

УДК 523.982 + 523.37

**Сравнение результатов визуальных измерений магнитных полей крупных солнечных пятен, выполненных в разных обсерваториях в 23 цикле солнечной активности**

*Н.И. Лозицкая<sup>1</sup>, Г.В. Лямова<sup>2</sup>, В.М. Малащук<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Астрономическая обсерватория Киевского университета, Украина [nloz@observ.univ.kiev.ua](mailto:nloz@observ.univ.kiev.ua)

<sup>2</sup> Астрономическая обсерватория Уральского университета, Россия, [obser@uraltc.ru](mailto:obser@uraltc.ru)

<sup>3</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный [mvm@crao.crimea.ua](mailto:mvm@crao.crimea.ua)

Поступила в редакцию 12 февраля 2006 г.

**Аннотация.** Проведено сравнение пар данных визуальных измерений магнитных полей солнечных пятен, выполненных в одни и те же дни в разных обсерваториях. Вычислены среднегодовые значения модуля магнитных полей солнечных пятен по измерениям каждой обсерватории – индекс  $B_{ns}$  и по сумме всех обсерваторий – индекс  $B_{sp}$ . Изучены межгодовые вариации магнитных полей солнечных пятен в 23 цикле солнечной активности. Найден достоверный рост  $B_{sp}$  в период с 1996 по 2004 гг., который подтвержден таким же ростом индекса максимальных напряженностей групп пятен  $B_{max}$ . Средние значения магнитуд магнитных полей пятен в 23 цикле достоверно выше, чем в трех предшествующих циклах. Исследование включает данные программ измерений магнитных полей солнечных пятен в Киевской, Крымской, Уральской обсерваториях и синоптической программы обсерватории Маунт Вилсон.

THE COMPARISON OF RESULTS OF VISUAL MEASUREMENTS OF LARGE SUNSPOT MAGNETIC FIELD CARRIED OUT IN DIFFERENT OBSERVATORIES IN SOLAR CYCLE 23, by N.I. Lozitskaya, G.V. Lyamova, V.M. Malaschuk. The data of sunspot magnetic field measurements carried out on the same days at different observatories were compared. Averaged annual module of magnetic field values for each observatory  $B_{ns}$  and for all observatories  $B_{sp}$  were calculated. Interannual variations of sunspot magnetic field in cycle 23 were studied. The essential increase of  $B_{sp}$  from 1996 to 2004 was found and confirmed by the same increase of maximal sunspot group magnetic field strengths  $B_{max}$ . Average values of magnetic field magnitudes in cycle 23 are really higher, than in three last cycles. This study includes data from the programs of sunspot magnetic field measurements at Kiev, Crimean and Ural observatories and from the synoptic program at Mt. Wilson Observatory.

**Ключевые слова:** солнечные пятна, визуальные измерения магнитных полей солнечных пятен, индексы солнечной активности.

---

## Введение

23-й цикл солнечной активности начался в мае 1996 г., максимум его был в апреле 2000 г., инверсия общего магнитного поля зарегистрирована в июле – декабре 2000 г., второй максимум числа пятен наблюдался в ноябре 2001 г., фаза максимума длилась от октября 1999 до июня 2002 гг., наиболее мощные вспышки произошли в октябре – ноябре 2003 г. и минимум ожидается в конце 2006 г. (Ишков, 2005). Исследование смены знака фотосферного полярного поля показало, что в более активном северном полушарии смена полярностей произошла в конце 2000 г., а в южном – в 2001 г. (Ванг, Шили и Андрес, 2002). В работах, посвященных изучению особенностей 23-го цикла солнечной активности, сделан вывод о том, что настоящий цикл является магнитно-слабым (Атач и Оргуч, 2006; Ливингстон, 2002).

Особое внимание уделено изучению северо-южной асимметрии различных параметров. Найдено, что в северном полушарии в 1998–2003 гг. ядра пятен были более темными, чем в южном, средняя интенсивность ядер северного полушария достигла минимума в максимуме солнечной активности. В южном полушарии изменения интенсивности ядер было менее выраженным (Нортон и Гилман, 2004).

