

УДК 523.947

## Вариации поля скорости солнечной атмосферы в цикле активности

*А.Г. Тлатов, В.В. Васильева*

Кисловодская Горная Станция, ГАО РАН

Поступила в редакцию 1 марта 2006 г.

**Аннотация.** На основе ежедневных данных (в течение 1996–2003 гг.) магнитографических наблюдений SOHO/MDI и NSO/KPVT, доплеровских скоростей по данным обсерватории Mount Wilson и карт интенсивности радиоизлучения радиогелиографа Nobeyama проведен сравнительный анализ вариаций скорости дифференциального вращения, меридиональной циркуляции и доплеровских наблюдений. Установлена зависимость скорости дифференциального вращения магнитных элементов от их размера. Скорость вращения с ростом площади магнитных структур уменьшается, в то время как степень дифференциальности вращения возрастает.

На основе метода трассеров магнитных элементов по данным магнитографов восстановлены поля скоростей. По этим данным построены широтно-временные диаграммы основных составляющих движения дифференциального вращения и меридиональной циркуляции.

Сравнительный анализ вариаций скорости дифференциального вращения, скорости меридиональной циркуляции и измерений лучевой скорости доплеровским методом позволяет сделать вывод о взаимосвязи этих течений. В частности, вблизи экватора в период максимума цикла активности наблюдается минимальная скорость вращения, в этот период меридиональная циркуляция направлена к экватору, а лучевые скорости указывают на преимущественное всплывание вещества к верхним слоям солнечной атмосферы.

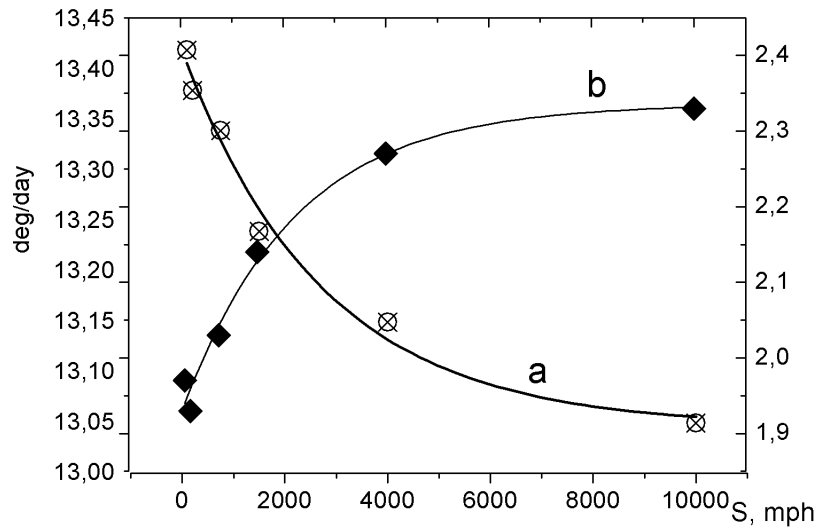
VARIATION OF THE VELOCITY FIELD OF THE SOLAR ATMOSPHERE IN ACTIVITY CYCLE, by A.G. Tlatov, V.V. Vasil'eva. According to daily observations with SOHO/MDI during 1996–2003 and NSO/KP Vacuum Telescope during 1978–2003 magnetic elements with intensity of the magnetic field above background have been allocated. The knots were then identified that allowed to trace their displacement comparatively of heliographic grid. Thus, fields of speeds for the period from 1978 to 2003 have been constructed. Variations of speed meridional circulation are found out. The basic direction of speed meridional drift is directed towards poles. Fields of speeds in various phases of solar cycle are constructed.

