

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 121, № 4, 21–26 (2025)

УДК 523.982

Измерения максимальных магнитных полей солнечных пятен по данным MWO, КрАО и Hinode

*З.С. Ахтемов, Ю.Т. Цап, В.Д. Шапошников, А.А. Плотников*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
azis@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 2 ноября 2025 г.

Аннотация. На основе анализа 4135 измерений максимальных магнитных полей B одних и тех же солнечных пятен, полученных в обсерватории Маунт-Вилсон (MWO) и Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) с 2009 по 2019 г. построены диаграммы рассеяния и гистограммы абсолютной разности измеренных магнитных полей для $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ Гс. Сравнение данных наземной обсерватории с магнитограммами, полученными спектрополяриметром на борту космического аппарата Hinode, показало, что крымские измерения лучше согласуются со спутниковыми данными. Различия по абсолютной величине измеренного поля $|B_{\text{MWO}} - B_{\text{КрАО}}|$ для MWO и КрАО лежат в диапазоне от 0 до 2000 Гс. Обсуждаются возможные причины полученных расхождений. Особое внимание уделено зависимости измеренных магнитных полей от пространственного разрешения инструментов и качества изображений солнечных пятен.

Ключевые слова: Солнце, солнечный цикл, измерения магнитного поля пятен, космический аппарат Hinode

1 Введение

Солнечные пятна – это области фотосферы с высокой концентрацией магнитного потока, состоящие из тени и полутени, которые в белом свете имеют вид более темных образований округлой формы. Хотя они определяют активность Солнца и тесно связаны с теорией динамо, до сих пор нет ясных представлений о механизмах их формирования. Поэтому закономерно, что солнечным пятнам всегда уделялось большое внимание в гелиофизике.

В настоящее время регулярные наземные измерения максимальных значений магнитных полей солнечных пятен, основанные на эффекте Зеемана, проводятся в двух обсерваториях: Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на Башенном солнечном телескопе – 2 (БСТ-2) и в Маунт-Вилсон (MWO) на Solar Tower (Pevtsov et al., 2019; Tsap et al., 2019). Измерение расщепления спектральных линий все еще остается одним из наиболее простых и потому надежных методов оценки магнитного поля пятен, поскольку на результаты не оказывает влияние модель атмосферы Солнца, эффект насыщения сигнала, слабая интенсивность излучения в источнике, инструментальная поляризация и т. д.

Для определения магнитного поля пятен измеряется расстояние между сигма-компонентами простых триплетов, что с помощью калибровочных таблиц позволяет получить максимальные значения поля с точностью около 100 Гс. Измерения в КрАО на БСТ-2 ($D = 45$ см, FeI 6302 Å, $g = 2.5$) и в MWO на Solar Tower ($D = 60$ см, FeI 5250 Å, $g = 3$) проводятся практически по одной методике (Tsap et al., 2019). Между тем на спутнике Hinode для измерения магнитного поля пятен с помощью спектрополяриметра (SP), так же как и в КрАО, используется линия FeI 6302 Å. Высокое пространственное разрешение и стабильное качество данных SP/Hinode позволяют получить детальную информацию как о продольной, так и о поперечной компоненте магнитного поля активной области благодаря измерению параметров Стокса и решению обратной задачи на основе уравнения лучистого переноса Унно – Рачковского.

Ранее [Biktimirova, Abramenko \(2020\)](#) провели детальное сравнение измерений магнитных полей пятен и пор, выполненных в КрАО и на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) с помощью Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), и получили сравнительно хорошее согласие (коэффициент корреляции Пирсона $R \approx 0.71$). [Pevtsov et al. \(2019\)](#) обратили внимание на существенную разницу в измерениях сильных магнитных полей (см. также [Tsap et al., 2019](#)), однако ограничились сравнительно небольшой выборкой пятен (всего 100 измерений) с различной напряженностью магнитного поля за 1994–2003 и 2004–2014 гг. без учета зависимости от диапазона значений. Это предполагает необходимость проведения более детальных исследований.

Цель данной работы – сравнение результатов измерений максимальных напряженностей магнитного поля одних и тех же пятен с $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ Гс, полученных в MWO, КрАО и на спутнике Hinode за период с 2009 по 2019 г.

