

УДК 523.947-355

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

© 2006 г. О. Г. Бадалян<sup>1</sup>, В. Н. Обридко<sup>1</sup>, Ю. Сикора<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк, Россия

<sup>2</sup>Астрономический институт, Татранска Ломница, Словацкая Республика

Поступила в редакцию 15.06.2005 г.; принята в печать 07.09.2005 г.

Выполнен анализ вращения короны Солнца на основе оригинальной базы данных о яркости зеленой корональной линии FeXIV 530.3 нм, охватывающей 6 последних циклов активности. Выявлена зависимость скорости дифференциального вращения короны от фазы цикла. На фазе спада дифференциальное вращение значительно менее выражено, вращение короны близко к твердотельному. Более высокая степень дифференциальности (хотя и ниже, чем на фотосфере) проявляется на фазе роста, непосредственно перед максимумом, и иногда захватывает фазу максимума. Общая скорость вращения короны представлена как суперпозиция двух мод — быстрой и медленной. Синодический период быстрой моды вблизи экватора примерно равен 27 дням и несколько меняется со временем. Эта мода слабо дифференциальна и наиболее отчетливо выражена в середине фазы спада активности. Медленная мода проявляется только в высоких широтах на фазе роста активности и имеет средний период 31 день. Найден относительный вклад каждой из мод в общую скорость вращения в зависимости от времени и от гелиографической широты. Эти результаты указывают на то, что вся структура поля скоростей в конвективной зоне также должна меняться со временем. Такое изменение в ближайшем времени может быть проверено методами гелиосейсмологии.

PACS numbers : 96.60.P, 96.60.B

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изменился подход к анализу дифференциального вращения Солнца. Стало ясно, что различия в измеряемых скоростях трассеров связаны не только с их свойствами и собственными движениями, а отражают реальную картину вращения этих образований. Это требует внесения изменений в теории, описывающие наблюдаемую эволюцию, временную изменчивость и периодичность солнечной активности.

Скорость солнечного вращения измеряется по наблюдениям углового перемещения относительно медленно изменяющихся деталей в солнечной атмосфере — таких, например, как пятна, факелы, флоккулы, темные волокна, хромосферная сетка, яркие точки, корональные дыры, а также корреляции магнитограмм и т.д. (так называемый метод трассеров), или при помощи спектроскопических наблюдений. Каждый из методов дает несколько иную широтную зависимость, хотя большинство трассеров показывают одну и ту же скорость вращения на экваторе.

В литературе имеется огромное множество работ, посвященных вращению Солнца и, естественно, нет никакой возможности упомянуть все работы

и результаты в этой области. Мы ограничимся упоминанием некоторых относительно недавних работ, обзоров и монографий [1–10]. В целом, можно считать твердо установленным, что угловая скорость вращения в среднем уменьшается с широтой и глубиной; при этом она получается несколько различной при определении по различным образованиям солнечной активности.

Яркость зеленой корональной линии (Coronal Green Line Brightness — CGLB), представляющую излучение запрещенной спектральной линии FeXIV 530.3 нм, часто использовалась как трассер солнечного вращения в различных прежних исследованиях [11–21]. Все эти авторы использовали количественные данные о CGLB во всем диапазоне широт в нескольких солнечных циклах. По мере удлинения базы наблюдательных данных (сейчас данные о CGLB доступны с 1939 г.) исследователи использовали для анализа все более широкие временные интервалы.

Многочисленные исследования показали, что дифференциальное вращение в короне менее выражено, чем на фотосфере. Уже довольно давно было обнаружено, что в корональных крупномасштабных образованиях иногда наблюдает-

ся почти твердотельное вращение (см., например, [12, 22, 23]; скорость вращения корональных дыр была не так давно исследована в [24]. Для объяснения ряда наблюдательных особенностей вращения короны авторы [13] предположили возможное сосуществование твердотельного и дифференциального вращений в солнечной атмосфере. Вопрос о возможном существовании двух мод вращения короны рассматривался неоднократно, с наблюдательной [8, 14, 15, 21, 25, 26] и теоретической [27–29] точек зрения.

В настоящее время разнообразные законы вращения для различных образований в солнечной атмосфере рассматриваются как, в общем, правдоподобное отражение скоростей вращения на определенных глубинах Солнца, где укоренены различные локальные, крупномасштабные и глобальные поля, управляющие отдельными образованиями. Естественно, что единственным объяснением существования двух мод вращения может быть различие глубин укоренения соответствующих образований. Постепенное уменьшение скорости вращения с глубиной вполне согласуется с недавними результатами гелиосейсмологии.

Действительно, тонкие гелиосейсмологические измерения дают реальную картину угловой скорости вращения Солнца как функции глубины и широты. Это, в свою очередь, помогает уточнить механизмы возникновения тороидального магнитного поля и поддержания дифференциальности вращения на основе нелинейного взаимодействия процессов в конвективной зоне. Хотя в последнее время достигнуты определенные успехи в изучении механизмов возникновения дифференциального вращения [30], точные количественные расчеты — это все еще дело будущего. Таким образом, сопоставление свойств вращения, найденных для различных образований на солнечной поверхности, с данными, выводимыми из гелиосейсмологических измерений, может дать новый импульс в понимании этого сложного явления.

До сих пор дискуссионным остается вопрос о зависимости характеристик дифференциального вращения от фазы 11-летнего цикла. В ранних работах эта связь отрицалась. Затем стали появляться работы, в которых утверждалось наличие такой связи. В работе [13] (с использованием данных, впоследствии опубликованных в [31]), было показано, что период вращения короны на высоких широтах уменьшается на фазе спада активности и достигает максимальных значений на фазе роста. Вопрос о том, как изменяется скорость вращения короны с циклом активности неоднократно дискутировался в литературе (см. ссылки в [7, 20]). Сейчас связь характера вращения короны с циклом признается во многих работах, но результаты явно зависят от выбранного трассера. В рамках

бимодальной концепции изменение общего характера вращения с циклом активности должно указывать на меняющийся с фазой цикла относительный вклад той или иной моды.

