

УДК 523.982

## Магнитное поле пятен в 24-м цикле солнечной активности по данным измерений в Крыму и Маунт-Вилсон

З.С. Ахтемов, Ю.Т. Цап, В.М. Малащук

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
azis@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2023 г.

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ 6235 измерений максимальных магнитных полей одних и тех же солнечных пятен, полученных в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) и обсерватории Маунт-Вилсон (MWO) за период с 2009 по 2019 гг., напряженность которых  $B$  по данным КрАО превышает 1.5 кГс. Установлено, что средние значения магнитных полей по наблюдениям в КрАО и MWO составляют соответственно 2053 и 1914 Гс. Коэффициент корреляции между измерениями магнитных полей в разных обсерваториях равен  $0.63 \pm 0.01$ , и по мере увеличения  $B$  он уменьшается. Для солнечных пятен с  $B \geq 2.5$  кГс разница между средними значениями магнитных полей превышает 500 Гс. Максимальные магнитные поля пятен за рассматриваемый период по данным КрАО и MWO соответственно равны 4.6 и 2.7 кГс. Обсуждаются возможные причины полученных расхождений.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечный цикл, измерения магнитного поля пятен

### 1 Введение

Магнитное поле Солнца, определяющее его активность, концентрируется в тени солнечных пятен. Нет ничего удивительного, что в настоящее время во многих обсерваториях космического и наземного базирования проводится непрерывный мониторинг напряженности магнитного поля пятен. Несмотря на значительные технические достижения в этой важной области гелиофизики, не теряют своей актуальности наиболее простые и соответственно надежные, проверенные временем методы, основанные на анализе простых триплетов Зеемана. В этом случае с помощью использования анализатора круговой поляризации измеряются расстояния между сигма-компонентами, которые пропорциональны напряженности магнитного поля. Такие измерения проводятся в обсерватории Маунт-Вилсон (MWO) с 1917 г. по настоящее время. Однако временной ряд MWO по разным причинам нельзя считать непрерывным вплоть до 2007 г. (Livingston et al., 2006; Hale et al., 1919; Pevtsov et al., 2019). В свою очередь, в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на Башенном солнечном телескопе – 2 (БСТ-2) измерения магнитных полей солнечных пятен проводятся с 1957 г. (Степанов, Петрова, 1958).

