

*А.В. Ерофеева*

### **ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ И СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ СРЕДНИХ УГЛОВ НАКЛОНА ОСЕЙ БИПОЛЯРНЫХ ГРУПП ПЯТЕН**

Хорошо известно, что оси биполярных групп пятен и активных областей обнаруживают тенденцию ориентироваться вдоль параллелей широты, хотя наблюдаются значительные отклонения величины углов наклона осей биполярных групп пятен от среднего значения. В первой половине двадцатого столетия было установлено, что величина угла наклона осей биполярных групп пятен в среднем не равна нулю и составляет несколько градусов, причем угол наклона таков, что головные части групп пятен располагаются, как правило, ближе к экватору, нежели хвостовые. Также было установлено, что средние значения углов наклона возрастают с увеличением широты. Этот факт известен как "закон Джоя". Несколько позднее были определены положения магнитных полюсов и углы наклона биполярных осей активных областей по магнитограммам [1,4]. Как оказалось, поведение углов наклона активных областей такое же, как и у биполярных групп пятен. Используя обширный наблюдательный материал, Р.Говард с соавторами [3] изучили связь углов наклона осей с другими параметрами биполярных групп пятен (площадь, размеры), а также вариации углов наклона осей в ходе эволюции групп. В частности, ими была обнаружена северо-южная асимметрия углов наклона осей групп, причем в южном полушарии углы наклона в среднем были несколько меньше. Вариации же углов наклона осей биполярных групп пятен в течение 11-летнего цикла активности Солнца и на более длительной временной шкале все еще почти не изучены, хотя Говардом [3] рассматривалась зависимость средних углов осей групп от фазы цикла и была найдена небольшая вариация (здесь имеется в виду истинная вариация углов наклона, остающаяся после исключения эффекта изменения средней широты групп пятен в ходе 11-летнего цикла). Настоящая работа

посвящена изучению временных вариаций углов наклона осей биполярных групп пятен на большой шкале времени (45 лет).

### *ДАННЫЕ И МЕТОД ОБРАБОТКИ*

Исходным материалом послужили положения пятен на патрульных фотогелиограммах, получаемых с 1956 г. и до настоящего момента на Уссурийской астрофизической обсерватории. Для групп пятен, у которых биполярная структура хорошо выражена, на каждой снимке определяются координаты двух наиболее крупных пятен, одного в головной и одного в хвостовой частях группы. В этом случае координаты этих двух пятен считались координатами магнитных полюсов группы. Для более сложных по своей структуре групп измерены положения 3–4 пятен. В таких группах координаты магнитных полюсов определены как средние координаты пятен в головной и хвостовой частях группы. Некоторое количество групп пятен с очень сложной структурой было исключено из рассмотрения из-за трудностей определения в них магнитных полюсов. Группы пятен с площадями, меньшими 20 м.д.п. (миллионных долей полусферы), также не включены в рассмотрение, равно как и группы, наблюдавшиеся только вблизи лимба, где определение координат и величины площади содержит значительные ошибки. В итоге общее количество выбранных для исследования групп пятен за 1956–2000гг. составило 6700. Координаты магнитных полюсов каждой группы были усреднены за прохождение по диску, и уже по усредненным координатам определялись угол наклона оси группы  $\alpha$  и расстояние между полюсами  $d$ , следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \pm \frac{(f_2 - f_1)}{(l_2 - l_1) \cos f},$$
$$d = \sqrt{(f_2 - f_1)^2 + (l_2 - l_1)^2 \cos^2 f},$$

где  $l_1, f_1$  и  $l_2, f_2$  – долгота и широта головного и хвостового пятен группы. Помимо этого использовались такие параметры групп, как широта центра группы (средняя за прохождение по диску)  $f$  и максимальная наблюденная площадь  $S$ , которую в грубом приближении можно рассматривать как характеристику абсолютного магнитного потока группы.