2 Измерение сильных магнитных полей пятен в MWO, КрАО и на спутнике Hinode

Прежде чем проводить статистический анализ, необходимо отметить, что мы уже сравнивали результаты измерений максимальных напряженностей магнитных полей пятен одних и тех же пятен за период с 2009 по 2019 г., полученных на SP/Hinode (B_{Hinode}), в MWO (B_{MWO}) и в КрАО (B_{CrAO}) для полей с $B_{\text{CrAO}} \geq 2500$ Гс ([Akhtemov, 2023](#); [Ахтемов и др., 2024](#)). В частности, из 1064 крымских измерений магнитных полей, при условии значительной (≥ 500 Гс) разности между полученными значениями в КрАО и MWO, было выбрано 542. С учетом магнитограмм Hinode и определения по ним максимальных напряженностей магнитного поля соответствующих пятен наш список сократился до 197, что все еще представляет собой большую выборку.

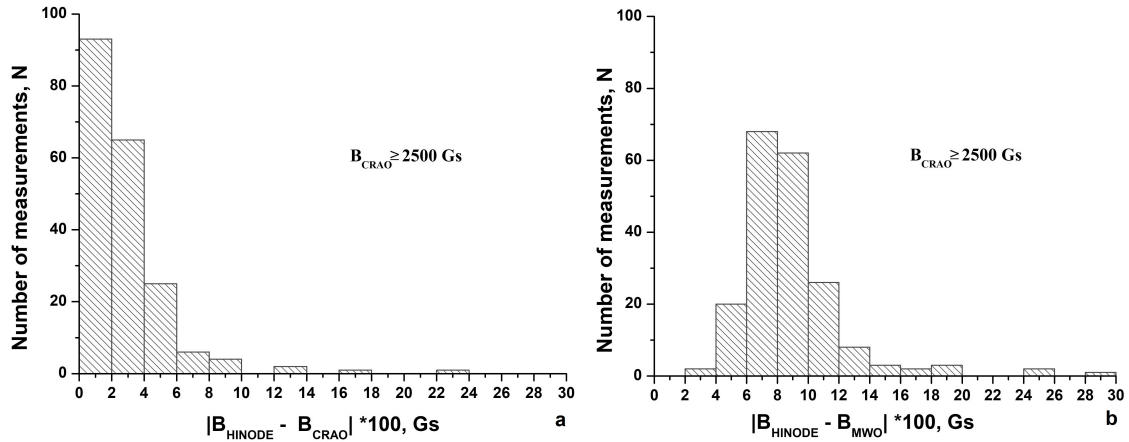


Рис. 1. (а) Гистограмма числа измерений магнитного поля пятен N в зависимости от модуля разности значений $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{CrAO}}|$, полученная по данным измерений в КрАО и на спутнике Hinode. (б) То же, но для модуля разности $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{MWO}}|$ по данным MWO и спутника Hinode

Как видно из результатов (рис. 1 и 2), представленных в более наглядной форме по сравнению с полученными ранее иллюстрациями, максимум гистограммы $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{CrAO}}|$ приходится на интервал 0–400 Гс. Между тем максимум гистограммы $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{MWO}}|$ соответствует 600–1000 Гс, т. е. измерения сильных магнитных полей в MWO и на спутнике Hinode отличаются заметно больше, чем в КрАО и на Hinode. Однако построенные диаграммы рассеяния для значений магнитных полей пятен не дают однозначного ответа на вопрос о том, какие измерения являются более адекватными. На наш взгляд, эту проблему можно решить, если рассмотреть выборку измерений магнитных полей пятен с $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ Гс, а не с $B_{\text{CrAO}} \geq 2500$ Гс, как это было сделано в работах [Akhtemov \(2023\)](#) и [Ахтемов и др. \(2024\)](#). Из дальнейшего изложения станет ясно, что такой подход позволяет получить более ярко выраженные диаграммы рассеяния ввиду специфики измерений магнитных полей в MWO.