Отрицательная асимметрия площадей в начале цикла сменилась на положительную в 1998 г. с двумя пиками в 1999 и 2001 гг. (активность северного полушария преобладала над южным в течение 3-х лет), в 2002 г. асимметрия снова стала отрицательной (Жарков, Жаркова, Ипсон, 2005).

Эмпирические модели предполагают, что большая часть вариаций излучения может быть объяснена поверхностными магнитными структурами, а они описываются индексами солнечной активности. В то же время ультрафиолетовое излучение и полный поток Солнца в максимуме 23-го цикла относительно выше, чем такие индексы, как число пятен и полный магнитный поток (Пэп, 2003). Причиной отличий может быть факт, что величина магнитного потока, измеренного как с поверхности Земли, так и с SOHO-MDI, зависит от параметров тонкой структуры магнитного поля и от ограничения разрешения атмосферой и приемником излучения. При визуальных измерениях магнитных полей крупных пятен результат менее зависим от указанных факторов, чем при магнитографических измерениях.

Наша работа посвящена методике вычисления и исследованию межгодовых вариаций в 23 цикле солнечной активности индексов, полученных из визуальных измерений магнитных полей пятен – среднегодовых значений модуля магнитных полей солнечных пятен диаметром 30–60 сек дуги, названных индексами  $V_{sp}$  (Лозицкая, 2005), и описанного ранее (Витинский, 1973) индекса средних максимальных напряженностей групп пятен за год  $V_{max}$ , рассчитанного нами по измерениям обсерватории Маунт Вилсон.

## Данные наблюдений

Использованы данные визуальных измерений магнитных полей солнечных пятен Крымской, Киевской, Уральской и Маунт Вилсон обсерваторий. Измерения проводились в обсерваториях Киева и Маунт Вилсон в линии FeI 5250Å, а в Крымской и Уральской – в линии FeI 6302Å. Кроме этих обсерваторий, измерения магнитных полей пятен с 1989 года проводятся также в обсерватории Кит Пик в инфракрасной линии железа Fe I 15648Å, некоторые результаты представлены в работе (Ливингстон, 2002), но данные измерений для селекции пятен по размерам пока недоступны. Выбор линии незначительно влияет на точность, с которой измеряются напряженности. Большие значения имеют инструментальные факторы и величина дрожания изображения края солнечного диска. Для сравнения условий наблюдений были вычислены среднегодовые значения дрожания для каждой обсерватории. В Крымской обсерватории величина дрожания изменяется от 0.5 до 12 сек. дуги (среднее 4), в Киевской – от

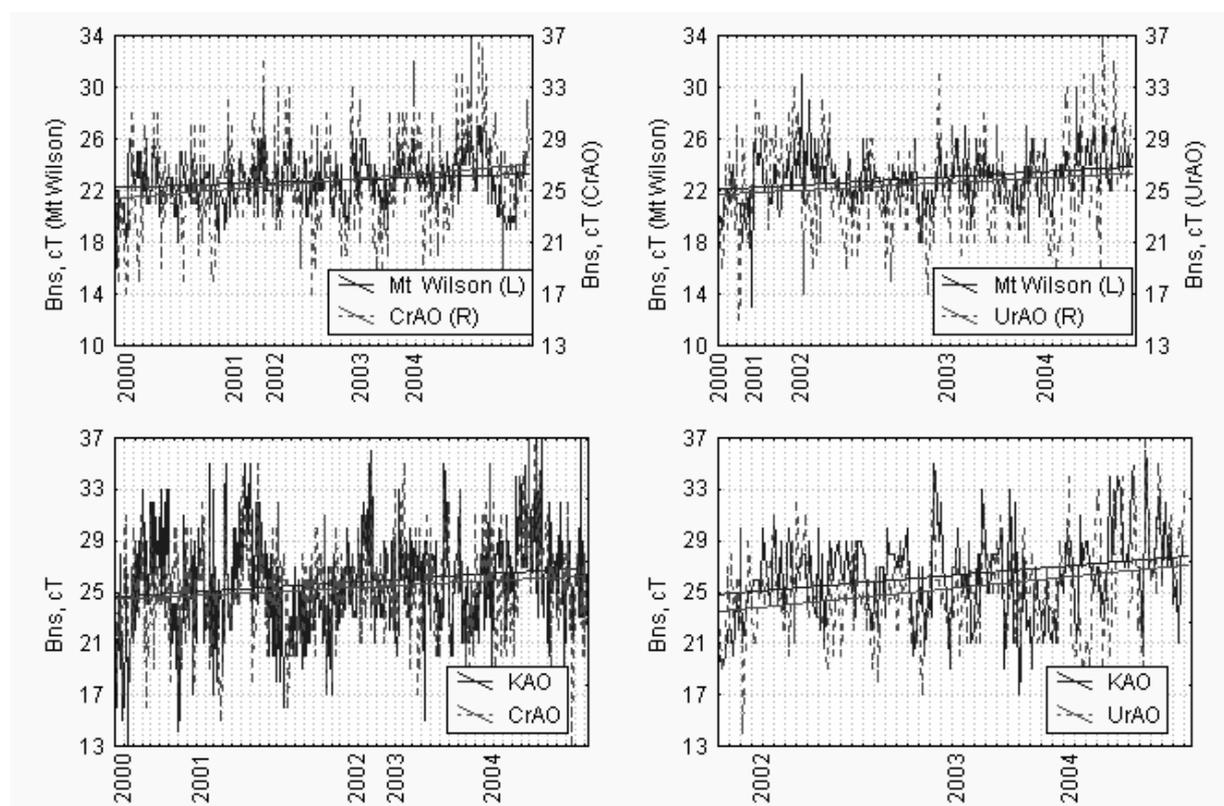
1 до 13 (среднее 5), Уральской – от 3 до 20 (среднее 8), в Маунт Вилсон тот же диапазон амплитуд дрожаний лимба, что и в Крыму, при средней величине 3 сек. дуги.