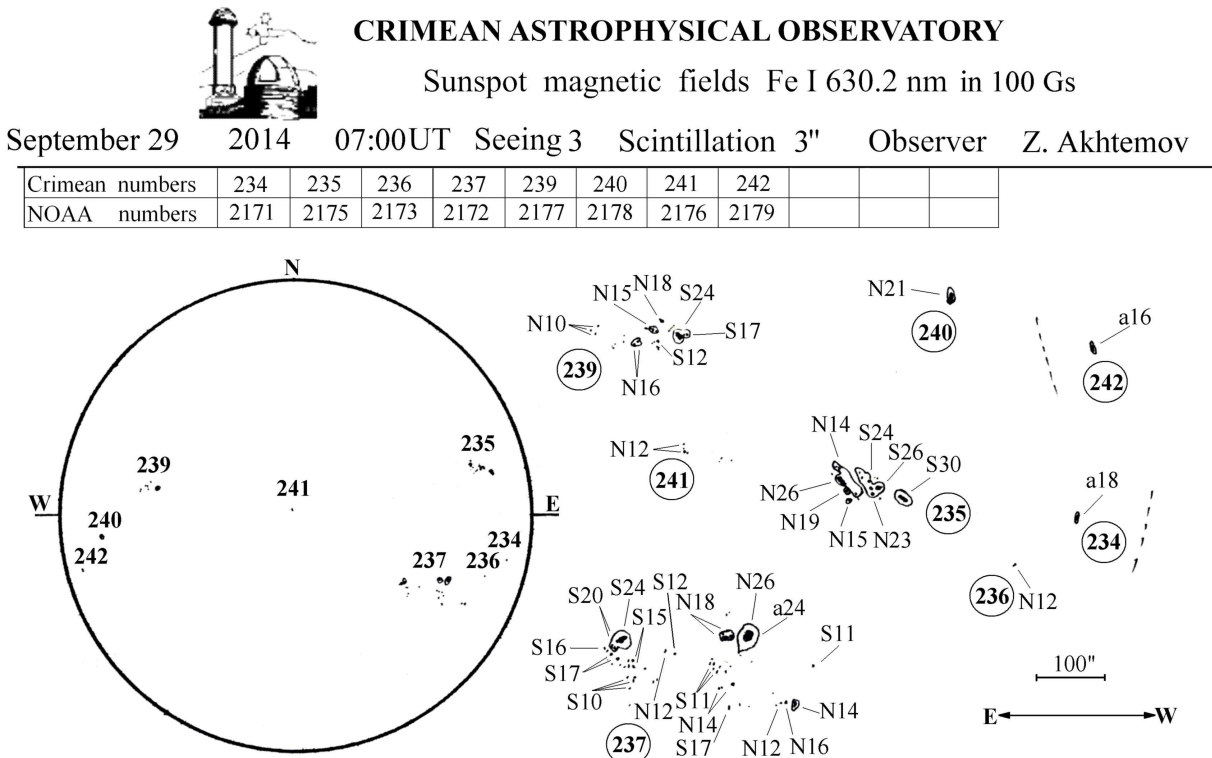
Ранее в работе Tsap et al. (2019) уже проводилось сравнение измерений максимальных магнитных полей одних и тех же пятен по данным КрАО и MWO с учетом временного сдвига от 8 до 15 часов. Однако авторы ограничились анализом пятен с напряженностью  $B \geq 2.5$  кГс (по данным КрАО) за период с 31.07.2010 по 01.10.2017. Коэффициент корреляции Пирсона для данных измерений в КрАО и MWO оказался равным 0.22, что, вероятнее всего, связано с недостатками калибровки измерений сильных полей в MWO (Tsap et al., 2019). Кроме того, возможная причина столь низкого значения коэффициента корреляции могла быть связана с недостатками методики обработки данных в работе Tsap et al. (2019). В частности, в массиве данных КрАО учитывались все измерения заданного пятна за период наблюдений, тогда как по данным MWO – лишь одно соответствующее значение. Lozitska et al. (2015) также проводили детальное сравнение результатов измерений магнитных полей пятен в КрАО и MWO за период с 2010 по 2012 гг. Однако при этом сравнивались выборки в целом, без кон-

кретизации соответствующих объектов измерений. Кроме того, учитывалась полярность солнечных пятен, что предполагает разделение выборки измерений на две группы.

В предыдущей работе [Akhtemov et al. \(2023\)](#) уже проводился анализ эволюции среднеквартальных максимальных напряженностей магнитных полей одних и тех же групп солнечных пятен с  $B \geq 1500$  Гс, полученных в MWO и КрАО на БСТ-2 за период с 2015 по 2019 гг. Однако авторы ограничились сравнением магнитных полей для весьма ограниченной выборки в области минимума 25-го цикла. Корреляция между группами пятен в заданных интервалах напряженностей магнитного поля также не рассматривалась. Поэтому цель представленной работы – провести сравнительный анализ максимальных напряженностей магнитного поля одних и тех же пятен с  $B \geq 1500$  Гс,  $\geq 2000$  Гс и  $\geq 2500$  Гс, полученных в MWO ( $B_{MWO}$ ) и КрАО ( $B_{CRAO}$ ) за период с 2009 по 2019 гг.