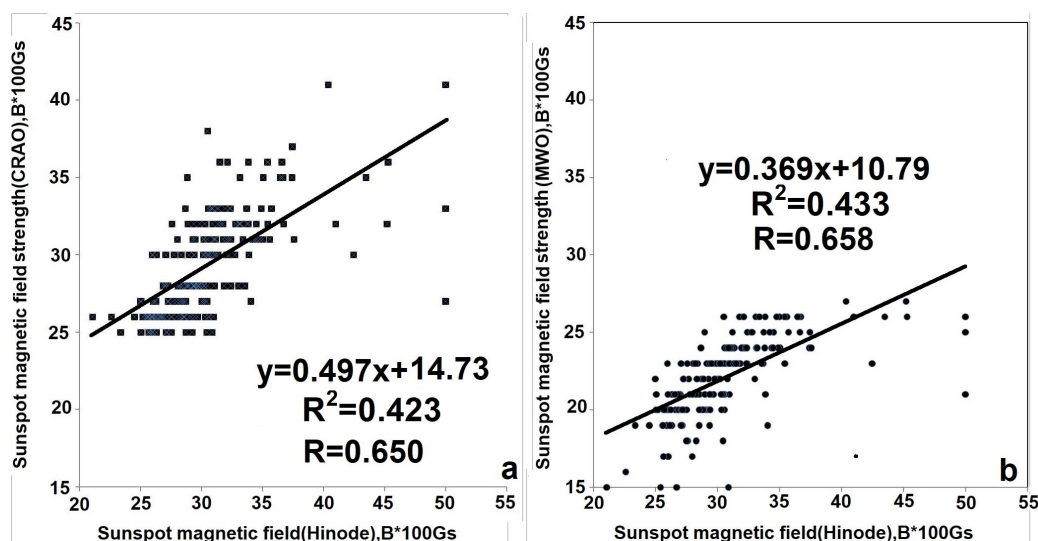


Рис. 2. Диаграммы рассеяния значений магнитного поля пятен. На вертикальной оси отложены значения магнитного поля по данным КрАО (слева) и MWO (справа) за период с 2009 по 2019 г. На горизонтальной оси – соответствующие значения по измерениям на SP/Hinode. Коэффициенты корреляции Пирсона $R = 0.65 \pm 0.04$ (слева) и 0.66 ± 0.04 (справа)

За период с 2009 по 2019 г. с $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ Гс было выбрано 138 измерений из 4135, для которых модуль разности измеренных значений $|B_{\text{MWO}} - B_{\text{CrAO}}|$ варьировался в широком диапазоне от 0 до 2000 Гс. Однако с учетом данных Hinode¹ в нашем списке осталось 73 измерения максимальных напряженностей магнитного поля соответствующих пятен. Отметим, что для определения максимальных значений напряженности по данным SP/Hinode использовалась программа SAOImageDS9. На магнитограммах Hinode с учетом данных БСТ-2 выбиралось интересное нас пятно, для которого и определялось максимальное значение напряженности поля.

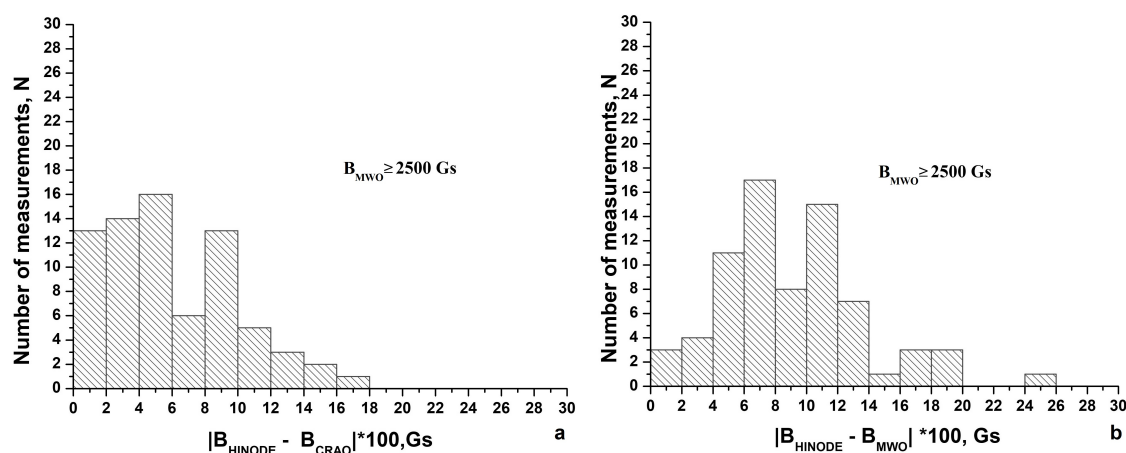


Рис. 3. То же, что и на рис. 1. Максимумы гистограмм приходятся на интервалы 0–600 Гс (a) и 600–800 Гс (b)

Результаты статистического анализа представлены на рис. 3 и 4. Как видно, максимум гистограммы для $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{CrAO}}|$ приходится на интервал 0–400 Гс, тогда как максимум $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{MWO}}|$