Ежегодное усреднение данных измерений магнитных полей из всех обсерваторий при неизменной программе наблюдений обеспечивает равный вклад каждой обсерватории и позволяет исключить влияние на межгодовой ход  $B_{sp}$  таких факторов, как отдельные периоды плохой погоды, сезонный ход дрожания и различный солнечный астроклимат в обсерваториях.

### Сопоставление результатов наблюдений на разных обсерваториях

Проведено сравнение данных визуальных измерений магнитных полей солнечных пятен, выполненных в одни и те же дни в разных обсерваториях.

Из рисунка 1 видно, что, несмотря на разброс отдельных результатов измерений в обсерваториях Маунт Вилсон и Крымской, в Уральской обсерватории и Маунт Вилсон, средние величины магнитного поля в этих парах обсерваторий в указанные годы совпадают, если увеличить данные обсерватории Маунт Вилсон на 3 сТ. Данные обсерваторий Уральской, Киевской и Крымской не нуждаются в поправках, так как средние значения расходятся меньше, чем на 1 сТ.

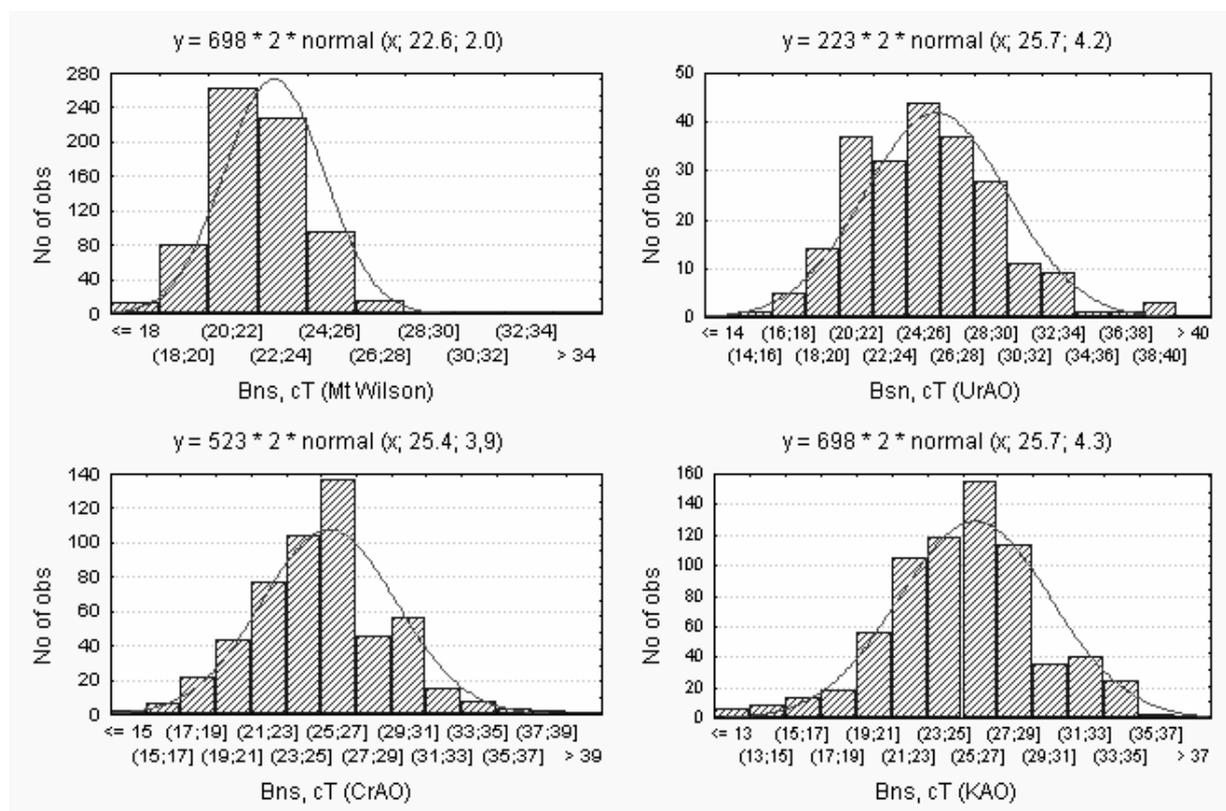


**Рис. 1.** Сопоставление величин магнитного поля, измеренного в отдельных пятнах в одни и те же дни в парах обсерваторий в 2000–2004 гг.

Также видно возрастание магнитных полей, измеренных во всех обсерваториях с 2000 по 2004 годы. Для дальнейшей математической обработки было изучено распределение данных измерений в каждой обсерватории.