На первый взгляд может показаться, что изложенная выше методика определения углов наклона осей биполярных групп пятен слишком груба. Говард [2] применил более тонкий способ определения координат магнитных полюсов, вычисляя их как средневзвешенные координаты всех пятен, входящих в состав группы, причем в качестве весов брались площади пятен. Для нескольких сотен рассмотренных нами групп пятен был применен и метод Говарда, затем результаты, полученные двумя методами, были сравнены. Оказалось, что по углам наклона они хорошо согласуются между собой. Хотя при сравнении суточные значения углов наклона осей групп обнаруживают значительное случайное рассеяние, углы наклона, определенные по средним за прохождение координатам магнитных полюсов, показывают высокую корреляцию с коэффициентом 0,92 и не обнаруживают заметного систематического различия (если оно и имеется, то не превышает 10%). Расстояния между полюсами, однако, получаются по нашей методике систематически большими, нежели у Говарда, примерно на 30%. В итоге данные, определенные по нашему методу, представляются достаточно надежными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Величина среднего угла наклона, определенная по всем 6700 группам пятен за период 1956–2000 гг., составляет  $\bar{\alpha} = 6,99 \pm 0,23^\circ$ , но подсчитанные в каждом из полушарий отдельно средние углы наклона отличаются на  $1^\circ$ . Так, величина среднего угла наклона для групп пятен северного полушария  $\bar{\alpha}_N = 7,46 \pm 0,31^\circ$ , а для групп пятен южного полушария  $\bar{\alpha}_S = 6,46 \pm 0,33^\circ$ .

Различие в три среднеквадратичных ошибки значимо с очень высокой вероятностью. Таким образом, наличие северо-южной асимметрии в этом параметре подтверждается. Величина среднего размера групп пятен в северном полушарии  $\bar{d}_N = 6,20 \pm 0,05^\circ$ , а в южном  $\bar{d}_S = 6,20 \pm 0,05^\circ$ ; очевидно, что асимметрия в этом параметре практически отсутствует. Средняя площадь групп пятен северного полушария  $\bar{S}_N = 325 \pm 7$  м.д.п., а для групп пятен южного полушария  $\bar{S}_S = 319 \pm 7$  м.д.п. Несомненно, что заметная асимметрия и по этому параметру также не обнаруживается.

На рис.1 (слева) приведены временные вариации средних углов наклона осей групп пятен для всего Солнца и для каждого из его полушарий. Каждая точка на графике представляет собой среднее значение угла наклона групп пятен, наблюдавшихся в течение 10-летнего интервала, а интервал усреднения последовательно сдвигается на 3 года (скользящее среднее).

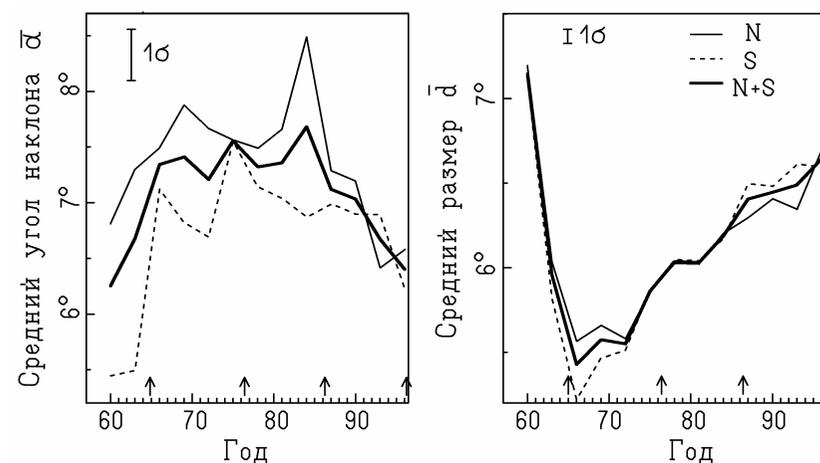


Рис.1. Временные вариации средних углов наклона осей биполярных групп пятен (слева), и средних размеров групп пятен (справа). Сплошная и штриховая линии соответствуют северному и южному полушариям Солнца, жирная линия – среднему для двух полушарий. Стрелками отмечены моменты минимумов 11-летних циклов

Хорошо заметна вариация средних углов наклона в течение 45-летнего интервала, хотя статистические ошибки довольно велики. Также виден немонотонный характер вариации, возможно, что она является циклической с длиной цикла, превышающей исследованный нами временной интервал (это может быть, например, вековой цикл). Вариации средних углов наклона для разных полушарий изменяются похожим образом, но в южном полушарии величины средних углов наклона систематически меньше в 19–21 циклах активности (особенно в 19-м цикле, где статистическая достоверность различия несомненна). В 22-м цикле северо-южная асимметрия этих величин мала либо вовсе отсутствует. На рис.1 для сравнения представлены временные вариации средних размеров групп пятен; как можно видеть, этот параметр также показывает немонотонную временную вариацию, однако устойчивой северо-южной асимметрии он не обнаруживает.