¹ https://csac.hao.ucar.edu/sp_data.php

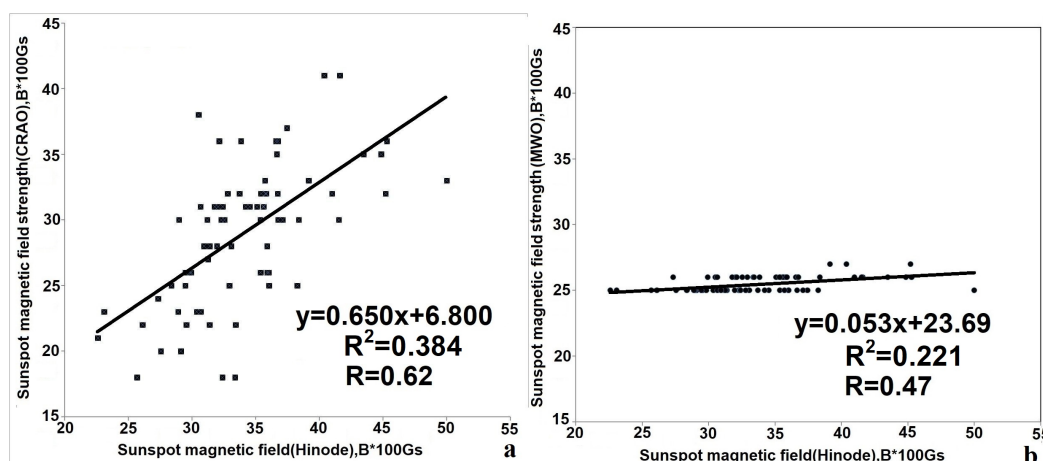


Рис. 4. Диаграммы рассеяния значений магнитного поля пятен. На вертикальной оси отложены значения магнитного поля по данным КрАО (а) и MWO (b) за период с 2009 по 2019 г. На горизонтальной оси – соответствующие значения по измерениям на Hinode. Коэффициенты корреляции Пирсона $R = 0.62 \pm 0.07$ (а) и 0.47 ± 0.09 (b)

соответствует 600–800 Гс. Следовательно, измерения сильных магнитных полей в MWO и на спутнике Hinode отличаются в гораздо большей мере, чем в КрАО и на Hinode. При этом углы наклона линий регрессии отличаются на порядок, в то время как коэффициенты корреляции между данными КрАО и Hinode, а также между данными MWO и Hinode составляют соответственно 0.62 ± 0.07 и 0.47 ± 0.09 . Следовательно, в свете значительных различий по абсолютной величине измеренного поля $|B_{\text{MWO}} - B_{\text{CrAO}}|$, лежащих в диапазоне от 0 до 2000 Гс, крымские измерения сильных магнитных полей солнечных пятен представляются более надежными, чем полученные в MWO.

Стоит отметить, что наземные измерения дают более низкие значения максимальных полей. На наш взгляд, это можно объяснить высоким пространственным разрешением Solar Optical Telescope (SOT), установленном на Hinode. Действительно, угловое разрешение SOT/Hinode достигает ~ 0.3 угл. сек, тогда как у наземных оптических инструментов, рассматриваемых в данной работе, из-за влияния атмосферы оно обычно равно нескольким угловым секундам. Это предполагает, что измерения в КрАО и MWO проводятся для больших областей в тени пятен соответственно с меньшей концентрацией магнитного потока.

3 Обсуждение результатов и выводы

Как следует из сравнительного анализа результатов измерений максимальных напряженностей сильных (≥ 2500 Гс) магнитных полей солнечных пятен, полученных в MWO, КрАО и на SP/Hinode за период с 2009 по 2019 г., несмотря на сравнительно хорошую корреляцию результатов измерений напряженностей, имеются и существенные различия. Максимум модуля разности измеренных значений магнитных полей одних и тех же пятен для КрАО и Hinode $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{CrAO}}| = 0\text{--}600$ Гс, а для MWO и Hinode $|B_{\text{Hinode}} - B_{\text{MWO}}| = 600\text{--}800$ Гс. При этом коэффициенты корреляции данных измерений магнитных полей пятен, полученных в КрАО, MWO и на спутнике Hinode за период с 2009 по 2019 г. для $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ Гс соответственно равны 0.62 ± 0.07 и 0.47 ± 0.09 . Перечисленные выше результаты предполагают, что измерения максимальных напряженностей магнитного поля пятен в КрАО надежнее, чем в MWO.