В данной работе мы изучаем характеристики вращения солнечной короны по данным об излучении зеленой корональной линии FeXIV 530.3 нм. Детально рассмотрена широтно-временная зависимость периода вращения короны за 1939–2001 гг. Выявлено, что существует четко выраженная зависимость коэффициента дифференциальности вращения от фазы цикла активности. Далее показано, что многие особенности могут найти свое объяснение в рамках двухмодового характера вращения короны и рассмотрены пространственные и временные свойства этих двух мод. Кратко обсуждается связь полученных нами выводов с результатами гелиосейсмологических исследований.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Интенсивность самой яркой в оптическом диапазоне эмиссионной линии короны FeXIV 530.3 нм является, несомненно, очень информативным индексом солнечной активности. Особое преимущество индекса CGLB является практически одновременная его регистрация на всех широтах. Таким образом, наблюдения зеленой корональной линии позволяют получить непрерывное числовое поле данных на всей поверхности Солнца. Это дает возможность изучать вращение Солнца по однородному ряду данных в гораздо большем диапазоне широт, чем, например, по фотосферным трассерам. Данные о CGLB охватывают в настоящее время почти 6 циклов активности, начиная с 1939 г., и фактически представляют собой второй наиболее длинный ряд данных (после солнечных пятен) среди синоптических индексов солнечной активности.

Патрульные измерения CGLB проводились небольшим числом корональных станций, каждая из которых получала наблюдения на несколько различной высоте над лимбом и в своей собственной фотометрической шкале. Сведение всех наблюдений в единую систему представляет довольно сложную проблему. Сейчас существует несколько фотометрически однородных баз данных о яркости зеленой короны, отличающихся друг от друга в основном тем, какая именно из корональных станций была принята за фотометрический стандарт [32–34].

Дадим здесь основные характеристики нашей базы данных корональных наблюдений. Краткое описание можно найти, например, в [35–37]. Метод гомогенизации данных описан в [32, 38]. Патрульные коронографические измерения, ежедневно

проводившиеся небольшой сетью высокогорных обсерваторий, были объединены с целью получения фотометрически однородной базы данных об интенсивности эмиссионной корональной линии FeXIV 530.3 нм (данные для примерно 15% отдельных дней, не охваченных наблюдениями, были интерполированы). Измерения различных обсерваторий были сведены в единую фотометрическую шкалу и приведены к высоте 60'' над лимбом. Пространственное разрешение окончательных данных составляет один день по солнечной долготе ( $\sim 13^\circ$ ) и  $5^\circ$  по солнечной широте. Исходные измерения имеются как для восточного, так и для западного лимбов. Из них были получены данные на центральный меридиан как среднее из интенсивностей, измеренных за 7 дней до и 7 дней спустя даты прохождения центрального меридиана, т.е. среднее из величин, измеренных в моменты прохождения этого меридиана через восточный и западный лимбы, соответственно. При этом оригинальные позиционные углы были преобразованы в широты. Именно данные, приведенные на центральный меридиан, использовались для построения всех графиков и карт в данной работе. База данных охватывает временной интервал 1939–2001 гг.

В [21, 39] для исследования широтной и временной зависимости вращения солнечной короны мы использовали спектрально-временной анализ (СВАН), который представляет собой последовательное применение разложения в ряд Фурье по гармоническим функциям в перемещающемся временном окне. При таком разложении амплитуда (мощность) каждой из гармонических функций зависит от степени ее сходства с исходными данными. Это позволяет из множества гармонических функций выбрать ту, период которой наиболее близок к “квазипериоду” исходного распределения.

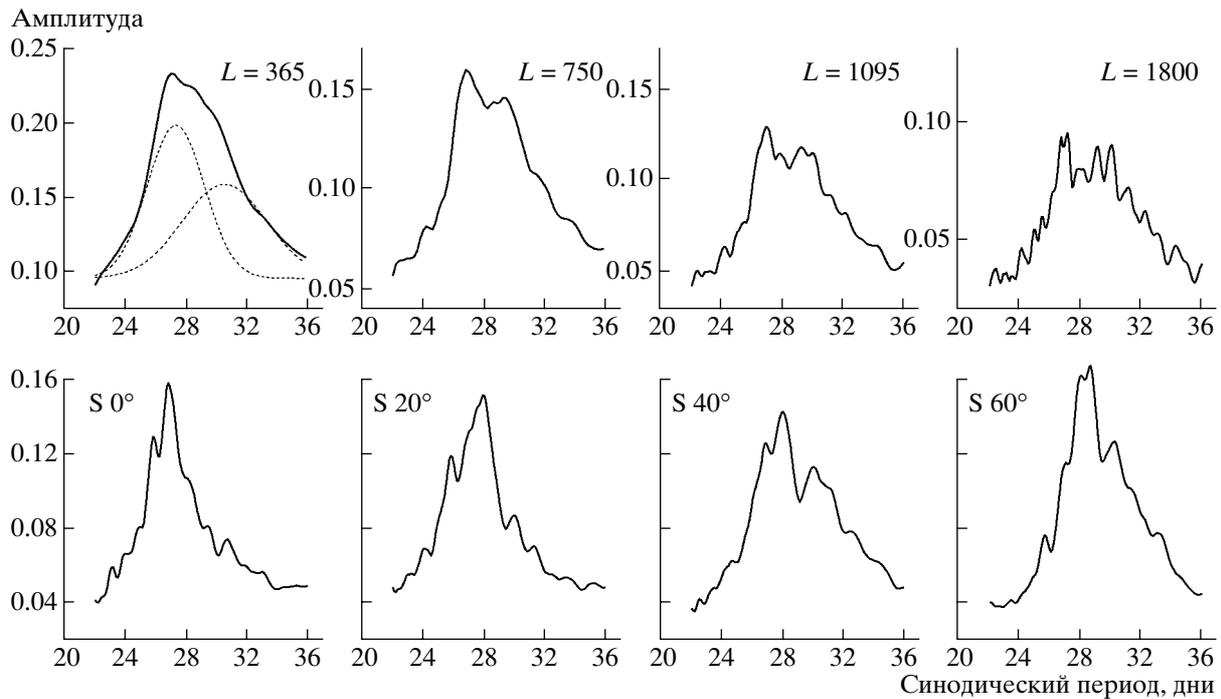
В данной работе мы использовали несколько иное применение этого метода, а именно, метод периодограмм. Метод периодограмм отличается от спектрально-временного анализа более высоким разрешением по периодам. Во временном окне выбранной длины вычисляется коэффициент корреляции последовательности ежедневных данных о яркости зеленой короны в данной широтной зоне с пробной гармонической функцией. Меняя период этих пробных функций, мы можем найти зависимость этого коэффициента корреляции от периода  $t$  пробной функции. При этом смысл коэффициента корреляции состоит в вычислении относительной доли колебаний с данным периодом  $t$  в общем спектре наблюдаемых в данном окне колебаний. Очевидно, что если в исследуемом окне имеются хорошо выраженные периодические вариации с определенным периодом  $T$ , коэффициент корреляции должен иметь максимум при  $t = T$ . Далее это окно смещается на некоторый временной

