

УДК 523.98

Магнитные поля солнечных пятен по данным наблюдений в период 1917–2013 гг.

К.А. Тлатова, В.В. Васильева, А.Г. Тлатов

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, ул. Гагарина, 100, г. Кисловодск
tlatov@mail.ru

Поступила в редакцию 29 октября 2013 г.

Аннотация. Выполнена оцифровка магнитных полей солнечных пятен обсерватории Маунт Вилсон в период 1917–2013 гг. Создана база данных, которая включает координаты, площадь и величину магнитного поля ядер солнечных пятен и пор. Изучены долговременные вариации магнитных полей пятен. Показано, что долговременные тренды напряженности магнитных полей пятен зависят от их размера. Для малых пятен наблюдается локальный минимум в середине 20-го века и рост в 1960–1900 гг. Для больших пятен, напротив, заметна тенденция к уменьшению напряженности после 1960-х годов. Рассмотрен дисбаланс пятен ведущей и хвостовой полярностей и также дисбаланс при северо-южной асимметрии. Наибольший дисбаланс наблюдался в середине 20-го века. Установлено, что зависимость напряженности магнитного поля от расстояния от центра диска различна для пятен малой и большой площади, что связано с различным направлением вектора магнитного поля.

VARIATIONS OF SUNSPOT MAGNETIC FIELDS IN 1917–2013, *by K.A. Tlatova, V.V. Vasil'eva, A.G. Tlatov.* We performed the digitization of sunspot magnetic fields obtained at Mount Wilson Observatory during 1917–2013. The data include the coordinates, area and magnetic field strength of sunspots. According to measurements of magnetic fields taken at Mount Wilson Observatory the long-term variations in sunspot magnetic fields have been studied. It is shown that long-term trends of the magnetic fields may be due to changes in the observing system, especially important for small sunspots. The imbalance of sunspots of leading and trailing polarities as well as imbalance of north-south asymmetry are considered. The largest imbalance was observed in the mid 20th century. The dependence of magnetic field strength on the distance from the disk center proved to be different for sunspots of small and large area. It is associated with different directions of the magnetic field.

Ключевые слова: солнечные пятна, магнитное поле, долговременные изменения

1 Введение

Магнитное поле является основной характеристикой, определяющей свойства солнечных пятен. Магнитные поля могут наблюдаться на уровне фотосферы при помощи эффекта Зеемана. Максимальная напряженность магнитных полей достигает в ядрах солнечных пятен значений $\sim 2 \div 4$ кГс и уменьшается к внешней границе пятна, достигая величины несколько сотен Гс.

Синоптические наблюдения магнитных полей пятен начались в начале 20-го века и продолжают в настоящее время. Анализ долговременных вариаций магнитных полей пятен может дать уникальную информацию о природе солнечной цикличности. В исследовании (Лозицкая, 2005) найдено уменьшение магнитных полей солнечных пятен с 1920–1940-х к 1960-м гг., а также установлено их увеличение в период 1960–2008 гг. (Лозицкая, 2010а). В работе Певцова и др. (2011) рассмотрены наблюдения сети Советских магнитометрических станций в период 1957–1996 гг., продолженных наблюдениями КрАО в период после 1990 г. Анализ проводился по пятнам с наибольшей напряженностью магнитного поля в день и не выявил существенных трендов. В статье Певцова и др. (2013) изучены напряженности магнитных полей пятен по данным наблюдений обсерватории Маунт Вилсон в период 1920–1958 гг. Исходными данными служили таблицы наблюдений магнитных полей Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP). Так же как и в работе (Певцов и др., 2011) использовались максимальные магнитные поля в день. Этот анализ показал, что имеется максимум напряженности магнитных полей пятен в середине прошлого века и уменьшение напряженности в начале и конце 20-го века. Такой результат отражает ранее найденную корреляцию между магнитным полем и площадью пятен (Рингнес, Дженсен, 1960), поскольку рост напряженности магнитных полей обусловлен ростом средней площади пятен в циклах большой амплитуды, но не согласуется с результатами анализа (Лозицкая, 2005, 2010а).

Таким образом, различные исследования дают противоречивый результат о долговременных напряженностях магнитных полей солнечных пятен. Возможно, это связано с тем, что измерения магнитных полей не учитывали реальный размер ядер и пор, в которых проводились измерения. В данной работе выполнена оцифровка напряженности магнитного поля по данным ежедневных наблюдений обсерватории Маунт Вилсон, а также положения и площади ядер солнечных пятен в период 1917–2013 гг.