Гистограммы, представленные на рис. 2, показывают, что распределение измеренных напряженностей крупных пятен близко к нормальному. Асимметрия и эксцесс 4-х летних массивов данных не превышают трех стандартных ошибок. Лишь одно измерение из 700 в массиве данных Маунт Вилсон не укладывается в нормальное распределение, повышая эксцесс, если его не отбросить.

Для каждой обсерватории были вычислены среднегодовые значения модуля напряженности магнитного поля пятен  $B_{ns}$ , и затем получено среднее по всем обсерваториям значение индекса  $B_{sp}$ . Также изучен ход NS-разбаланса поля, полученный по данным всех измерений.



**Рис. 2.** Распределение данных измерений магнитного поля пятен 30–60 сек. дуги, проведенных в 2000–2004 гг. в обсерваториях Крымской, Киевской, Уральской и Маунт Вилсон. Над графиками указаны количество измерений, использованное для построения гистограммы, шаг 2 cT и параметры нормального распределения – среднее значение и стандартное отклонение модуля магнитного поля  $B_{ns}$ .

В таблице 1 приведены коэффициенты корреляции между парами данных измерений в 2000–2004 гг. для крупных пятен. Величина стандартного отклонения массивов данных в 1,5–2 раза выше ошибок одного измерения, которые обычно равны 150–200 Гс. Причина такого превышения – отличия в условиях наблюдений в разные дни и сезоны, вклад пятен разного размера. Поскольку пятна в течение суток измерялись разными обсерваториями в доступное

