observed. Non-linearity can be explained, in part, by a specific routine of the magnetic field measurements at CrAO, however further investigations are needed to explore sources of possible non-linearity in the HMI data. The Crimean measurements of the maximum magnetic field in sunspots are concluded to be in good agreement with the SDO/HMI corresponding measurements, and therefore they can be used for scientific purposes.

**Key words:** Sun, magnetic fields, turbulence