2 Данные и метод обработки

В данной работе мы использовали данные ежедневных наблюдений обсерватории Маунт Вилсон. Эти наблюдения проводятся в ядрах солнечных пятен на башенном телескопе с фокусным расстоянием около 50 метров. Изображение Солнца строится при помощи целостата и линзы объектива и имеет размер 415–430 мм в зависимости от времени года. Во время измерений наблюдатель отмечает границы солнечного диска, а также положение и конфигурацию солнечных пятен (http://obs.astro.ucla.edu/150_tele.html). Измерения магнитного поля проводятся на спектрографе с фокусным расстоянием ~25 метров во втором порядке путем измерения расщепления зеемановской компоненты. Интенсивность магнитного поля в центре солнечных пятен наблюдается визуально в линии железа $\lambda 6173 \text{ \AA}$ в период 1917–1962 гг., а после этого периода в линии $\lambda 5250 \text{ \AA}$. Наклоняя пластину, наблюдатель выравнивает две зеемановские компоненты спектральной линии и измеряет смещение между ними. Сильные магнитные поля требуют большего наклона пластины, и эта процедура может привести к нелинейности. Шкала отсчета перекидной стеклянной пластины микрометра составляет примерно 100 Гс, что примерно соответствует ошибке наблюдений. Значения напряженности магнитных полей наносятся на зарисовки солнечных пятен и ядер. Рисунок делался карандашом на белой бумаге размером 25.5 x 50 см. Гелиографический север располагался сверху, а восток – в правой стороне. Перед зарисовкой наблюдатель ориентировал чертежный стол так, чтобы его ось x была параллельна экватору Земли в проекции на Солнце. Как правило, зарисовывались все пятна и поры на Солнце на текущий день. Зарисовки ядер солнечных пятен, полутени пятен и напряженностей магнитных полей осуществлялись карандашами различной твердости, что различает эти структуры по яркости. Архив рисунков начинается с 1917 года, число рисунков в настоящее время составляет около 25 000. Большая часть этих зарисовок оцифрована и доступна в Интернете (<ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings>).

Для оцифровки данных мы разработали специальное программное обеспечение. Обработка состояла из нескольких этапов. На первом шаге проводилось распознавание границ солнечного лимба и наложение гелиографической сетки. Далее оператор кликал на местоположение отдельных ядер солнечных пятен. Программа автоматически проводила выделение границ ядер, которые могли

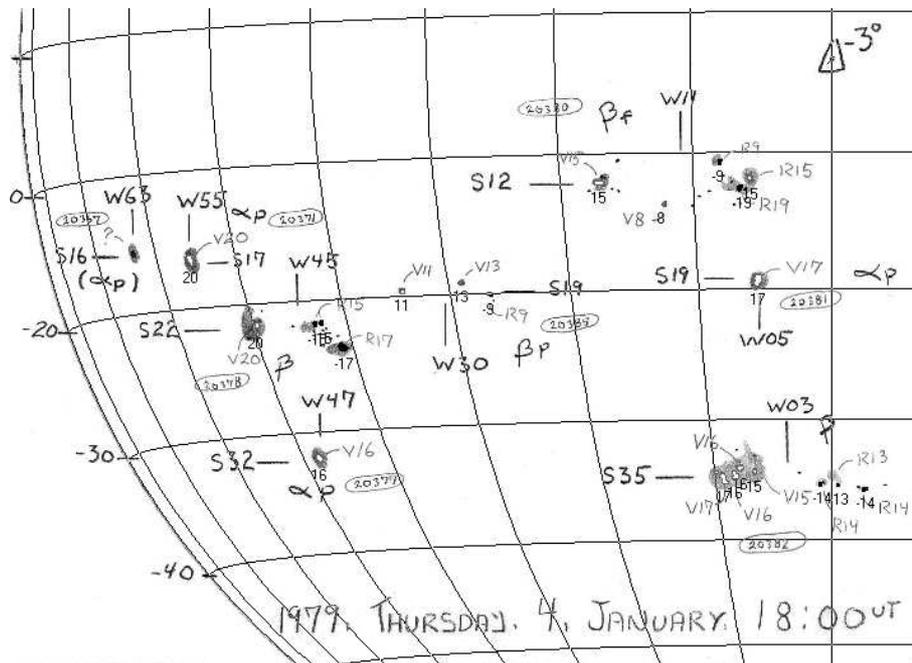


Рис. 1. Пример части зарисовки магнитных полей пятен за 04.01.1974 г. с выделенными границами ядер солнечных пятен и введенными значениями напряженности магнитных полей. Белым и черным цветами обозначены ядра различной полярности магнитного поля