Рассмотрим широтную зависимость углов наклона. Чтобы ее получить, были рассчитаны значения средних углов наклона осей групп в узких 5-градусных широтных зонах. Широтная зависимость для всего массива данных из 6700 групп пятен представлена на рис.2 (слева). Характер зависимости примерно линейный, хотя имеются небольшие отклонения от линейности, отмеченные ранее другими авторами. Справа на рис.2 представлены широтные зависимости средних углов наклона отдельно для северного и южного полушарий. Заметно различие между ними: для групп пятен южного полушария зависимость сдвинута вниз и имеет более крутой наклон, чем зависимость для групп северного полушария. Зависимости средних углов наклона от широты были аппроксимированы линейными функциями вида  $\alpha(f) = A + B|f|$ . Для всех групп пятен получена следующая зависимость:

$$\bar{\alpha}(f) = 1,47^\circ + 0,33|f|.$$

Соответственно для групп пятен северного полушария

$$\bar{\alpha}_N(f) = (2,40^\circ \pm 0,72) + (0,30 \pm 0,04)|f|,$$

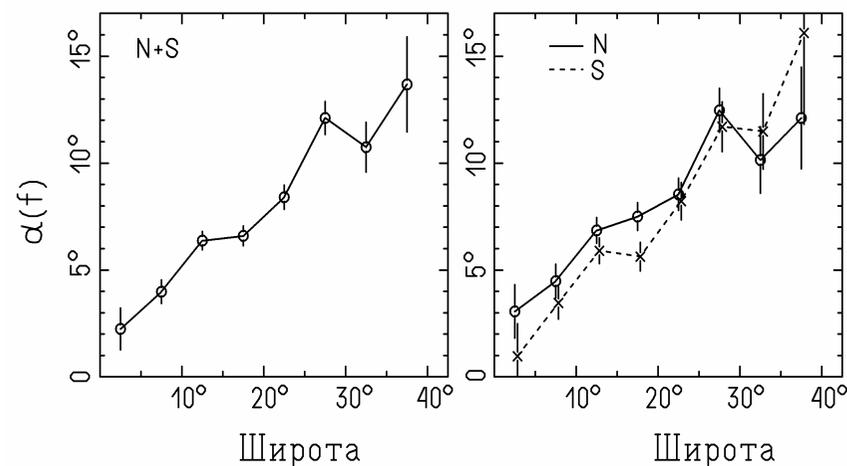


Рис.2. Широтные зависимости средних углов наклона осей групп пятен для всего диска Солнца (слева), и отдельно для северного и южного полушарий (справа)

и для южного полушария

$$\bar{\alpha}_S(f) = (0,43^\circ \pm 0,79) + (0,37 \pm 0,04)|f|.$$

Различие в коэффициенте угла наклона функций, однако, статистически не очень надежно.

На графиках, представленных на рис.3, показаны широтные зависимости средних углов наклона осей групп пятен для циклов 19–22. Они демонстрируют временную вариацию широтной зависимости, особенно заметную в области широт 10–20°, где наблюдается наибольшее число групп пятен. В этой области имеется "плато" на кривой  $\alpha(f)$ , которое со временем меняет свое положение по обеим координатам (широте и углу наклона).