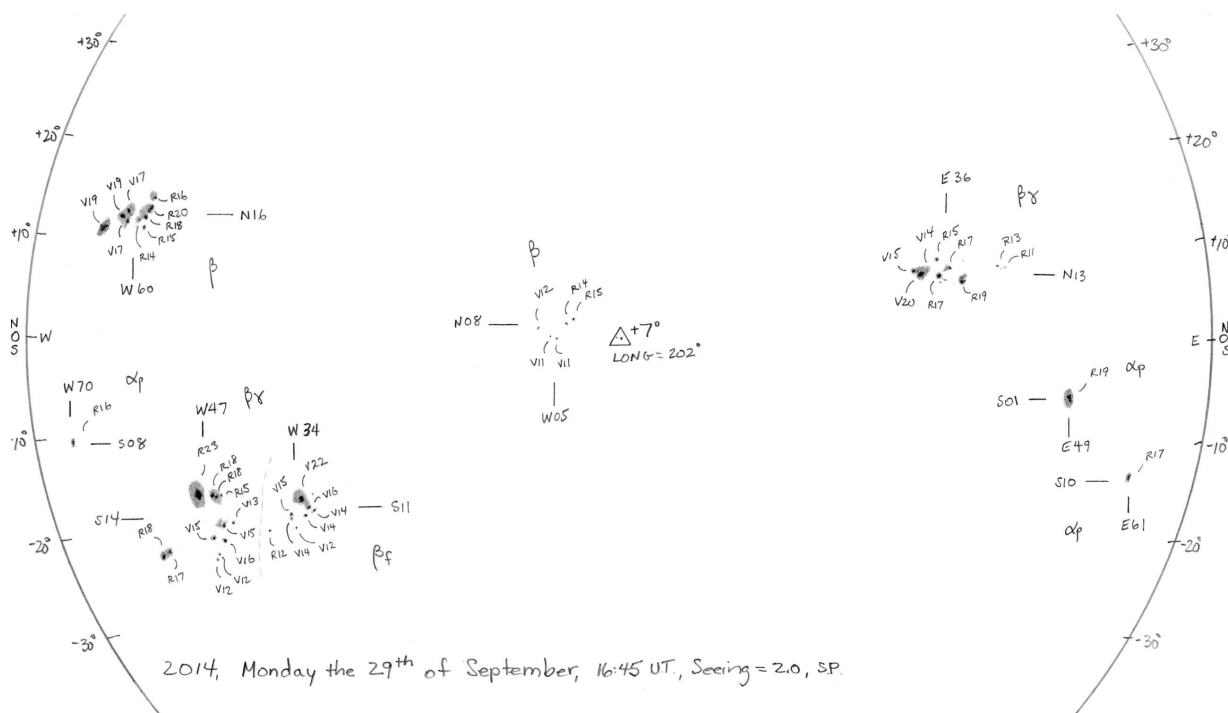
## 2 Наблюдения и их обработка

На горе Вилсон, где в среднем насчитывается около 330 ясных дней в году, в исследуемый нами период на башенном телескопе Solar Tower проводились наблюдения в линии железа FeI 5250 Å с фактором Ланде  $g = 3$  ([Livingston et al., 2006](#)). Между тем в Крыму магнитное поле измерялось на БСТ-2 в линии FeI 6302 Å с  $g = 2.5$  ([Северный, Степанов, 1956](#); [Степанов, Петрова, 1958](#)), а число ясных дней в году (пгт Научный) составляет около 220. Точность измерений на обоих инструментах не превышала 100 Гс. Более детальную информацию о характеристиках используемых инструментов и методов измерений можно найти в работе [Tsap et al. \(2019\)](#).

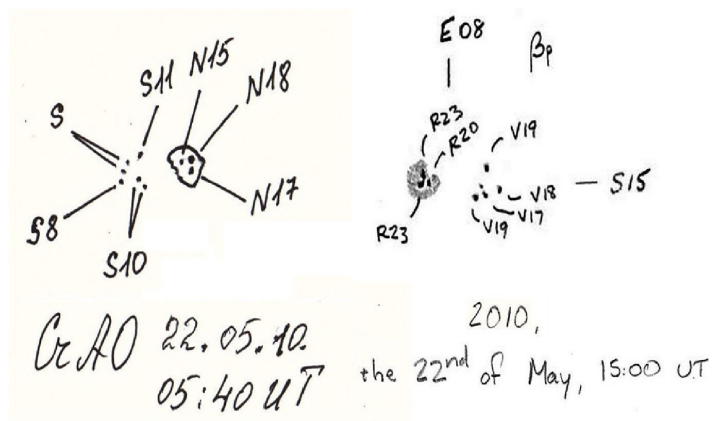


**Рис. 1.** Зарисовка пятен с измеренными магнитными полями по наблюдениям 29.09.2014 в КрАО

Максимальные значения магнитного поля солнечных пятен, полученные на БСТ-2 КрАО, обрабатывались и выставлялись на сайте обсерватории в виде зарисовок, одна из которых показана на рис. 1. Обратим внимание, что таблица на рис. 1 позволяла находить соответствие между номерами активных областей, которые присваиваются каждой группе пятен с начала года в Крымской обсерватории, и номерами активных областей по классификации National Oceanic and Atmospheric