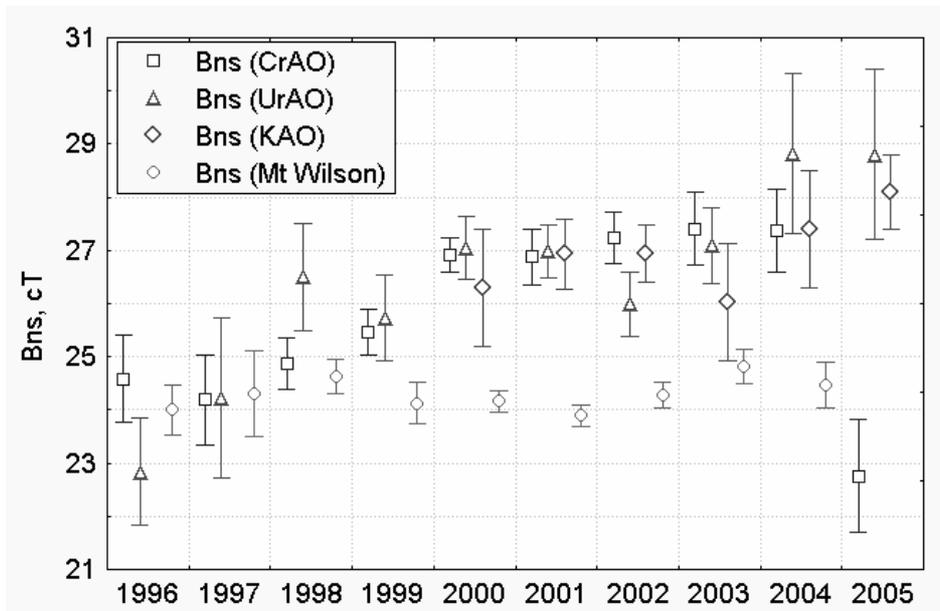
для них время наблюдений, быстрые изменения напряженностей магнитного поля пятен давали существенный разброс в измеренных величинах.

В ряде измерений обсерватории Маунт Вилсон стандартное отклонение не всегда было столь малым как теперь. Для наблюдений в 15–17 циклах солнечной активности оно составляло 3,5 сТ, а в 18–22 циклах увеличилось до 4,4 сТ. С началом 23 цикла стандартное отклонение уменьшено вдвое, а средние величины магнитных полей пятен, измеренных в обсерватории Маунт Вилсон, занижены на 3 сТ (10 стандартных ошибок) по сравнению с тремя другими обсерваториями.

В ноябре 1994 г. на башенном телескопе обсерватории Маунт Вилсон была установлена новая дифракционная решетка с большей дисперсией, при этом шкала микрометра поворачивающейся пластинки не исправлялась, а позже введена коррекция его показаний. Повидимому, при определении поправочного коэффициента допущена ошибка, сравнение величин стандартного отклонения до и после замены решетки показывает, что калибровочный коэффициент нужно удвоить. Средние напряженности, измеренные в парах других обсерваторий, отличаются не больше, чем на 1 сТ, до 3 стандартных ошибок.

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции между парами данных измерений магнитных полей солнечных пятен в обсерваториях в 1999–2004 гг. Последняя строка таблицы – стандартные отклонения в сантитеслах. Первая цифра – для пятен 30–60 сек. дуги, вторая, в скобках – для всех измеренных одно- и двудерных пятен с диаметром тени более 10–15 сек. дуги.

	КАО	КрАО	УрАО	MtWilson
КрАО	0.53 (0.51)	–	–	–
УрАО	0.44 (0.37)	0.50 (0.47)	–	–
MtWilson	0.51 (0.51)	0.54 (0,44)	0.59 (0.47)	–
St. dev.	4.2 сТ (4.6)	3.9 сТ (4.1)	4.3 сТ (4.7)	2.0 (2.2) сТ