быть зарисованы как на фоне полутени солнечных пятен, так и на пустом фоне. Затем вручную вводились значения интенсивности магнитных полей с учетом знака магнитного поля. На каждом этапе оператор мог корректировать автоматические действия программы, изменяя параметры гелиографической сетки или границы выделения ядер. Пример оцифрованной карты представлен на рис. 1.

Для каждого измерения мы определяли гелиографические координаты, количество пикселей, площадь, с учетом гелиографической проекции, конфигурацию ядер в векторном формате, время наблюдений и напряженность магнитного поля. Общее число дней наблюдений, обработанных нами, в которых были проведены измерения магнитных полей, составило ~ 16000 . Число измерений магнитного поля отдельных ядер и пор составило ~ 330000 . К сожалению, не все зарисовки еще оцифрованы и представлены в архиве, поэтому в серии существуют пропуски.

3 Результаты

3.1 Долговременные вариации магнитных полей солнечных пятен

На рис. 2 представлены среднемесячные значения количества ядер и пор, в которых проводились измерения магнитных полей. Среднее число измерений магнитных полей за день составило ~ 20 . Но данные распределены неравномерно по времени (рис. 2a). На рис. 3 представлена широтно-временная диаграмма распределения пятен положительной и отрицательной полярностей. Годы, когда данные для оцифровки отсутствовали, остались незаполненными. Наибольшее число измерений в день, около 50, выполнялось в 22-м цикле активности, при этом до 1954 г. среднее число измерений в день было ~ 10 . Данные 16-го цикла представлены эпизодически. Распределения площади ядер и пор, в которых проводились измерения, дают более равномерное распределение по времени (рис. 2b). Это говорит о том, что после 19-го цикла выросла доля измерений пятен малой