На рис.4 представлены коэффициенты  $A$  и  $B$  линейной аппроксимации  $\alpha(f) = A + B|f|$  как функции времени. Они рассчитаны для

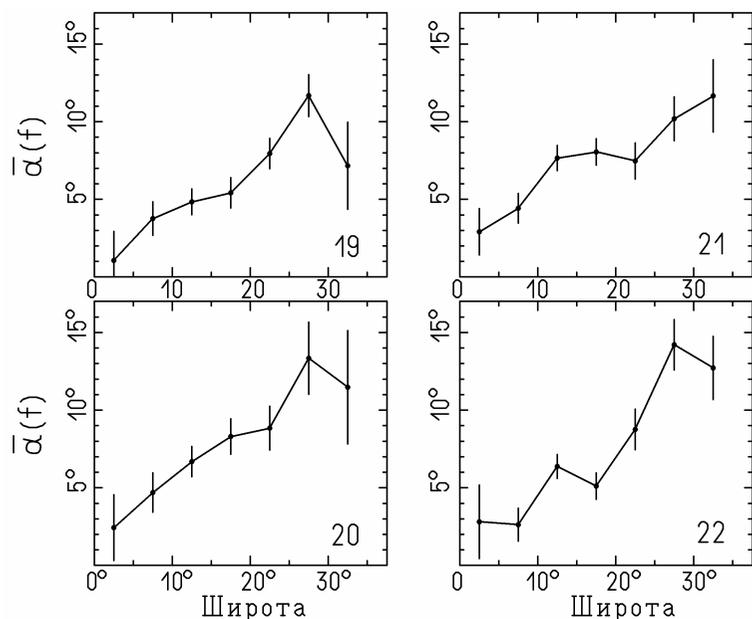


Рис.3. Широтные зависимости средних углов наклона осей групп пятен для четырех циклов солнечной активности (номера циклов указаны на графиках)

скользящего 10-летнего интервала, причем отдельно для северного и южного полушарий. Оба коэффициента меняются на шкале времени около 40 лет, также как и средние углы наклона осей групп пятен, причем изменение  $A$  и  $B$  происходит примерно в противофазе. В 19–21 циклах в значениях коэффициента  $A$  присутствует северо-южная асимметрия, но коэффициент  $B$  (наклон прямой) практически одинаков в северном и южном полушариях. В ходе 22-го цикла активности, когда асимметрия по средним углам наклона отсутствовала, оба коэффициента  $A$  и  $B$  обнаруживают сильные различия между севером и югом. Таким образом, налицо двойственный характер северо-южной асимметрии. Исчезая в 22-м цикле активности в значениях средних углов наклона осей групп пятен, она возникает в их широтной зависимости.

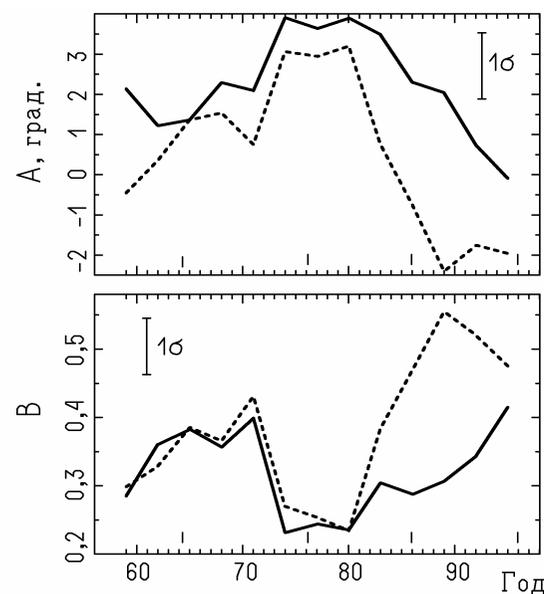


Рис.4. Временной ход коэффициентов линейной аппроксимации широтной зависимости углов наклона групп пятен, для северного (сплошная линия) и южного (штриховая) полушарий Солнца. Вертикальными штрихами отмечены моменты минимумов солнечных циклов