отрезок, и вся процедура повторяется. Полученные таким образом разложения позволяют затем построить общую карту амплитуд в координатах время–период колебаний (ниже будем называть ее двумерной периодограммой), а найденную зависимость коэффициента корреляции от периода — спектром колебаний.

Детальные расчеты периодограмм и полный их дальнейший анализ были проведены нами с различными наборами параметров — это длина  $L$  скользящего окна разложения, шаг дискретизации расчетов (иначе говоря, величина сдвига окна при каждом шаге) и разрешение по частотам (периодам). Это было сделано с целью выяснения зависимости конечных результатов от параметров расчетов. Выяснилось, что полученные результаты исследования слабо зависят от принятых параметров при изменении  $L$  от 1 года до 5 лет, шага дискретизации 1–3 мес. и шага по периодам в 0.1 и 0.2 дня. В данной работе мы предпочли свои дальнейшие результаты иллюстрировать при расчетах с длиной окна 3 года, с тем чтобы, с одной стороны, устранить влияние высокочастотных вариаций, а с другой — по возможности не искажать зависимость от фазы 11-летнего цикла активности. Таким образом, при последовательном прохождении всей реализации (т.е. совокупности всех данных по одному значению в день с 1939 по 2001 гг.) с окном 1095 дней (3 года) и с шагом дискретизации данных 81 день число получаемых разложений  $n$  оказалось равным 271. Разрешение по периодам было выбрано равным 0.1 дня.

Для иллюстрации на рис. 1 (верхний ряд графиков) мы приводим средние спектры мощности, полученные для разложений с окнами различной временной протяженности  $L$  для широты  $35^\circ$  северного полушария. Эти спектры были рассчитаны для 4 различных окон путем усреднения соответствующего числа  $n$  отдельных спектров, получаемых на каждом шаге разложения. Можно проследить, как изменяется вид среднего спектра в зависимости от выбранной длины окна разложения. Чем больше длина окна, тем более изрезанным получается спектр и несколько уменьшается его высота. Это, скорее всего, является следствием того, что относительная значимость отдельных периодов с течением времени меняется, и это проявляется тем сильнее, чем больше длина окна.

В нижнем ряду графиков рис. 1 показано постепенное изменение формы среднего спектра с возрастанием гелиографической широты для южного полушария, расчеты выполнены с окном  $L = 3$  года. Можно видеть, как с ростом широты постепенно увеличивается ширина контура среднего спектра, сам контур смещается в сторону больших



**Рис. 1.** Верхний ряд графиков — средние спектры мощности, полученные для разложений с окнами различной временной протяженности  $L$  в днях для широты  $35^\circ$  северного полушария. Левый верхний график — пример представления среднего спектра в виде суммы двух гауссиан. Нижний ряд графиков — постепенное изменение формы среднего спектра с увеличением гелиографической широты для южного полушария, длина окна — 1095 дней.

периодов и даже как бы распадается на два основных пика. При этом контур чаще всего является асимметричным; особенно четко это видно для сильно сглаженных контуров, получающихся при окне в 1 год (левый верхний график). Эти особенности определенно указывают на более широкий диапазон наблюдаемых периодов на средних и высоких широтах. Наблюдаемая двухвершинность наводит на мысль о возможной дискретности в значениях периодов, или мод вращения, что будет детально рассмотрено ниже.