Обнаруженная существенная разница между измерениями магнитного поля в КрАО и MWO по сравнению с данными Hinode, на наш взгляд, могла быть обусловлена следующими причинами:

- не совсем корректной калибровкой;
- краевыми эффектами;
- субъективностью наблюдателей (Lozitska et al., 2015);
- конструктивными особенностями используемого оборудования;
- состоянием атмосферы Земли;

- существенной разницей во времени, достигающей ~ 15 ч между измерениями одних и тех же пятен в КрАО и MWO;
- разной высотой формирования линий (Гуртовенко, Костык, 1989).

Заниженные значения максимальных магнитных полей пятен по данным КрАО и MWO можно объяснить более низким разрешением наземных инструментов по сравнению с SOT/Hinode из-за влияния земной атмосферы.

Хотелось бы также обратить внимание, что Livingston et al. (2006) в результате анализа истории оборудования, использовавшегося в MWO, пришли к заключению, что в ходе измерений магнитных полей нелинейность стеклянной пластины (микрометра), используемой для определения величины зеемановского расщепления линии, при больших тилт-углах наклона недостаточно учитывается наблюдателями. На эту особенность также обратили внимание Pevtsov et al. (2019), связавшие отсутствие полей напряженностью $B > 2600$ Гс с малой толщиной пластины (см. Tsap et al., 2019). Между тем, несмотря на эти публикации, до сих пор на сайте MWO представлены данные измерений, содержащие большие погрешности для сильных магнитных полей. Их использование, как было нами показано, может приводить к заметным ошибкам, поскольку разница в значениях между КрАО и MWO может достигать 2000 Гс.

Работа выполнена в рамках госзадания № 122022400224-7.

Литература

- Ахтемов З., Цап Ю., Малащук В., 2024. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 120. № 1. С. 5–11.
[Akhtemov Z., Tsap Y., Malaschuk V., 2024. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 120, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)]
- Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., 1989. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. К.: Наук. думка. 200 с. [Gurtovenko E.A., Kostyk R.I., 1989. *Fraunhofer spectrum and a system of solar oscillator strengths*. K.: Nauk. dumka. (In Russ.)]
- Akhtemov Z.S., Tsap Yu.T., Malaschuk V.M., 2023. *Geomagn. Aeronom.*, vol. 63, no. 8, pp. 1144–1148.
- Biktimirova R., Abramenko V., 2020. *Acta Astrophys. Tau.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5.
- Livingston W., Harvey J.W., Malanushenko O.V., Webster L., 2006. *Solar Phys.*, vol. 239, pp. 41–68.
- Lozitska N.I., Lozitsky V.G., Andryeyeva O.A., et al., 2015. *Adv. Space Res.*, vol. 55, pp. 897–907.
- Pevtsov A. et al., 2019. *Astron. Astrophys.*, vol. 628, id. A103, pp. 1–14.
- Tsap Yu.T., Perebeynos V.A., Borisenko A.V., et al., 2019. *Astron. Astrophys. Trans.*, vol. 31, iss. 3, pp. 363–368.

Measurements of the maximum magnetic fields of sunspots based on MWO, CrAO, and Hinode data

Z.S. Akhtemov, Yu.T. Tsap, V.D. Shaposhnikov, A.A. Plotnikov

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
azis@craocrimea.ru

Abstract. We analyze 4135 measurements of the maximum magnetic fields B of the same sunspots obtained at the Mount Wilson Observatory (MWO, USA) and the Crimean Astrophysical Observatory (CrAO) from 2009 to 2019 and construct scatter diagrams and histograms of the absolute difference in the measured magnetic fields for $B_{\text{MWO}} \geq 2500$ G. A comparison between the ground-based observatory data and the magnetograms obtained by the spectro-polarimeter on board the Hinode spacecraft showed that the Crimean measurements are in better agreement with the results obtained by Hinode. The differences in the absolute value of the measured field $|B_{\text{MWO}} - B_{\text{CrAO}}|$ lie in the range from 0 to 2000 G. Possible reasons for the obtained discrepancies are discussed. Particular attention is given to the dependence of the measured magnetic fields on the spatial resolution of instruments and the quality of sunspot images.

Key words: Sun, solar cycle, sunspot magnetic field measurements, Hinode spacecraft