**Ключевые слова:** солнце, дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция

---

### 1 Введение

Изучение крупномасштабных потоков в верхней атмосфере Солнца дает важную информацию о конвекционных течениях и служит основой для понимания трансформации полоидальной и тороидальной компонент магнитного поля в динамо-механизме генерации солнечного цикла

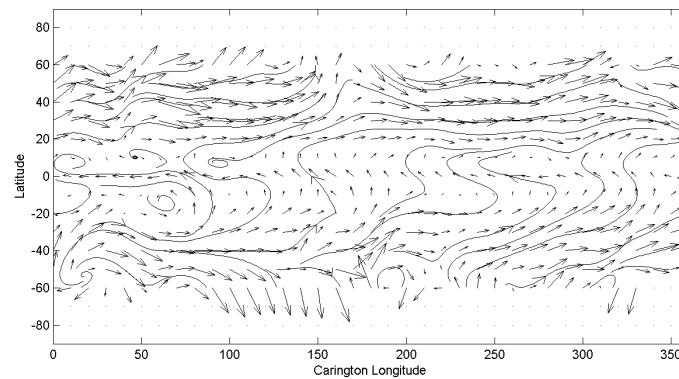


**Рис. 1.** Зависимость коэффициентов разложения скорости дифференциального вращения в формуле  $\omega(\theta) = a - b \cdot \sin^2(\theta)$  от размера магнитных элементов

активности. Известно, что в солнечной атмосфере существуют течения различного уровня, связанные с грануляцией, имеющей характерные размеры  $1-2''$ , горизонтальные скорости  $250$  м/с и время жизни несколько минут; супергрануляцией с размерами  $50''$ , скоростью  $400$  м/с и временем жизни  $1-2$  суток; гигантскими ячейками с размером  $500''$ , скоростью  $100$  м/с. Существует также меридиональная циркуляция, охватывающая северное и южное полушария со скоростью  $10-40$  м/с. Для восстановления поля скорости в верхней атмосфере Солнца используют различные методы. Наиболее широкое распространение получил метод трассеров, в котором скорость определяется при регистрации сдвига элементов активности относительно кэррингтоновской сетки или других реперов. Первые сообщения о наличии крупномасштабных потоков, определенные по положению волокон и флоккул относятся к началу 20-го века (Хале, 1908). В настоящее время этот метод получил развитие для различных видов трассеров и применим не только к изображениям областей одного дня или ряда последовательных дней (Новембер и др., 1987). Также этот метод применяется при обработке синоптических карт (Амброж, 2001). К другим способам обнаружения крупномасштабной циркуляции можно отнести анализ доплеровских смещений (Симон, Вейс, 1968) и данные анализа гелиосейсмологии (Бек, Дувалл, 2001). Целью данного исследования являлось выявление связи различных течений поля скорости в долговременных крупномасштабных вариациях.

## 2 Анализ данных

Одним из основных исходных видов данных являлись ежедневные наблюдения магнитных полей MDI/SOHO и KPVT. Данные были представлены в fits-форматах, с пространственным разрешением  $\sim 2''$ . Для более надежной идентификации магнитных структур по данным MDI, как правило, использовалось несколько  $\sim 4 - 5$  изображений в течение суток. Методика выделения магнитных структур была следующей. На каждом изображении выделялись пиксели с интенсивностью магнитного поля по абсолютной величине не менее  $8$  Гс для MDI и  $10$  Гс на магнитограммах Китт Пик. Группы выделенных пикселей могли образовывать структуры, имеющие общую границу, отделяющую структуру от фонового магнитного поля. В дальнейшем такие структуры будем называть здесь яркими узлами. Для каждой из таких структур проводилось вычисление разнообразных параметров, таких как средние кэррингтоновские координаты, скорректированная площадь,



**Рис. 2.** Распределение поля скорости, полученное для периода 07.1996–12.1996 года. Дифференциальное вращение вычтено

средняя и максимальная интенсивность магнитного поля, магнитный поток, размеры в долготном и широтном направлении и др. Учитывались структуры, имеющие площадь не менее 20 миллионов долей солнечной полусферы (МДП). Для определения горизонтальной скорости проводилась идентификация таких магнитных структур на соседних изображениях. При этом, отождествление проводилось при минимизации отклонений от ожидаемого положения. Для последовательности изображений составлялись “цепочки” положений структур, по которым вычислялись скорости в долготном и широтном направлении. Далее составлялись матрицы скорости в долготном и широтном направлении, которые служили основой для построения поля скорости.