**Рис. 2.** Зарисовка пятен с измеренными магнитными полями по наблюдениям 29.09.2014 в MWO, полученная с запаздыванием около 9 часов относительно данных измерений в КрАО (рис. 1)



**Рис. 3.** Пример сравнения измерений магнитного поля группы пятен по данным КрАО (слева) и MWO (справа)

**Таблица 1.** Пример сравнения измерений максимальных напряженностей магнитного поля ( $\geq 1500$  Гс) одних и тех же солнечных пятен группы, полученных в КрАО и MWO

Дата измерения	MWO	КрАО
25.10.2009	17	15
	18	15
	22	15
26.10.2009	24	20
27.10.2009	24	22
	18	18
	22	22
30.10.2009	20	21
10.11.2009	15	17

Administration (NOAA). Для пятен и пор, помимо значений магнитного поля, определялась также его полярность. Южная и северная магнитная полярности обозначались соответственно буквами *S* и *N*. В MWO данные представлялись также в виде зарисовок солнечного диска, повернутого на 180° относительно конфигурации диска, принятого в КрАО, с координатами групп, но без их номеров (рис. 2). Буквами *R* и *V* обозначены магнитные поля соответственно северной и южной полярности, а буквами *N*, *S*, *E*, *W* – координаты групп пятен на солнечном диске.

Мы сравнили значения магнитных полей одних и тех же пятен, следующие из спектральных измерений расщепления зеемановских компонент, проводимых соответственно в обсерватории Маунт-Вилсон и на БСТ-2 КрАО с 2009 по 2019 гг. без учета полярности.

Пример сравнения измерений магнитных полей солнечных пятен в КраО и MWO показан на рис. 3. Отметим, что разница по времени для рассматриваемого случая составила около 9 часов.

Обработанные данные 6235 измерений, соответствующие друг другу наилучшим образом с учетом временного сдвига между пунктами наблюдений, сводились в таблицу, часть которой нами представлена ниже (табл. 1). Как видно, зачастую группа могла насчитывать несколько пятен с напряженностью, превышающей заданную величину магнитного поля. При этом разница в напряженностях могла достигать 700 Гс.

## 2.1 Статистический анализ измерений магнитных полей пятен в КраО и MWO

Визуализация данных из указанной выше таблицы в виде диаграмм, представляющих собой распределение числа измерений пятен (всего число измерений – 6235) в зависимости от величины их магнитного поля с  $B \geq 1500$  Гс и интервалом 200 Гс, показана на рис. 4. В первую очередь обращает

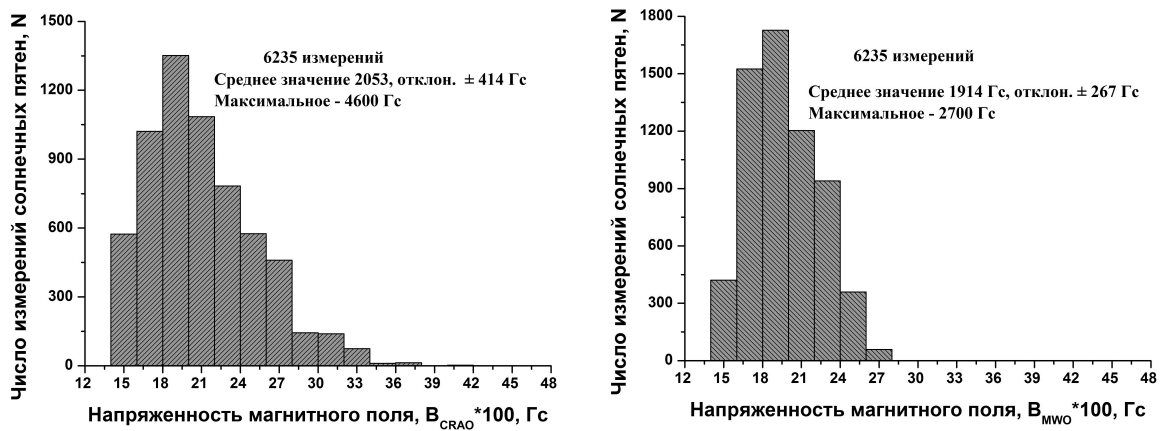


Рис. 4. Зависимость числа измерений солнечных пятен от напряженности магнитного поля, полученных по данным КраО (слева) и MWO (справа) за период с 2009 по 2019 гг. для  $B \geq 1500$  Гс