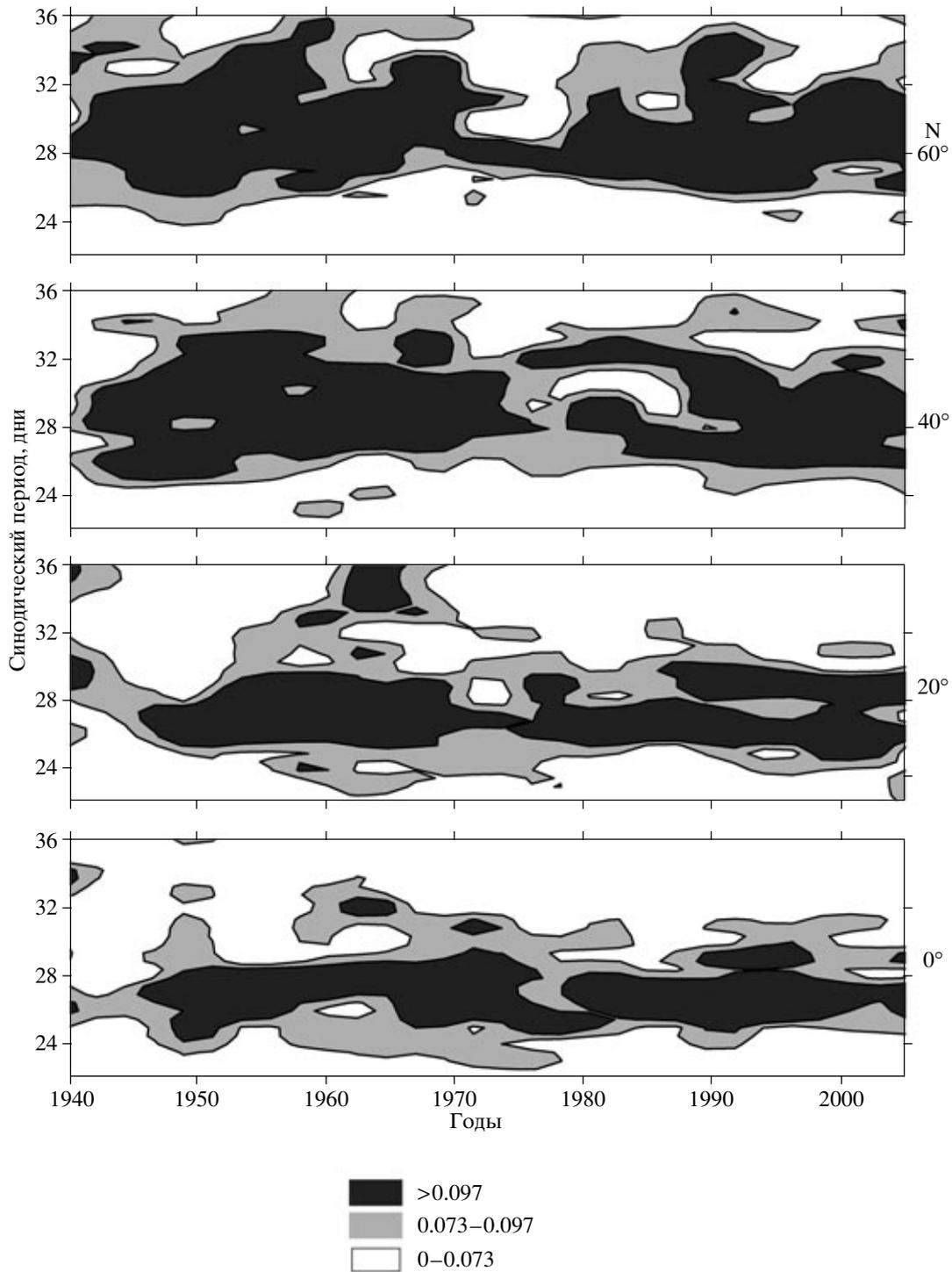
### 3. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ КОРОНЫ

Спектральный анализ проводился для каждой широты отдельно для всего временного интервала 1939–2001 гг. Таким образом, при широтном шаге в  $5^\circ$  мы могли построить 35 двумерных периодограмм, от  $0^\circ$  до широт  $\pm 85^\circ$ . Ввиду того, что для самых высоких широт определение скорости вращения короны получается с очень большой ошибкой (связанной в основном с тем, что на самых высоких широтах сильно увеличивается эффективный долготный интервал, к которому относится регистрируемая интенсивность линии), дальнейшее рассмотрение мы ограничили широтами  $\pm 75^\circ$ .

На рис. 2 показано несколько примеров двумерных периодограмм. Здесь приведены 4 карты для различных широт северного полушария. Области, где периоды имеют наибольшие амплитуды, окрашены черным цветом, области с наименьшими амплитудами — белым. Для наилучшего выделения типичных периодов, по сравнению с диаграммой на рис. 1 в [39], здесь проведено дополнительное сглаживание матрицы период–время. Можно полагать, что значение периода, соответствующее середине выделенной полосы амплитуд на карте период–время, примерно соответствует периоду вращения короны на данной широте.

Из рис. 2 видно, что по мере увеличения широты выделенная полоса периодов с наибольшими амплитудами смещается в сторону больших периодов. Это свидетельствует об уменьшении скорости (увеличении периода) вращения солнечной короны с широтой. Отчетливо видно также общее расширение этой полосы. В принципе, это расширение полосы могло бы быть интерпретировано как возрастание ошибки в определении скорости с увеличением широты. Однако для такого предположения нет существенных оснований. Ниже мы рассмотрим другую, более вероятную интерпретацию этого факта — возможное существование двух мод вращения короны.