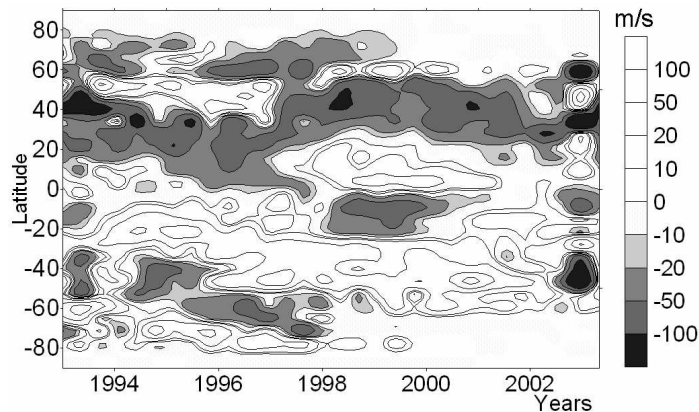
### 3 Результаты

#### 3.1 Дифференциальное вращение магнитных элементов

Для проверки методики выделения трассеров и ее применимости для определения скоростей проведен сравнительный анализ скорости вращения по данным MDI. Аппроксимационная формула скорости вращения для магнитных элементов площадью не более 300 мдп. может быть представлена в виде:  $\omega(\theta) = 13.42 - 1.97 \cdot \sin^2(\theta) - 1.87 \cdot \sin^4(\theta)$ . Для элементов большей площади закон дифференциального вращения отличался от данного. Коэффициенты  $a$  и  $b$  в формуле разложения  $\omega(\theta) = a - b \cdot \sin^2(\theta)$  для элементов различных размеров приведены на рис. 1. Как видно из полученных результатов, с ростом площади элементов скорость вращения значительно сокращается от 13.42 для элементов малой площади до 13.05 град/сутки для элементов площадью более 5000 мдп, а дифференциальность вращения увеличивается. Для элементов малой площади наблюдается хорошее соответствие с анализом, проведенным другими методами (Комм и др.,1993).

#### 3.2 Поля скорости

В распределениях полей скорости существуют квазипостоянные течения. Прежде всего, это смещения элементов относительно кэррингтоновской сетки из-за дифференциального вращения и меридиональной циркуляции. Помимо этого, существуют долгоживущие течения со временем жизни несколько оборотов и короткоживущие течения со временем жизни не более одного оборота. Для выделения долгоживущих течений на разных фазах активности были построены сводные синоптические карты с различным усреднением. Оказалось, что можно выделять течения со временем жизни около полугода. На рис. 2 представлено поле скоростей и линии тока для второго полугодия 1996 года. Для лучшего проявления течений была вычтена скорость дифференциального вращения, задаваемая по формуле из работы (Комм и др.,1993). На широтах 40 градусов



**Рис. 3.** Широтно-временная диаграмма распределения меридиональной циркуляции, определенная по данным КРVT по магнитным элементам с площадью больше 50 мдп. Число элементов составило  $\sim 93$  тыс

наблюдается перемещение элементов к полюсам, что обусловлено меридиональной циркуляцией. На низких широтах существуют локальные вихри не переходящие границу экватора. Для эпохи максимума поле скорости более возмущенно. На определенных долготах в области средних широт существуют потоки, направленные к экватору. Эти потоки могут доходить до экватора, пересекать его и сохраняться в противоположном полушарии.