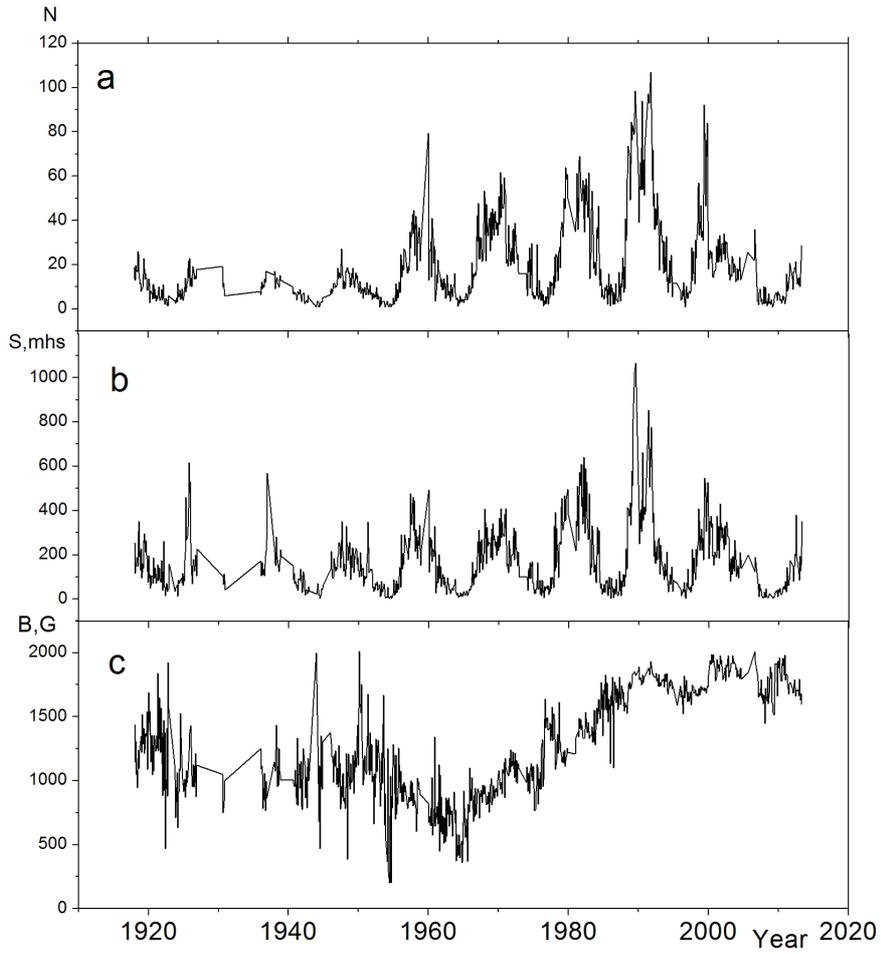


Рис. 2. Среднемесячные значения данных оцифровки магнитных полей пятен. а) число измерений магнитных полей в день; б) площадь измеренных ядер и пор; с) средняя напряженность магнитного поля

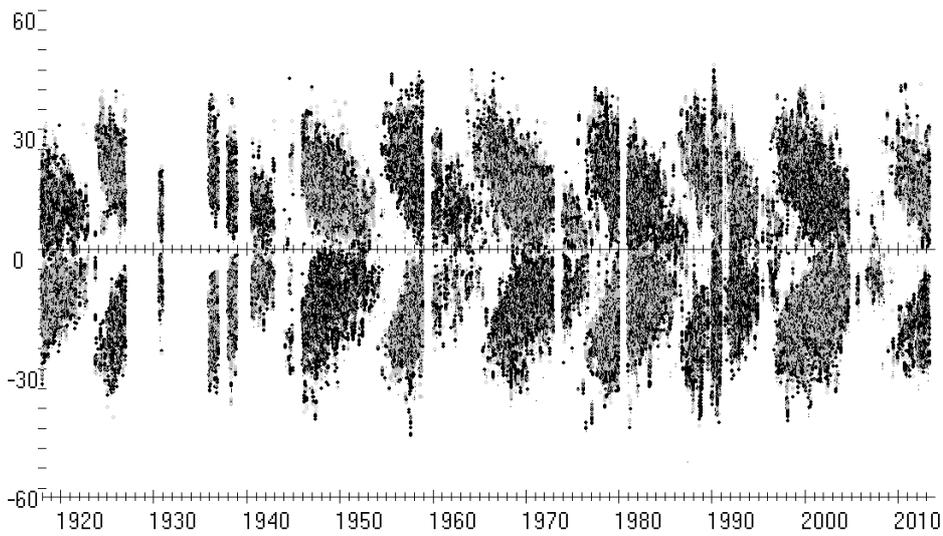


Рис. 3. Широтно-временная диаграмма распределения промеров напряженностей магнитного поля солнечных пятен. Черным цветом представлены отрицательные магнитные поля, серым – положительные