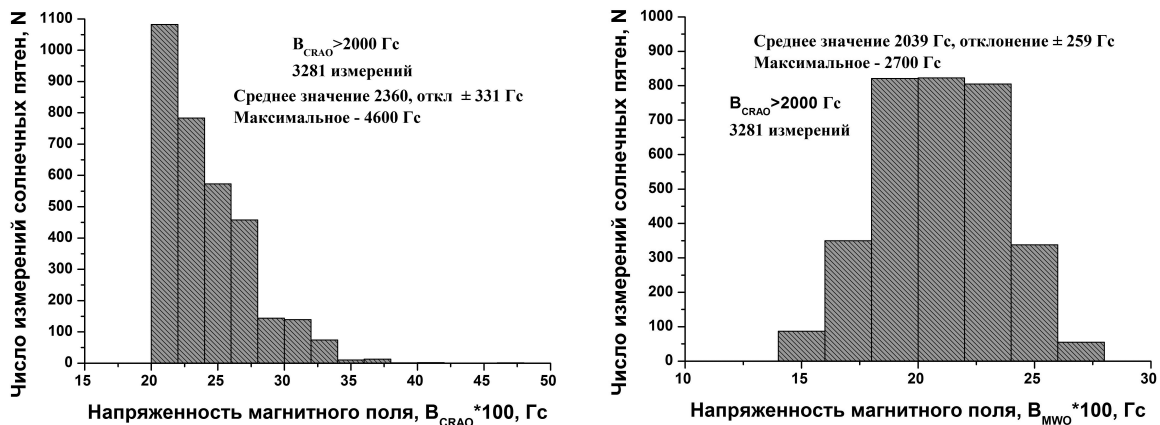
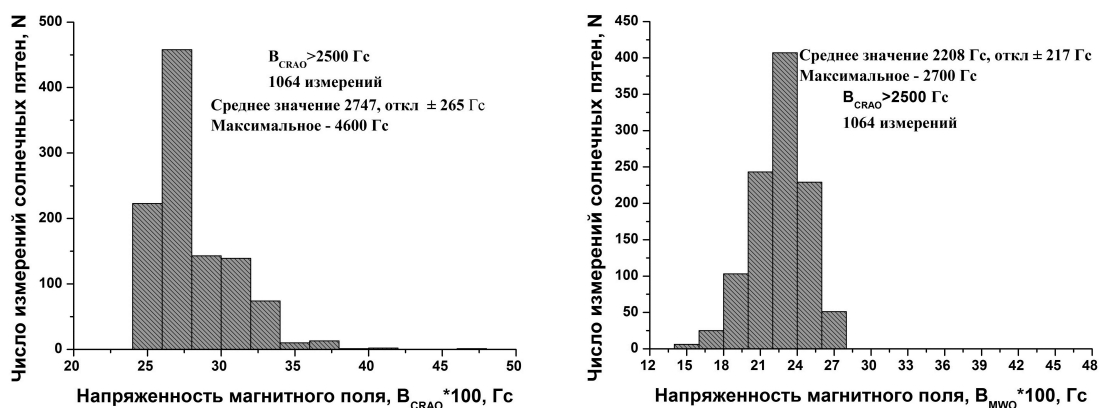