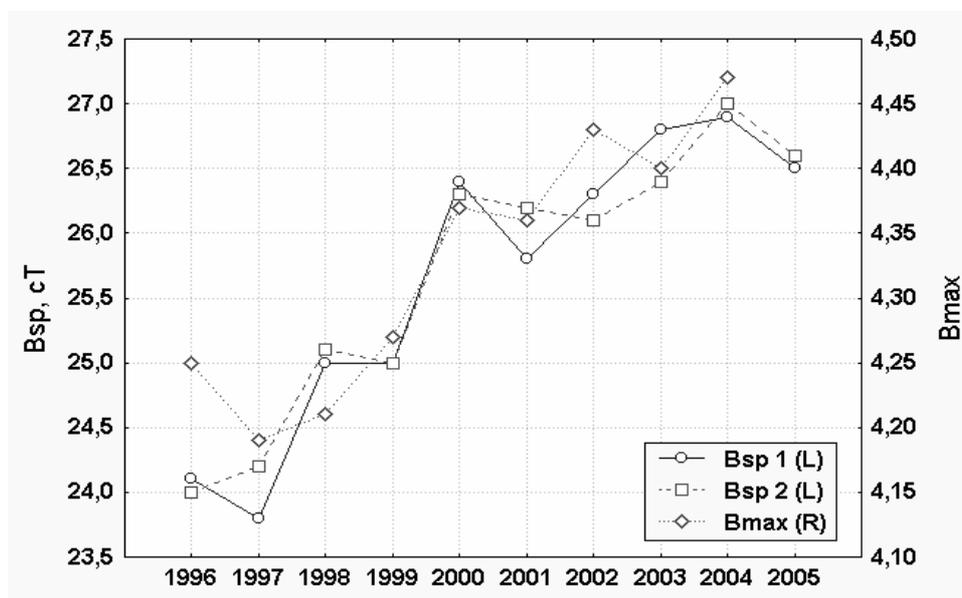
**Рис. 3.** Сопоставление среднегодовых значений модуля напряженности магнитных полей солнечных пятен, полученных по данным четырех обсерваторий.

Несмотря на занижение напряженностей в 23 цикле, корреляция данных обсерватории Маунт Вилсон с измерениями других обсерваторий самая высокая и для их использования необходима лишь калибровочная поправка.

Из рис. 3 видно, что по данным Маунт Вилсон и Крымской обсерваторий наибольшие величины магнитного поля пятен наблюдались в 2003–2005 гг., а по данным Уральской и Киевской – в 2004–2005 гг. Немногочисленные крупные пятна первых месяцев 2006 года по измерениям Лозицкого В.Г. в Киеве показывают, что магнитные поля в среднем равны 27 сТ.

### Вариации средней величины магнитного поля солнечных пятен в 23-м цикле

Усреднение данных всех обсерваторий позволяет получить индекс  $V_{sp}$ , с помощью которого можно осуществлять мониторинг магнитных полей солнечных пятен. На рисунке 4 представлен ход этого индекса, полученного двумя способами, и ход индекса максимальных напряженностей магнитного поля групп пятен  $V_{max}$ .



**Рис. 4** Рост напряженности магнитного поля солнечных пятен в 23-м цикле солнечной активности, представленный индексами  $V_{sp}$  и  $V_{max}$  (см. текст). Ошибки  $V_{sp}$  равны 0.1–0.3 сТ, ошибки  $V_{max}$  равны 0.01–0.04.

На рисунке  $V_{sp}$  1 – среднегодовые значения модуля магнитного поля пятен 30–60 сек. дуги, полученные как средневзвешенные величины всего массива годовых измерений из 4 обсерваторий.  $V_{sp}$  2 – то же, но значения получены усреднением по обсерваториям без учета количества измерений на каждой из них. Стандартная ошибка изменялась от 0.1 сТ в максимуме солнечной активности до 0.3 сТ в годы минимального количества пятен на Солнце.  $V_{max}$  – индекс среднегодовых максимальных ежедневных напряженностей магнитного поля групп.  $V_{max}$  мы вычислили по данным максимальной измеренной напряженности групп пятен, которые можно найти на сайтах обсерватории Маунт Вилсон и NOAA ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUNSPOT\\_REGIONS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/)) Наибольшие величины магнитного поля групп кодируются по схеме: 1 – до 500 Gauss, 2 – 600–1000, 3 – 1100–1500, 4 – 1600–2000, 5 – 2100–2500 и так далее, до 10 при напряженности поля свыше 4500 Gauss.

Из рис. 4 видно, что на протяжении 23-го цикла солнечной активности магнитные поля солнечных пятен значительно усилились (достоверность этого результата больше, чем 99.9%). Рост видно как из межгодового хода нашего индекса, полученного двумя описанными способами, так из других данных – из индекса  $B_{\max}$ . Увеличение значений магнитных индексов, полученных из прямых визуальных измерений, более чем в 10 раз превышает средние ошибки их определения.