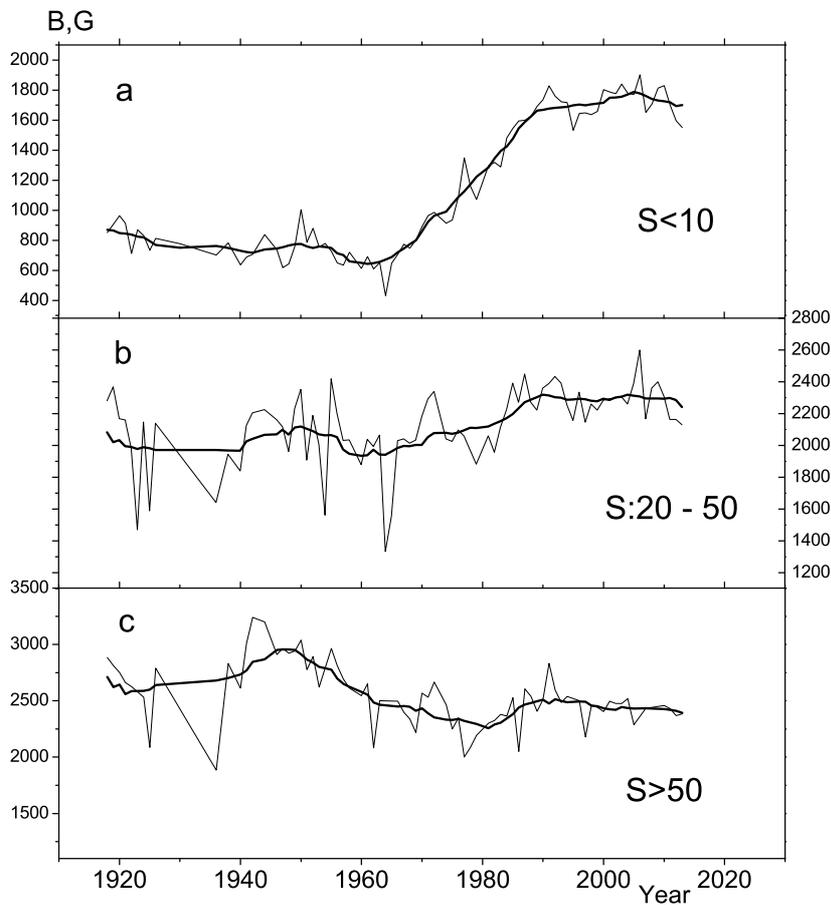


Рис. 4. Среднегодовые значения напряженности магнитных полей пятен. а) для пятен площадью менее $S < 10$ мдп; б) для пятен площадью в диапазоне $S : 20 - 50$ мдп; в) для пятен площадью более $S > 50$ мдп. Проведена огибающая линия с окном сглаживания 5 лет

площади. На рис. 2с представлены среднемесячные абсолютные значения напряженности магнитных полей, усредненные по всем пятнам без учета их площади.

Можно выделить три периода (рис. 2с). Первый период (до 1965 г.) характеризуется относительно низкой напряженностью магнитных полей $B \sim 1100$ Гс. В период 1990–2013 гг. средняя напряженность магнитного поля составила $B \sim 1770$ Гс. В период 1965–1990 гг. наблюдается переходный этап роста между этими сериями. Причиной таких долговременных вариаций может быть как смена системы наблюдений, так и физические изменения свойств солнечных пятен. Например, это, возможно, связано с разной долей учета мелких ядер и пор. На рис. 4 представлены напряженности магнитных полей для ядер с площадью меньше $S < 10$ миллионных долей солнечной полусферы (мдп), $S : 20 \div 50$ мдп, и больше $S > 50$ мдп. Долговременный рост в 22–23-м циклах активности существует только для ядер малой площади (рис. 4а). Напротив, для больших пятен в период с 1960 г. наблюдается уменьшение напряженности магнитного поля (рис. 4с).

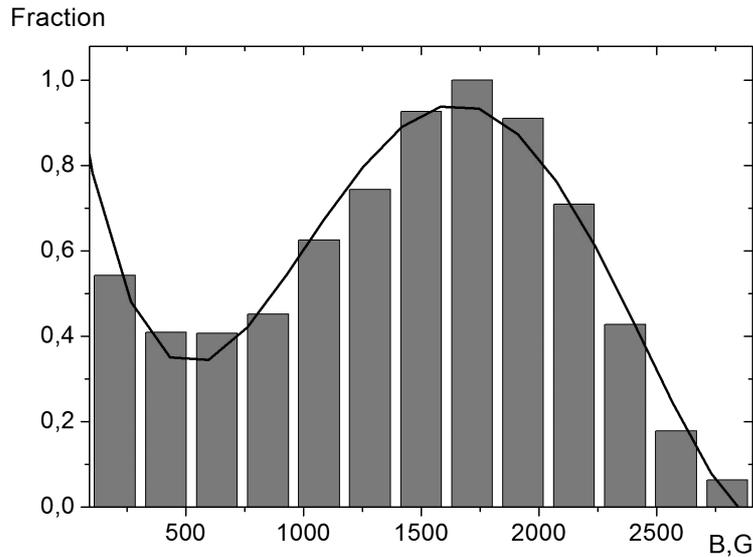


Рис. 5. Гистограмма встречаемости напряженности магнитных полей в серии наблюдений