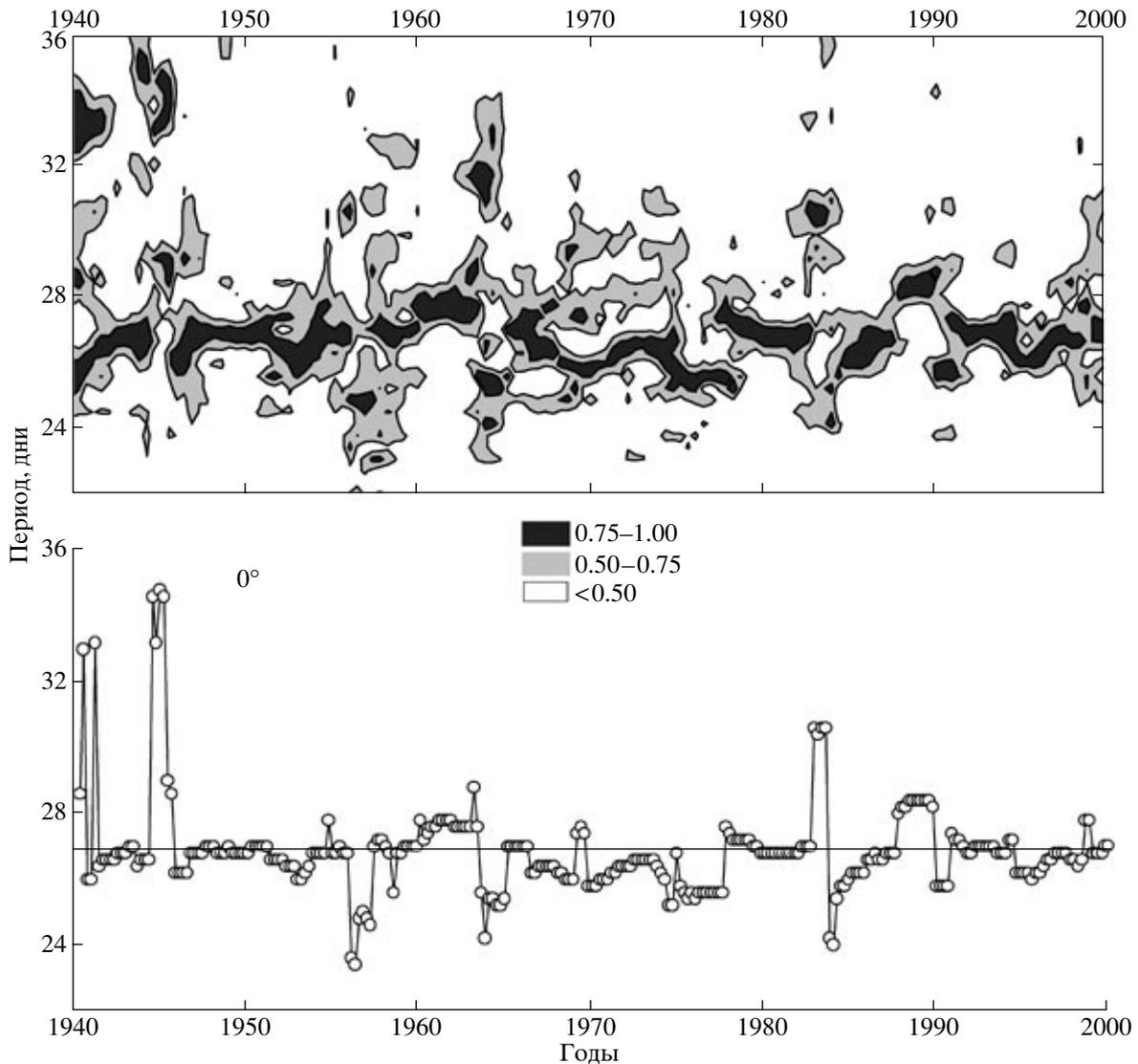
Для определения периода вращения короны  $T$



**Рис. 2.** Примеры двумерных периодограмм (амплитуды в координатах период–время) для различных широт северного полушария. Областям с наибольшими амплитудами соответствует черный цвет, областям с наименьшими амплитудами — белый.

мы приняли следующую процедуру. Для данной широты в каждом окне разложения определялся период, имеющий максимальное значение амплитуды. Среднее значение из всех найденных таким

образом  $n$  периодов принималось за соответствующий период вращения короны на данной широте. Ниже мы будем называть эту процедуру методом максимальных амплитуд. Пример такого определе-



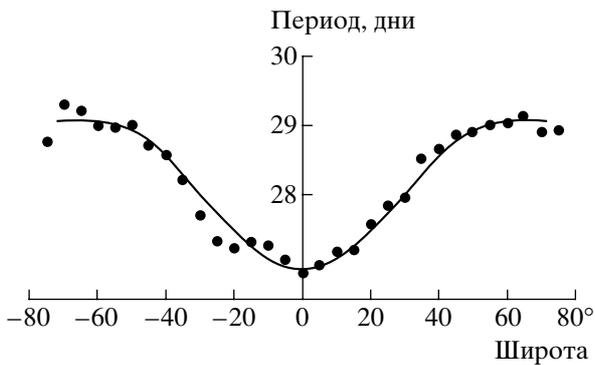
**Рис. 3.** Вверху — двумерная диаграмма для экватора, на которой амплитуды в каждом окне разложения нормированы на максимальную амплитуду в этом окне; черный цвет указывает области, в которых амплитуда составляет не менее чем 0.75 от максимальной. На нижнем графике светлыми кружками обозначены периоды  $T$ , определенные по методу максимальных амплитуд (см. текст). Горизонтальная линия — среднее значение  $T$ .

ния  $T$  показан на рис. 3. Вверху на этом рисунке приведена двумерная периододиаграмма для экватора, построенная специальным, несколько отличным от диаграмм на рис. 1, образом. Для лучшего выделения деталей карты все амплитуды в данном окне разложения нормировались на максимальную амплитуду в этом окне. Эта карта была построена с большим пространственным разрешением и не сглажена. При этом на рисунке не окрашены (т.е. белые) области, в которых амплитуды меньше, чем 0.5 от максимальной. Иначе говоря, окрашенными являются области, в которых амплитуда меньше максимальной в данном окне не более чем примерно на два среднеквадратичных отклонения.

На нижнем графике рис. 3 белыми кружками

обозначены периоды  $T$ , определенные по описанной выше процедуре для каждого из перемещающихся окон разложения. Горизонтальная линия — это среднее значение  $T$ , которое и принималось за значение периода на данной широте. Если наложить этот график рис. 3 на двумерную карту на том же рисунке, то можно видеть прекрасное, даже в деталях, совпадение выделенных (окрашенных черным) периодов на карте с белыми кружками на нижнем графике. Это означает, что принятый нами метод максимальных амплитуд для определения  $T$  позволяет достаточно надежно определять период вращения короны на каждой отдельной широте.

По всей совокупности найденных таким образом периодов можно найти среднюю за весь ис-



**Рис. 4.** Средняя за 1939–2001 гг. зависимость синодического периода вращения короны от широты. Темные кружки — периоды  $T$ , найденные для каждой широты северного и южного полушарий по методу максимальных амплитуд.