Рассмотрим временную зависимость средних углов наклона осей групп пятен на шкале времени порядка 11-летнего цикла. Разумеется, что в силу законов Джоя и Шперера (т.е. вследствие зависимости  $\alpha$  от широты и уменьшения в ходе цикла активности средней широты групп пятен) в среднем угол наклона групп будет уменьшаться от начала цикла к концу. Вариация такого рода описана у Ванга и Шили [4]. Для того чтобы исключить эту "фиктивную" временную вариацию, имеет смысл рассмотреть остаточные углы наклона осей групп пятен  $\delta\alpha = \alpha - \bar{\alpha}(f)$ , из которых вычтена широтная зависимость. На рис.5 показаны скользящие средние за два года значения остаточных углов наклона для северного и южного полушарий,  $\delta\alpha_N$  и  $\delta\alpha_S$ , а также индекс асимметрии остаточ-

ных углов наклона осей групп пятен, который представляет собой разность  $\delta\alpha_N - \delta\alpha_S$ . Средние остаточные углы наклона осей групп пятен обнаруживает северо-южную асимметрию: для северного полушария  $\bar{\delta\alpha}_N = 0,44 \pm 0,31^\circ$ , а для южного полушария –  $\bar{\delta\alpha}_S = -0,47 \pm 0,33^\circ$ . Кроме того, оказывается, что в северном полушарии остаточные углы наклона обнаруживают вполне ощутимые 11-летние колебания, минимумы которых располагаются вблизи минимумов циклов активности, а вот в южном полушарии такие устойчивые колебания отсутствуют (см. рис. 5). Снова налицо северо-южная асимметрия, но уже в ином виде. В итоге индекс асимметрии остаточных углов наклона  $\delta\alpha_N - \delta\alpha_S$  претерпевает 11-летние колебания в 19–21 циклах активности с преобладанием северного полушария в максимуме цикла и южного – вблизи минимума. (Следует заметить, что так как в минимуме солнечного цикла пятен мало, в среднем по всем группам пятен получается большой наклон в северном полушарии.) Эта цикличность асимметрии остаточных углов наклона осей групп пятен нарушается в 22-м цикле активности, где все происходит примерно наоборот. Возможно, это связано с тем фактом, что в 22-м цикле длительное преобладание активности северного полушария Солнца сменилось преобладанием активности южного полушария, так что этот цикл своего рода "пограничный".

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы. В течение рассмотренного интервала времени угол наклона осей биполярных групп пятен показывает заметные вариации. Имеет место вариация на шкале времени, большей 11-летнего цикла активности, причем изменяются не только средние углы наклона осей групп пятен, но и характер зависимости угла наклона от широты. Эта вариация имеет немонотонный характер, возможно, она квазипериодична с периодом  $\geq 40$  лет. Во всех четырех рассмотренных циклах активности наблюдается северо-южная асимметрия,