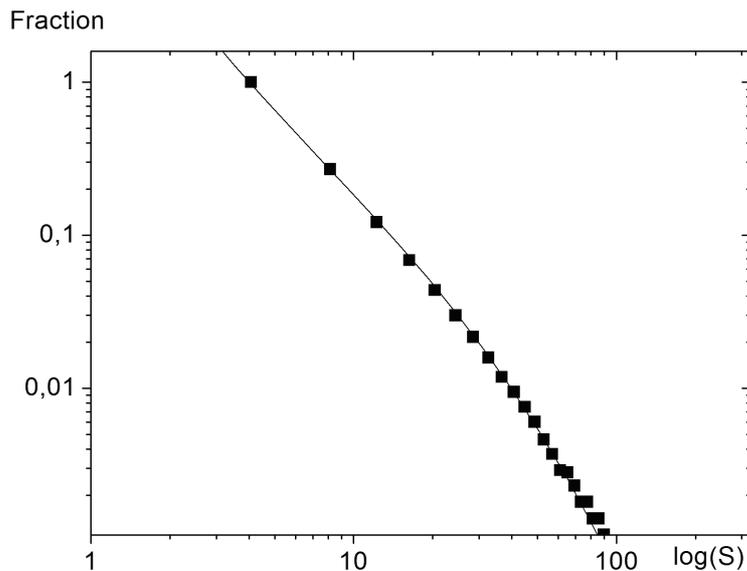


Рис. 6. Распределение числа солнечных ядер и пятен в зависимости от площади. Площадь выражена в единицах мдп. Частота встречаемости пятен представлена в относительных единицах

На рис. 5 представлена гистограмма распределения частоты встречаемости ядер и пор с различной напряженностью магнитного поля. Максимум распределения относится на величину $B \sim 1700$ Гс. Другой максимум присутствует на низких значениях магнитных полей и, вероятно, соответствует порам и измерениям в полутени солнечных пятен. На гистограмме распределения площади выделенных ядер и пор, в зависимости от их площади в логарифмических координатах, зависимость близка к линейной (рис. 6).

Важным вопросом при изучении магнитных полей пятен является направление вектора магнитного поля в солнечных пятнах. В центре пятна магнитное поле, как правило, вертикально, но

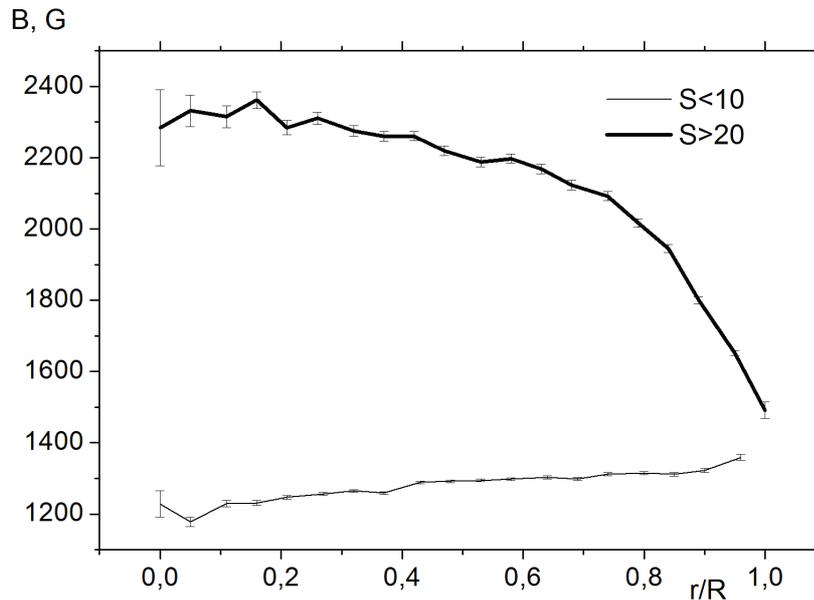


Рис. 7. Распределение напряженности магнитных полей в зависимости от удаления от центра диска для пятен площадью $S > 20$ мдп (толстая линия) и $S < 10$ мдп (тонкая линия). Представлен доверительный интервал для каждой серии

на границе пятен оно может быть наклонено на 70–80 градусов к вертикали (см. Соланки, 2003). Измерения магнитных полей магнитометрическими методами проводятся вдоль луча зрения, поэтому напряженность магнитного поля должна будет зависеть от расстояния до центра диска r/R . На рис. 7 представлено изменение B в зависимости от расстояния r/R для больших $S > 20$ мдп и малых пятен $S < 10$ мдп. Для пятен большой площади при приближении к краю диска Солнца магнитное поле уменьшается. Однако для пятен малой площади эта зависимость не выполняется (рис. 7). С ростом относительного расстояния r/R напряженность поля малых ядер растет к лимбу диска. Близкий результат получен в работе (Тлатов, Певцов, 2013). Различие, вероятно, обусловлено различными углами наклона магнитного поля в малых и больших пятнах. В больших пятнах поле в центре пятна вертикально, но к периферии угол отклонения от вертикали быстро растет. В малых пятнах магнитное поле, возможно, слабо меняется от центра к периферии, поэтому зависимость от расстояния имеет различие с большими пятнами. Также может быть влияние размера пространственного разрешения спектрографа, особо важное для измерения малых пятен.