следуемый интервал времени зависимость периода вращения короны от широты. Эта зависимость приведена на рис. 4. Как можно видеть на этом рисунке, хотя значения  $T$  для северного и южного полушарий несколько различаются, это различие вполне находится в пределах точности определения среднего за весь исследуемый временной интервал периода вращения короны для данной широты. Сплошная линия, представляющая закон изменения периода вращения короны с широтой, была проведена симметрично относительно оси ординат через все точки, относящиеся к северному и южному полушариям — иначе говоря, все точки с левой части рисунка были отражены на его правую часть, по ним была проведена аппроксимирующая кривая, которая затем была симметрично продолжена в область отрицательных значений широты.

Рисунок 4 показывает, что на низких широтах синодический период вращения близок к 27 дням. После  $\pm 15^\circ$  период вращения начинает увеличиваться (т.е. скорость уменьшается) и постепенно доходит до значений, несколько превышающих 29 дней. Выше  $45^\circ$ – $50^\circ$  скорость вращения короны уже практически не меняется при увеличении широты. Сопоставление рис. 4 с результатами [14, 15] показывает, что скорости вращения короны, определенные в нашей работе методом периодограмм по всей имеющейся у нас базе данных, практически совпадают с результатами цитируемой работы, в которой исследовался значительной меньшей по временной протяженности ряд данных.

Другой метод определения периода  $T$  был предложен и детально описан нами в [39]. Он состоит в представлении среднего спектра мощности функцией Гаусса. Его применение показало, что получаемые с его помощью периоды практически не отличаются от приведенных на рис. 4. Отличие этого метода от метода максимальных амплитуд состоит в том, что в нем все периоды во всех окнах

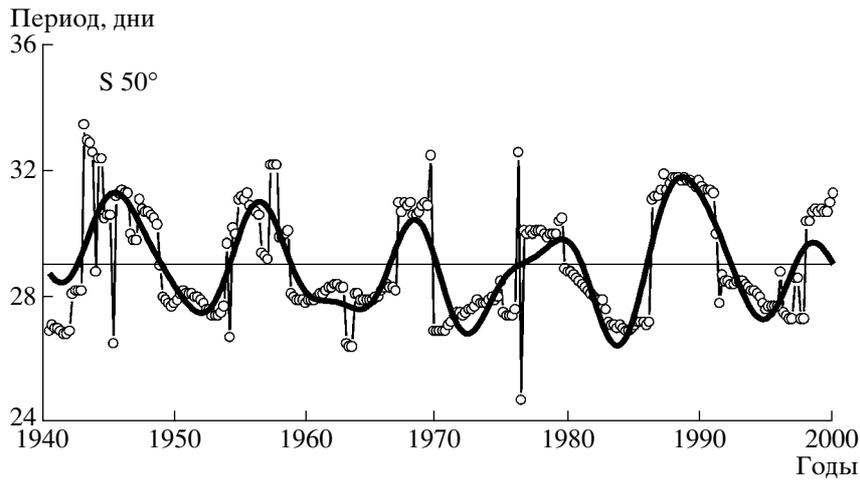
(в нашем случае это  $271 \times 70$  точек) представляются выбранной функцией (в данном случае, функцией Гаусса), тогда как метод максимальных амплитуд (нижний график на рис. 3) усредняет только предварительно выделенные периоды. В [39] было также количественно рассмотрено изменение с гелиографической широтой полосы выделенных периодов в методе максимальных амплитуд и аналогичное ему увеличение ширины гауссианы. И тот, и другой параметры (хотя и несколько по-разному) характеризуют увеличение разброса значимых периодов в разложении при определении среднего для данной широты значения  $T$ . Как уже было указано выше, это не следует интерпретировать, как увеличение ошибки определения периода вращения с широтой.

Рисунок 4 дает представление о некоторых средних характеристиках дифференциального вращения солнечной короны. Этот рисунок подтверждает неоднократно полученный другими исследователями вывод о том, что дифференциальное вращение короны существенно менее выражено, чем это обычно получается по трассерам на фотосфере или по доплеровскому смещению фраунгоферовых линий. Второй вывод, также ранее полученный в [14, 15], состоит в том, что после определенного значения широты скорость вращения короны не изменяется.

#### 4. ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОРОНЫ СО ВРЕМЕНЕМ

Выше на рис. 3 были приведены двумерная карта и график, отражающие некоторые характеристики вращения короны на экваторе. Рассмотрение аналогичных карт и графиков для других широт позволяет предположить, что период вращения короны изменяется со временем. На рис. 5 приведен график, построенный по методу максимальных амплитуд для широты  $50^\circ$  южного полушария. Здесь можно отчетливо видеть, что светлые кружки, показывающие период вращения короны в каждом отдельном окне периодограммы, ложатся то выше, то ниже горизонтальной линии (т.е. среднего значения  $T$ ). На этом и подобном ему графиках можно видеть также некоторую периодичность в изменении  $T$ .

Распределения периодов вращения короны, типа приведенного на нижнем графике рис. 3 и на рис. 5, позволяют построить общую диаграмму распределения  $T$  в координатах широта–время. Ввиду того, что, естественно, результаты определения скорости “зашумлены” (например, даже на нижнем графике рис. 3, построенном для экватора, можно видеть точки, значительно выпадающие из общей последовательности), для получения диаграммы широта–время мы применили процедуру



**Рис. 5.** Пример аппроксимации временной последовательности периодов  $T$ , определенных по методу максимальных амплитуд для широты  $50^\circ$  южного полушария, суммой первых 10 гармоник разложения этой последовательности в ряд Фурье. Горизонтальная линия — среднее значение периода  $T$ .

фильтрации результатов определения  $T$ . Для этого для каждой широты северного и южного полушарий последовательность  $n$  значений периодов вращения разлагалась в ряд Фурье из  $n/2$  членов, а затем вычислялась обратная свертка по некоторому числу гармоник, меньшему чем  $n/2$ . Свертка  $n/2$  гармоник позволяет описать исходную последовательность практически точно. Ограничение числа гармоник, по которым производится обратное суммирование, позволяет отсеять шумовую составляющую. В некотором смысле такая свертка близка к скользящему сглаживанию.