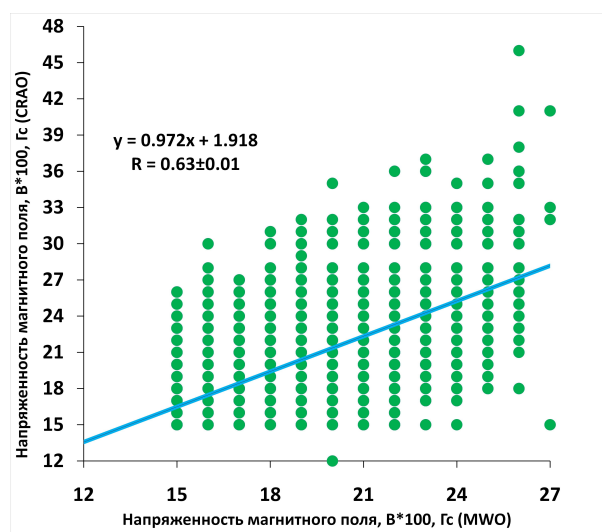
Рис. 5. Зависимость числа измерений солнечных пятен от напряженности магнитного поля, полученных по данным КраО (слева) и MWO (справа) за период с 2009 по 2019 гг. для  $B \geq 2000$  Гс

на себя внимание, что наиболее часто встречающиеся значения магнитного поля в обеих обсерваториях приходятся на интервал 1600–2200 Гс. При этом средние значения  $B_{\text{av}}$  по наблюдениям в КраО и MWO соответственно равны 2053 и 1914 Гс, тогда как максимальные напряженности за весь период наблюдений составили 4600 и 2700 Гс.



**Рис. 6.** Зависимость числа измерений солнечных пятен от напряженности магнитного поля, полученных по данным КраО (слева) и MWO (справа) за период с 2009 по 2019 гг. для  $B \geq 2500$  Гс

Если выделить из общего массива данных КраО значения магнитного поля пятен с  $B \geq 2000$  Гс и определить соответствующие им значения измерений в MWO, то при визуализации получим диаграммы, показанные на рис. 5. В этом случае общее число измерений уменьшилось почти в два раза и составило 3281. Однако теперь по данным КраО чаще всего встречаются магнитные поля с  $B = 2000\text{--}2600$  Гс и  $B_{\text{av}} = 2360$  Гс. Между тем, согласно MWO, пик числа измерений приходится на интервал  $1800\text{--}2400$  Гс и  $B_{\text{av}} = 2039$  Гс. Обращает на себя внимание увеличение разницы между средними значениями  $B_{\text{av}}$ , которое теперь составило 321 Гс.



**Рис. 7.** Диаграмма рассеяния измерений магнитного поля в КраО (вертикальная ось) и MWO (горизонтальная ось)

казал, что коэффициенты корреляции между значениями магнитных полей пятен, полученных в MWO и КраО при  $B \geq 2000$  и  $\geq 2500$  Гс, соответственно равны  $0.52 \pm 0.01$  и  $0.35 \pm 0.03$ .

### 3 Обсуждение результатов и выводы

Спектральный метод измерения магнитных полей все еще остается наиболее простым и надежным. Это объясняется тем, что на результаты не оказывает влияние модель атмосферы, эффект насыщения сигнала, слабая интенсивность излучения в источнике, инструментальная поляризация и т. д. Несмотря на разницу по времени между измерениями не менее 8 часов, значения магнитных полей соответствующих пятен с  $B \geq 1500$  Гс, полученные в КраО и MWO за период с 2009 по 2019 гг.,

Наконец, взяв массив данных КраО с  $B \geq 2500$  Гс и сравнив соответствующие измерения в MWO, получим гистограммы распределения лишь для 1064 измерений напряженности магнитного поля пятен (рис. 6). При этом по данным КраО максимум числа измерений приходится на интервал  $2500\text{--}2800$  Гс и  $B_{\text{av}} = 2747$  Гс, тогда как по данным MWO соответственно имеем  $2000\text{--}2600$  Гс и  $B_{\text{av}} = 2208$  Гс. Таким образом, разность  $B_{\text{av}}$  существенно увеличивается и достигает значения, превышающего 500 Гс.

Диаграмма рассеяния между значениями магнитных полей пятен с  $B \geq 1500$  Гс, полученными в КраО и MWO, представлена на рис. 7. Как показали численные расчеты, за исследуемый период наблюдений с 2009 по 2019 гг. коэффициент корреляции Пирсона оказался равным  $0.63 \pm 0.01$ , что свидетельствует об удовлетворительном согласии между измерениями в КраО и MWO. Однако более детальный анализ пока-