3.2 Дисбаланс напряженности магнитных полей солнечных пятен

Между напряженностью магнитных полей в северном B_N и южном полушарии B_S имеется асимметрия. На рис. 8 представлены отношения абсолютных значений $(B_N - B_S)/(B_N + B_S)$, сглаженные скользящим окном шириной 11 лет. Практически за весь период наблюдений 1917–2013 гг. напряженность магнитных полей в северном полушарии была выше, чем в южном. В период 1940–1980 гг. это различие было наибольшим.

Магнитные поля всплывают на Солнце в виде биполей. Как правило, площадь ведущих пятен больше, чем площадь хвостовых пятен. Такое различие должно приводить в дисбалансу напряженности магнитных полей между ведущими и хвостовыми пятнами. В работе (Лозицкая, 2010b) был выполнен анализ пятен положительной и отрицательной полярностей с суммированием по всему

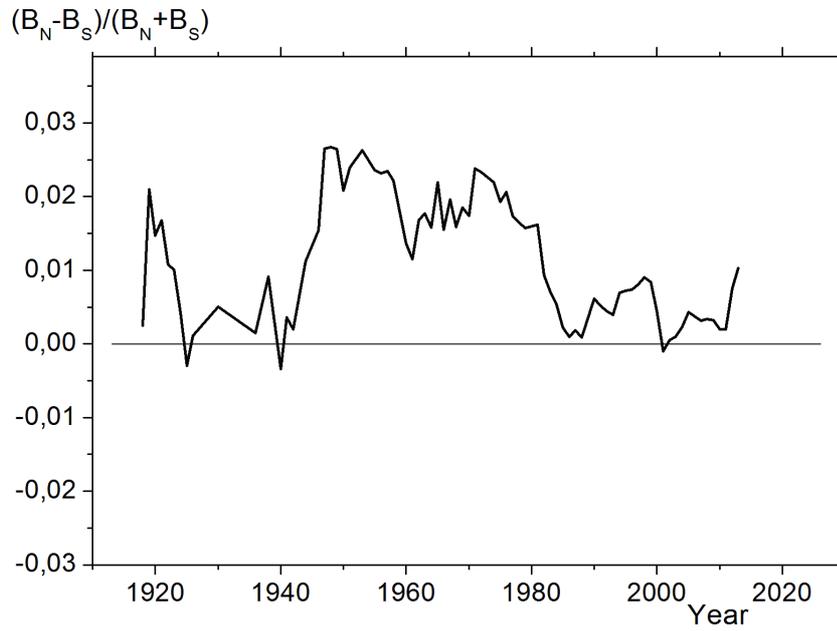


Рис. 8. Северо-южная асимметрия напряженности магнитного поля солнечных пятен

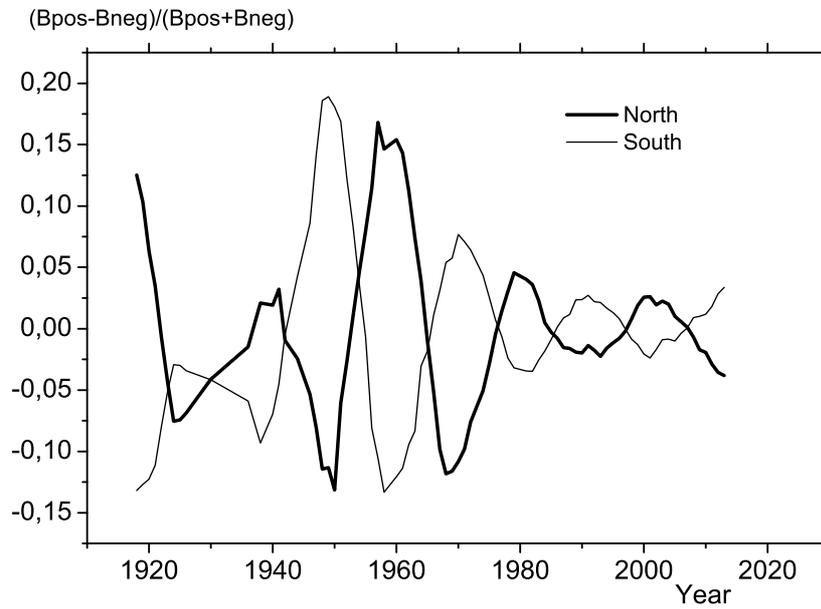


Рис. 9. Соотношение напряженности магнитных полей пятен положительной и отрицательной полярности в северном и южном полушариях Солнца

диску. Вместе с тем такой подсчет лучше выполнять по каждому полушарию отдельно, поскольку полярности ведущих и хвостовых групп противоположны в каждой полусфере.