Этот рост не может быть объяснен увеличением средних размеров пятен в выбранном узком диапазоне диаметров 30–60 сек. дуги в течение 23-го цикла. При минимальной солнечной активности средний диаметр полутени пятен правильной формы в выбранном диапазоне равен 36 сек. дуги, а при максимальной – 39 сек. дуги. Линейная аппроксимация зависимости напряженности – диаметр на участке размеров, больших 30 сек. дуги, имеет тангенс наклона 0,1–0,2, причем он обратно пропорционален средней величине дрожания изображения. Из диаграмм регрессии “напряженность–диаметр” следует, что при изменениях распределения пятен по диаметру в цикле солнечной активности индекс  $B_{sp}$  может меняться не более чем на 0,6 сТ. Возможно, увеличение напряженности с ростом диаметра – не реально существующий эффект, а результат замыкания ядра полутени при дрожании изображения. Из этого следует, что если не ограничить рассматриваемые пятна по минимальному размеру, невозможно корректно сопоставить данные с разных инструментов для получения общего индекса, поскольку они будут представлять собой распределения с достоверно отличающимися средними значениями и дисперсией.

Средние площади пятен, как легко вычислить из ежедневных солнечных данных (DSD) и данных групп пятен, были наибольшими в 2001–2002 г., а затем уменьшались на протяжении трех лет. Максимальные значения  $B_{sp}$  наблюдались на два года позже, достигнув 27 сТ в 2004 г. Таким образом, вариации магнитного поля пятен выбранного диапазона диаметров не могут быть объяснены только изменениями средних площадей отдельных пятен, есть действительные межгодовые вариации напряженностей магнитного поля в пятнах равного размера. Возможно, вариации  $B_{sp}$  визуализируют реальные межгодовые изменения магнитного поля мелкомасштабных магнитных трубок, существующих как в активных областях, так и вне их.

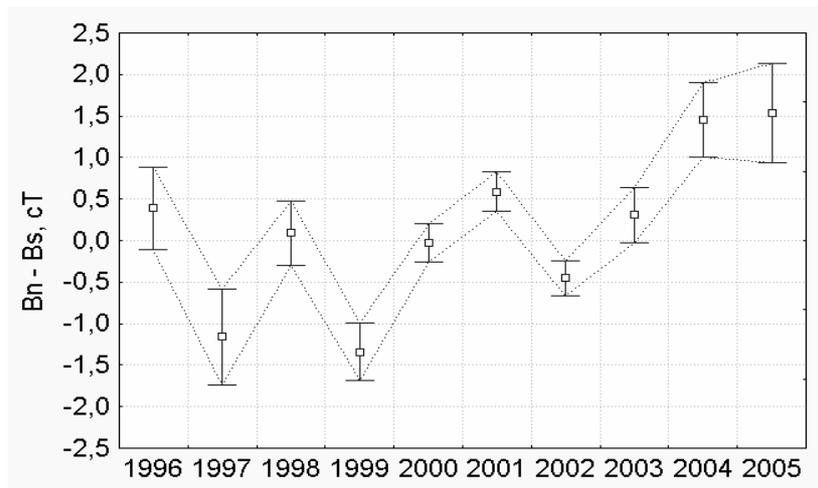
Если бы мы ввели поправочный коэффициент к данным обсерватории Маунт Вилсон, который составляет в 23-м цикле по нашим оценкам  $3.0 \pm 0.2$  сТ, величина  $B_{sp}$  увеличилась бы до 28 сТ в 2004 г. Такие высокие значения модуля напряженности магнитных полей крупных пятен наблюдались по данным обсерватории Маунт Вилсон (неполный ряд, представленный на сайте) только около 1918–1919 гг. и по данным обсерватории Уральского университета около 1975–1977 гг. (другие обсерватории в 1970-х годах получали более низкие поля). Но мы не можем нарушить однородности непрерывного ряда индекса  $B_{sp}$ , внося поправку только в 23-м цикле солнечной активности, когда для обсерватории Маунт Вилсон очевидна как причина, так и величина занижения измеренных напряженностей, поскольку для других обсерваторий, данные которых использованы в вычислении  $B_{sp}$ , систематические ошибки инструментального характера, которые были десятки лет назад, теперь определить трудно, часто – невозможно.  $B_{sp}$  получен усреднением по 3–8 обсерваториям в год, поэтому систематические ошибки выступали как случайные, и важным является не откорректированная величина максимального поля в пятнах (она всегда занижена из-за наличия неразрешимой тонкой структуры магнитного поля), а межгодовые изменения этого индекса.