хорошо согласуются. Между тем для пятен с  $B \geq 2500$  Гс коэффициент корреляции заметно падает и составляет лишь  $0.35 \pm 0.03$ . Гистограммы на рис. 5 и 6, имеющие различный вид, предполагают, что измерения в КрАО и MWO магнитных полей с  $B \geq 2000$  Гс существенно различаются. В частности об этом свидетельствуют наибольшие значения полученных напряженностей в КрАО (4.6 кГс) и MWO (2.7 кГс), а также коэффициенты корреляции для разных интервалов  $B$ . На наш взгляд, обнаруженное несоответствие, вероятнее всего, обусловлено не совсем корректной калибровкой (Tsap et al., 2019), краевыми эффектами, связанными с углом между направлением магнитного поля и лучом зрения, субъективностью наблюдателей и конструктивными особенностями используемого оборудования. Важную роль может также играть рассеянный свет, вызванный атмосферой Земли, дрожание изображений, неточная установка на щель спектрографа центра пятна (Северный, Степанов, 1956), что требует дополнительных исследований.

Кратко сформулируем основные результаты работы:

1. Для данных 6235 измерений магнитных полей одних и тех же пятен с  $B \geq 1500$  Гс в КрАО и MWO коэффициент корреляции Пирсона равен  $0.63 \pm 0.01$ .
2. В обеих обсерваториях максимальное число измерений пятен приходится на интервал 1600–2200 Гс.
3. Измерения в MWO в среднем дают заниженные значения магнитного поля пятен по сравнению с данными КрАО, а разность значений  $B_{av}$  с ростом  $B$  заметно увеличивается и для пятен с  $B \geq 2500$  Гс достигает значения, превышающего 500 Гс.
4. Максимальные значения магнитного поля пятен за рассматриваемый период по данным КрАО и MWO соответственно равны 4600 и 2700 Гс.
5. По данным КрАО и MWO коэффициенты корреляции Пирсона для пятен с  $B \geq 2000$  и 2500 Гс соответственно равны  $0.52 \pm 0.01$  и  $0.35 \pm 0.03$ .
6. Средние значения магнитных полей пятен  $B_{av}$  с  $B \geq 1500$ , 2000 и 2500 Гс для КрАО составили 2053, 2360 и 2747 Гс соответственно, тогда как для MWO  $B_{av} = 1914$ , 2039 и 2208 Гс.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ (No. 22-12-0030, Ю.Т. Цап) и Минобрнауки (НИР No. 1021051101548-7-1.3.8, З.С. Ахтемов).

## Литература

- Северный А.Б., Степанов В.Е., 1956. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 16. С. 3. [Severnyi A.B., Stepanov V.E., 1956. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 16, pp. 3–11. (In Russ.)]
- Степанов В.Е., Петрова Н.Н., 1958. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 18. С. 66. [Stepanov V.E., Petrova N.N., 1958. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 18, pp. 66–95. (In Russ.)]
- Akhtemov Z.S., Tsap Yu.T., Malaschuk V.M., 2023. *Geomagn. Aeronom.*, vol. 63, no. 8, pp. 1144–1148.
- Hale G.E., Ellerman F., Nicholson S.B., Joy A.H., 1919. *Astrophys. J.*, vol. 49, pp. 153–178.
- 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.

## Sunspot magnetic fields in the 24th solar activity cycle on measurements at Crimea and Mount Wilson

*Z.S. Akhtemov, Yu.T. Tsap, V.M. Malashchuk*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*azis@craocrimea.ru*

**Abstract.** A comparative analysis of 6235 measurements of maximum magnetic fields of the same sunspots with the intensity  $B$  exceeding 1.5 kG on CrAO data was carried out with the Crimean Astrophysical Observatory (CrAO) and the Mount Wilson Observatory (MWO) from 2009 to 2019. It has been established that the average values of magnetic fields obtained at CrAO and MWO are 2053 and 1914 G, respectively. The correlation coefficient between magnetic field measurements at different observatories is  $0.63 \pm 0.01$ , and it decreases with  $B$ . The difference between the average values of magnetic fields exceeds 500 G for sunspots with  $B \geq 2.5$  kG. The maximum sunspot magnetic fields for the period under consideration according to the CrAO and MWO data are 4.6 and 2.7 kG, respectively. Possible reasons for data discrepancies are discussed.

**Key words:** Sun, solar cycle, sunspot magnetic field measurements