На рис. 9 представлены отношения магнитных полей пятен положительной и отрицательной полярностей в северной и южной полусферах. В нечетных циклах в северном полушарии полярность ведущих пятен положительная, в четных – отрицательная. Рисунок 9 показывает, что средняя напряженность магнитных полей ведущих пятен выше, чем хвостовых, причем так же как для N-S асимметрии, дисбаланс ведущих и хвостовых групп был максимальным в середине 20-го века.

4 Выводы

Наш анализ изменения свойств магнитных полей солнечных пятен, выполненный по данным наблюдений обсерватории Маунт Вилсон в период 1917–2013 гг., показывает, что различные долгосрочные тренды напряженности магнитных полей и циклические изменения (Лозицкая, 2005, 2010а; Певцов и др., 2011, 2013) могут быть объяснены различным вкладом пятен большой и малой площади (рис. 4). При относительном росте числа малых пятен с фазой цикла магнитное поле уменьшается. Это может объяснить 11-летнюю циклическую вариацию. Изменение системы наблюдений, например, смена спектральной линии, изменение размера щели спектрографа или учет большего числа малых пятен и пор, также может быть причиной долгосрочных изменений. Ранее было показано, что напряженность магнитного поля увеличивается с ростом площади ядер солнечных пятен (Рингнес, Дженсен, 1960; Тлатов, Певцов, 2013). Средняя площадь пятен растет с амплитудой циклов активности. Поэтому уменьшение солнечной активности в вековом цикле должно сопровождаться трендом к уменьшению напряженности магнитных полей для больших пятен (рис. 4с). Вместе с тем рост напряженности магнитных полей малых пятен в период 1960–1990 гг. (рис. 4а) остается не до конца понятным.

Малые и большие солнечные пятна имеют различную зависимость с изменением относительного расстояния от центра солнечного диска (рис. 8). Возможно, это связано с различным направлением вектора магнитного поля в пятнах в зависимости от расстояния от центра пятна к его периферии. Это доказывает различные условия формирования малых и больших солнечных пятен (Тлатов, Певцов, 2013). Другим объяснением может быть изменение условий наблюдений, например, изменение размера щели спектрографа, особенно влияющее на измерения малых пятен.

В работе выполнен анализ дисбалансов напряженности магнитных полей пятен. Обнаружена долгосрочная вариация в северо-южной асимметрии напряженности магнитных полей пятен (рис. 8). Наибольшая асимметрия наблюдалась в период 1940–1980 гг. В этот период наблюдался наибольший дисбаланс для пятен ведущих и хвостовой полярностей (рис. 9). Причину такого дисбаланса магнитных полей пятен необходимо изучать в дальнейшем.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и программ РАН.

Литература

- Лозицкая Н.И. // Космічна наука і технологія. 2010а. Т. 16. № 4. Р. 30.
 Лозицкая (Lozitska N.I.) // Кинем. и физ. небесн. тел. Приложение (Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.). 2005. № 5. Р. 151.
 Лозицкая (Лозицька Н.) // Вісник Київського ун-ту. Астрономія. 2010b. Т. 46. Р. 16.
 Певцов и др. (Pevtsov A., Bertello L., Tlatov A., Kilkic A., Nagovitsyn Y., Cliver E.W.) // Solar Phys. 2013. DOI: 10.1007/s11207-012-0220-5.
 Певцов и др. (Pevtsov A.A., Nagovitsyn Y., Tlatov A., Rybak A.) // Astrophys. J. Lett. 2011. V. 742. P. L36.
 Рингнес, Дженсен (Ringnes T.S., Jensen E.) // Astrophys. Norvegica. 1960. V. 7. P. 99.
 Соланки (Solanki S.K.) // Astron. Astrophys. Rev. 2003. V. 11. P. 153.
 Тлатов, Певцов (Tlatov A.G., Pevtsov A.A.) // Solar Phys. 2013. DOI: 10.1007/s11207-013-0382-9.