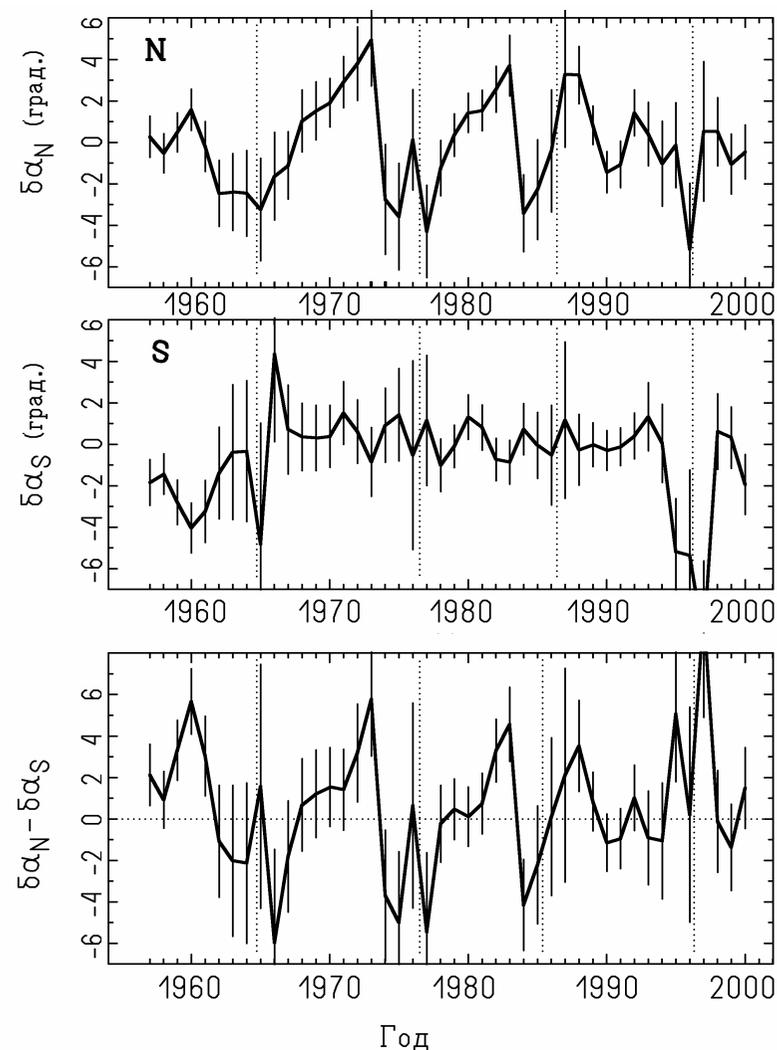


Рис.5. Временные вариации остаточных углов наклона осей групп для северного (верхний график) и южного (средний график) полушарий. На нижнем графике показана временная вариация разности остаточных углов наклона между севером и югом. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты минимумов солнечных циклов

хотя со временем ее характер меняется. Наблюдаются также вариации средних углов наклона осей групп пятен в ходе 11-летнего цикла, причем не связанные с законом Шперера. Эти вариации имеют асимметричный характер – они хорошо заметны в северном полушарии, но в южном выражены слабо или же совсем отсутствуют.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Howard R.F. The Magnetic Field of Active Regions.V. Magnetic Axis Orientation // Solar Phys. 1991. V.132. P. 49-61.
2. Howard R.F. Axial Tilt Angles of Sunspot Groups // Solar Phys. 1991. V.136, N.2. P.251-262.
3. Sivaraman K.R., Gupta S.S., Howard R.F. Measurement of Kodaikanal White-Light Images. IV. Axial Tilt Angles of Sunspot Groups // Solar Phys. 1999. V.189. P.69-83.
4. Wang Y.-M., Sheeley N.R. Average Properties of Bipolar Magnetic Regions During Sunspot Cycle 21 // Solar Phys. 1989. V.124. P.81-100.

**В.В. Касинский\***

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ В ТРЕХ ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ (1972–2000 гг.)

Исследован характер интегрального энергетического спектра (ИЭС) рентгеновских вспышек на Солнце в рамках формализма степенного спектра:  $N(E > E_m) \sim E^{-b}$ . Здесь  $N$  – накопленное число вспышек с энергией выше заданной  $E_m$ ,  $b$  – показатель спектра. Ранее была показана корреляция индекса  $b$  (0,90-0,50) с числом Вольфа ( $W$ ) для одного цикла [3]. Цель статьи – пересмотреть циклические вариации ИЭС рентгеновских вспышек на большой шкале – ~30 лет – на протяжении трех циклов N21-23 Солнца и на более полном материале (~55 000 вспышек). Получена зависимость таких параметров, как предельная энергия вспышки, индекс  $b$ , число микровспышек ( $E \cong 10^{25}$  эрг) и других от фазы 11-летнего цикла. Обнаружен новый факт – монотонный рост  $b$  на протяжении 30 лет. Определяется роль индекса  $b$  в интерпретации моделей солнечно-звездных вспышек. Результаты обсуждаются в рамках сопоставления традиционных (Солнце) и альтернативных моделей вспышек на звездах (UV-Cet), допускающих выделение энергий в единичном акте до  $10^{36}$  эрг [1]. Последнее требует пересмотра традиционных "магнитных" моделей солнечных вспышек с привлечением энергий внешнего воздействия – модель "солитонов" Могилевского [2] или волн типа "цунами" [9].

#### 1. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ВСПЫШЕК И ЕГО СВОЙСТВА

Для получения ИЭС этого по данным потока  $F$  ( $\text{erg cm}^{-2} \text{c}^{-1}$ ) рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 А [9], времени начала –  $t_0$ , максимума –  $t_{\text{max}}$  и конца вспышки –  $t_e$ , рассчитаны полные

\*ИрГУПС, Иркутск