Для построения диаграммы периодов  $T$  в координатах широта—время мы использовали свертку по 10 первым гармоникам. Это позволяет отсеять гармоники с периодами колебаний больше 6 лет и ограничиться лишь долговременными изменениями скорости вращения короны. Для иллюстрации того, как это количество гармоник описывает исходное распределение  $T$ , на рис. 5 показана аппроксимация исходной последовательности из 271 значения десяти первыми гармониками (жирная линия). Видно, что сумма 10 первых гармоник вполне удовлетворительно описывает основные особенности временного изменения периода вращения короны. Ясно, что увеличение числа гармоник повышает точность описания исходной последовательности, но одновременно добавляет “шума” в окончательной диаграмме широта—время. Наши расчеты показали, что 10 гармоник — это оптимальное их количество. Следует отметить, что окончательный вид диаграммы широта—время почти не зависит от размера окна разложения, использовавшегося при расчетах периодограмм.

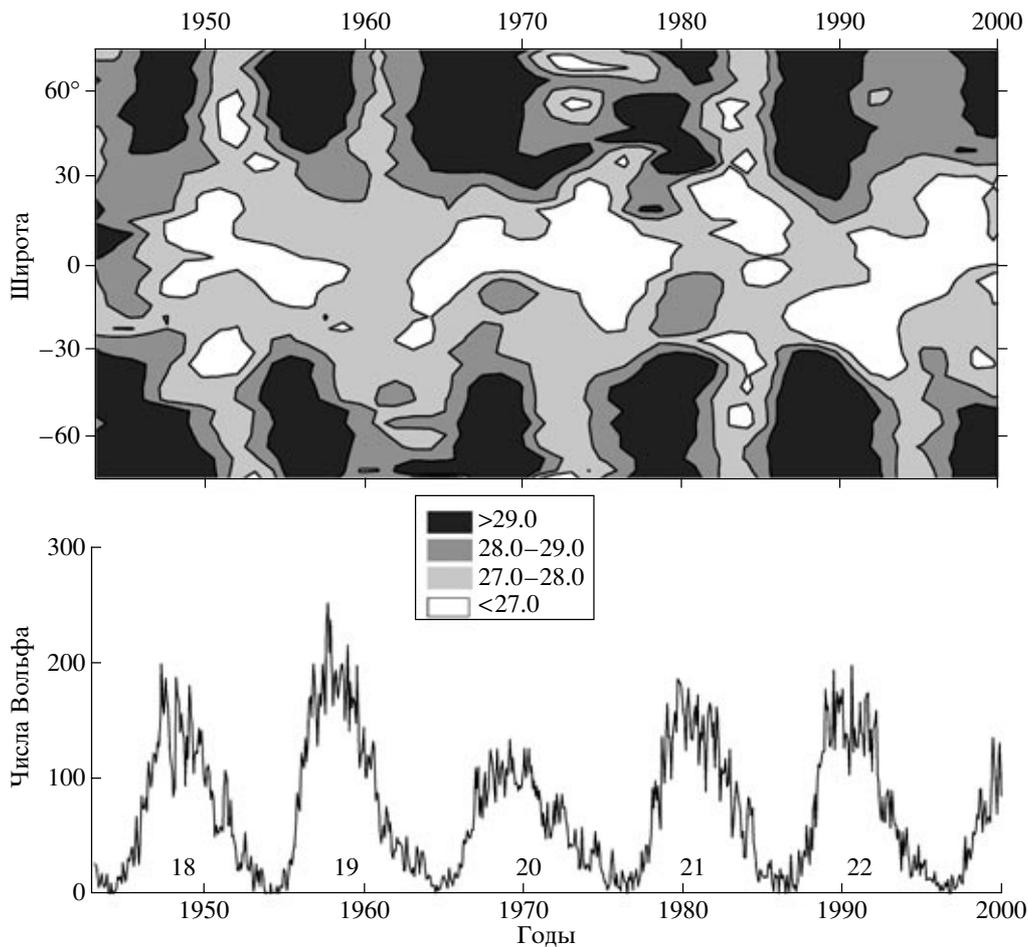
Такая процедура фильтрации была применена для всех широт обоих полушарий. Затем по резуль-

татам этих расчетов была построена карта периодов  $T$ , приведенная вверху на рис. 6. На этой карте наибольшие периоды вращения (т.е. наименьшие угловые скорости) окрашены черным цветом, степень почернения уменьшается с уменьшением периода. На описываемой карте прослеживается циклическая зависимость периода  $T$ . Прежде всего видно, что в интервалы времени, близкие к максимумам активности, на высоких широтах скорость вращения уменьшается (области, закрашенные черным). Так как при этом скорость вращения на экваторе не показывает значительного изменения со временем, это означает, что во временные интервалы, близкие к максимумам активности (точнее, на фазе роста, до достижения максимума), возрастает коэффициент дифференциальности вращения. Здесь под коэффициентом дифференциальности  $b$  имеется в виду коэффициент при  $\sin^2 \varphi$  (где  $\varphi$  — гелиографическая широта) в традиционном представлении угловой скорости вращения короны  $\omega$ :

$$\omega = a + b \sin^2 \varphi. \quad (1)$$

На фазе спада активности, наоборот, коэффициент дифференциальности уменьшается. Скорость вращения на высоких широтах мало отличается от экваториальной, и общий характер вращения короны близок к твердотельному. Как следует из обсуждаемой диаграммы, вращение короны наиболее близко к твердотельному примерно в середине фазы спада. Это видно из сопоставления диаграммы с нижним графиком на рис. 6, на котором приведены среднемесячные числа Вольфа.