### **Вариации NS-асимметрии магнитного поля солнечных пятен в 23-м цикле**

В 23 цикле активности ведущая полярность была одноименна с полушарием. Исходя из данных NS-асимметрии площадей (Жарков, Жаркова, Ипсон) и величин площади пятен на всем диске из DSD (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SGD>), наибольший разбаланс площадей пятен по полуша-

риям наблюдался в 2001 г. (площади в северном полушарии были больше на 240 млн. долей полусферы, чем в южном). Из рис. 5 видно, что наибольшая разница между напряженностями пятен северной и южной полярности найдена в 1997, 1999 гг. (преобладание S-поля) и в 2004–2005 гг. (преобладание N-поля).

Таким образом, разбаланс магнитного поля не является непосредственным следствием разбаланса площадей пятен по полушариям, вариации этих двух параметров сдвинуты во времени на несколько лет.



**Рис. 5** Межгодовые вариации N-S разбаланса напряженностей магнитных полей солнечных пятен. Указаны удвоенные стандартные ошибки.

## Обсуждение результатов

Исследование межгодовых вариаций напряженности магнитных полей солнечных пятен опровергает утверждение о том, что 23-й цикл солнечной активности магнитно-слабый. Средние значения  $B_{sp}$  в 23-м цикле равны 24,3 сТ, что на 1,4 сТ больше средних значений в 20–22 циклах (достоверность отличия более 0,999), таким образом цикл 23 по магнитным характеристикам более сильный, чем предшествующие. Если бы увеличение магнитного поля пятен было связано только с ростом средних размеров пятен в выбранном для исследования ограниченном диапазоне диаметров, то межгодовые вариации напряженностей не превысили бы 6%. Разбаланс полярностей также не объясняется NS-разбалансом площадей пятен. Изменение параметров мелкомасштабных магнитных полей и окружающей их атмосферы лучше проявляется в максимальных измеренных напряженностях крупных пятен, чем в магнитографически измеренных потоках. Этим объясняется отмеченное (Пэп, 2003) различие в ходе разных индексов в 23-м цикле солнечной активности.

Вариации магнитного потока обусловлены как изменениями напряженности магнитных элементов, так и долей занимаемой ими площади в пятнах и непятенных участках, поэтому магнитографические индексы не являются чисто магнитными.

Похоже, независимо от 11- и 22-летних циклов, существуют также изменения средних напряженностей магнитного поля пятен с другими периодами. Если эти вариации окажутся регулярными и связанными с числом пятен, появится возможность использовать ряд  $B_{sp}$  для прогноза параметров следующих циклов.

Авторы благодарны всем наблюдателям, инженерам и составителям баз данных 4-х обсерваторий, которые участвовали в измерениях магнитных полей солнечных пятен в 23 цикле солнечной активности.

## Литература

- Атач и Озгуч (Ataç T., Özgüç, A.) // Solar Phys. 2006. V. 233. P. 139.
- Ванг, Шили, Андрес (Wang Y., Sheeley N., Andrews M.) // Journ. Geophys. Res. 2002. V. 107. pp. SSH 10-1. Cite ID 1465.
- Витинский Ю.И. // Цикличность и прогнозы солнечной активности. Ленинград. "Наука". 1973. С. 258.
- Жарков, Жаркова и Ипсон (Zharkov, S., Zharkova V., Ipson S.) // Solar Phys. 2005. V. 228. P. 377.
- Ишков (Ishkov, V.) // Solar System Research. 2005. V. 39. P. 453.
- Ливингстон (Livingston) // Solar Phys. 2002. V. 207. P. 41.
- Лозицкая (Lozitska) // Kinematics and Physics of Celestial Bodies 2005. Suppl. № 5. P. 151.
- Нортон, Гилман (Norton A., Gilman P.) // ApJ. 2004. V.603. P. 348.
- Пэп (Pap J.) // The Sun's surface and Subsurface: Investigating Shape. 2003. V. 599 P. 129.