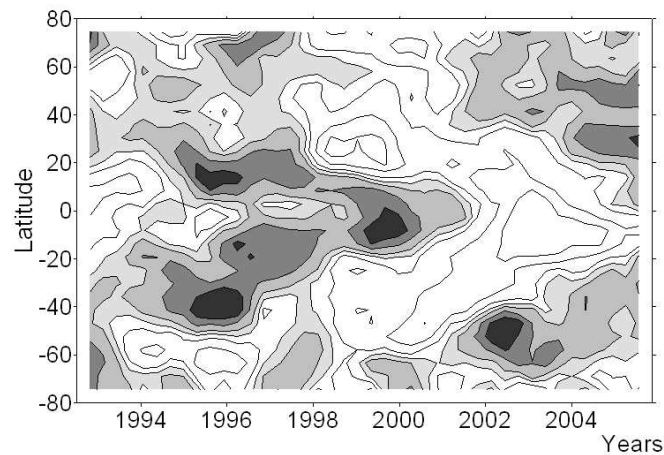
### 3.3 Меридиональная циркуляция

Другим видом крупномасштабного течения является меридиональная циркуляция. Для ее определения определялось перемещение элементов вдоль меридианных линий. Процедура была следующей. На текущем изображении выделялись магнитные элементы с напряженностью выше пороговой величины. Определялись координаты геометрического центра. На следующем изображении находилась область той же полярности, наиболее близкая к ожидаемому месту расположения. Для построения широтно-временных диаграмм формировалась матрица среднемесячных значений с шагом  $5^\circ$  по широте (Тлатов, Васильева, 2004). На рис. 3 представлены результаты распределения меридиональной скорости по данным наблюдений магнитографа обсерватории Кит-Пик в период 1993–2003 гг.

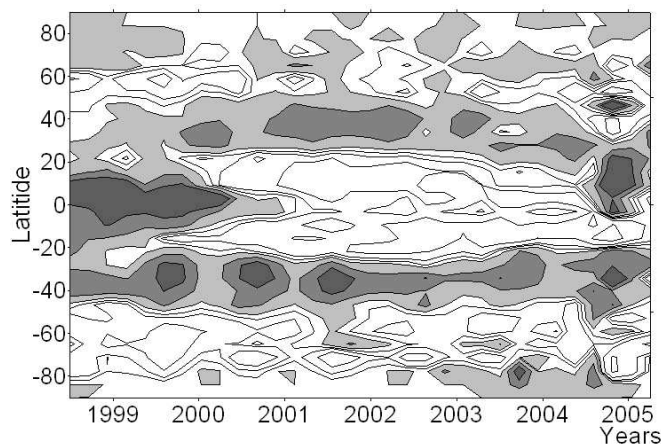
По полученным результатам можно отметить следующее. Картина меридиональной циркуляции зависит от фазы цикла солнечной активности. Характер меридиональной циркуляции при анализе данных разных инструментов в целом совпадает. В обоих полушариях в области средних широт существуют течения, направленные к полюсам. За 1–2 года до максимума цикла активности по солнечным пятнам в обоих полушариях, в приэкваториальной зоне на широтах до  $20^\circ$ , возникают течения, направленные к экватору. В период минимума активности на высоких широтах также возникают течения, направленные к экватору.

### 3.4 Вариации скорости дифференциального вращения и лучевых скоростей

Скорость дифференциального вращения зависит от фазы цикла активности. На диаграмме широта-время наблюдаются волны скорости замедления и ускорения, называемые крутильными волнами. На рис. 4. представлена широтно-временная диаграмма отклонений скорости вращения от среднего значения на соответствующей широте по данным радиогелиографа Нобуама. Методика обработки описана в работе (Гельфрейх и др., 2002). Волны замедления начинаются на высоких широтах в



**Рис. 4.** Отклонения скорости вращения от среднего значения по данным ежедневных наблюдений радиогелиографа Nobeyama. Линии уровня проведены  $0, \pm 0.02, \pm 0.05, \pm 0.08, \pm 0.1$  град./сутки. Области замедления вращения затемнены

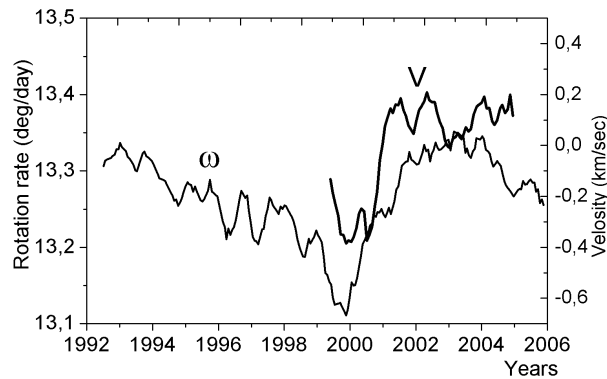


**Рис. 5.** Распределение лучевых скоростей по данным обсерватории Mount Wilson. Области с отрицательными значениями затемнены

эпоху максимума активности и дрейфуют к низким широтам, достигая экватора в эпоху следующего максимума активности.

С 1998 года на обсерватории Mount Wilson проводятся ежедневные наблюдения лучевых скоростей солнечной атмосферы. На рис. 5 представлена широтно-временная диаграмма распределения лучевых скоростей в узкой зоне вблизи центрального меридиана  $\pm 30^\circ$  в линии 5250.2A. В период 1998–2000 гг. вблизи экватора вещество поднималось к верхним слоям солнечной атмосферы. Сравнение вариаций скорости вращения по данным радиогелиографа Nobeyama с лучевой скоростью, полученной по данным наблюдений обсерватории Mount Wilson, представлено на рис. 6. Можно отметить сходство изменения в течение цикла активности.

В области средних и низких широт Солнца широтное распределение яркости высокой короны имеет характерную структуру бабочек, связанную с активностью пятен.



**Рис. 6.** Вариации скорости дифференциального вращения по данным радиогелиографа Nobeyama и лучевых скоростей по данным обсерватории Mount Wilson в экваториальной зоне  $\pm 10$  градусов

## 4 Обсуждение

Восстановленные в данной работе широтно-временные распределения показывают, что поле скорости зависит от фазы цикла. Появление активных областей с повышенной интенсивностью магнитного поля и достаточно большой площадью может приводить к замедлению скорости вращений, поскольку их вращение медленнее по сравнению с невозмущенной атмосферой (см. рис. 1). Таким образом, возможно, эффект замедления относится не ко всей атмосфере Солнца, а только к локальным областям активности, роль которых в максимуме активности повышается. В таком случае различные виды наблюдений могут давать различную картину крутильных колебаний. Так, крутильные колебания должны быть хорошо видны в радиодиапазоне, где вклад активных областей может достигать существенной величины от уровня спокойного Солнца. Это подтверждается анализом, представленным на диаграмме рис. 4. В то же время, сравнительный анализ изменения лучевых скоростей в верхних слоях солнечной атмосферы и крутильных колебаний указывает на наличие связи между этими течениями. В период максимума активности в околоэкваториальной зоне Солнца наблюдается всплытие вещества. Это связано с эрупцией магнитных полей, переносом медленно вращающихся слоев в верхние слои и, как следствие, замедление скорости вращения (см. рис. 6). В этот период наблюдается и смена течения меридиональной циркуляции (рис. 3).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 03-02-16091

## Литература

- Амброж (Ambroz P.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 253.  
 Бек, Дувал (Beck J.G., Duvall T.L.) // American Geophysical Union. Fall Meeting. 2001.  
 Гельфрейх и др. (Gelfreikh G.B., Makarov V.I., Tlatov A.G., Riehoakainen A., Shibasaki K.) // Astron. Astrophys. 2002. V. 389. P. 624.  
 Дерни (Durney B.) // Solar Phys. 1996. V. 169. P. 1.  
 Комм и др. (Komm R.W., Howard R. and Harvey J.W.) // Solar Phys. 1993. V. 143. P. 19.  
 Новембер и др. (November L.J.; Simon G. W.; Tarbell T.D. Title A.M.; Ferguson S.H.) // In NASA-Goddard Space Flight Center. Theoretical Problems in High Resolution Solar Physics. 1987. P. 2.  
 Симон, Вайс (Simon G.W., Weiss N.O.) // Astrophys. J. 1968. V. 69. P. 435.  
 Снодграсс, Дили (Snodgrass H., Diley S.B.) // Solar Phys. 1996. V. 163. P. 21.  
 Тлатов, Васильева (Tlatov A.G., Vasil'Eva V.V.) // in Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. IAU Symposium. No. 223. 2004. P. 149.