Зависимость угловой скорости вращения  $\omega$  от широты и изменение этой зависимости со временем позволяет получить временной ход коэффициента

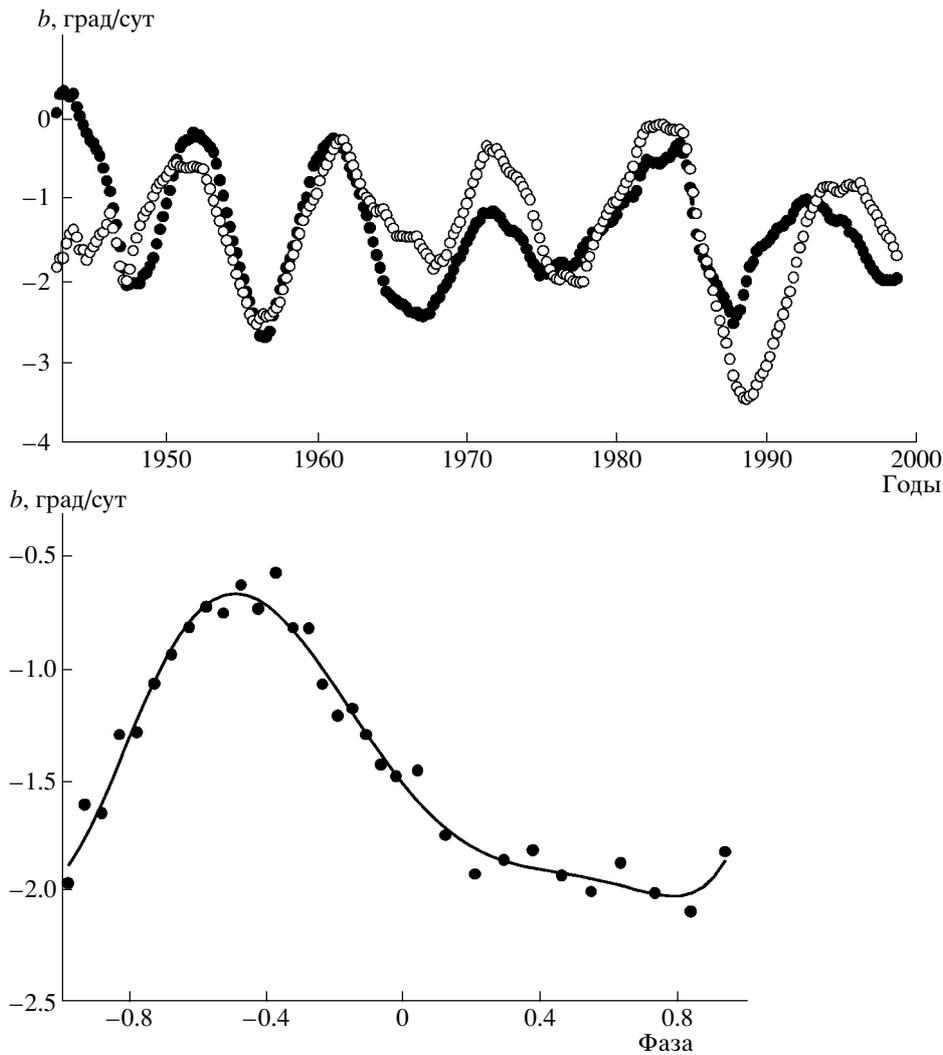


**Рис. 6.** Вверху — карта распределения периодов вращения короны в координатах широта—время. Черным цветом окрашены области медленного вращения короны, в которых синодический период превышает 29 дней. Внизу приведены среднемесячные числа Вольфа; вдоль оси абсцисс указаны номера циклов активности.

дифференциальности  $b$  в формуле (1) без использования упомянутой выше фильтрации. Для каждого данного момента времени коэффициенты  $a$  и  $b$  можно получить методом наименьших квадратов, зная значение  $\omega$  для каждой отдельной широты. Однако непосредственное применение метода наименьших квадратов ко всем значениям  $\omega$  в данной временной точке (всего имеется 271 точка в случае окна  $L = 1095$  дней) приводит к сильной дисперсии получаемых коэффициентов  $a$  и  $b$ . Поэтому мы находили “сглаженные” значения  $a$  и  $b$ , используя для усреднения скользящий интервал по 16 временных точек, и уже для них методом наименьших квадратов определяя искомые коэффициенты. Коэффициенты  $a$  и  $b$  определялись отдельно для северного и южного полушарий; при этом мы ограничились широтами  $\pm 60^\circ$ , так как для высоких широт в формуле (1) уже недостаточно двух членов, а для учета третьего члена требуются очень точные данные для высоких широт. Таким образом, для составления нормальных уравнений

в методе наименьших квадратов для каждой временной точки использовалось по  $13 \times 16$  исходных уравнений (13 широт для каждого из полушарий, включая экватор, и по 16 значений  $\omega$  и  $\sin^2 \varphi$  для каждой широты). Получаемые по этой процедуре значения  $a$  и  $b$  можно считать как бы скользящими “сглаженными” за  $\sim 3.5$  года.

Результаты приведены на верхнем графике рис. 7, отдельно для северного (темные кружки) и южного (светлые кружки) полушарий. Этот график подтверждает выводы, сделанные по рис. 6, а именно: (1) коэффициент дифференциальности вращения короны  $b$  изменяется со временем; (2) коэффициент дифференциальности, а следовательно и скорость вращения в северном и южном полушариях изменяются в значительной мере синхронно; (3) во всех циклах на фазе спада коэффициент дифференциальности приближается к нулю, т.е. вращение короны становится близким к твердотельному; (4) на фазе роста дифференциальное вращение короны становится наиболее выра-



**Рис. 7.** Вверху — зависимость от времени коэффициента дифференциальности  $b$  в формуле (1) для северного (темные кружки) и южного (светлые кружки) полушарий. Внизу — зависимость коэффициента  $b$  от фазы цикла; значения  $b$  усреднены по всем циклам, северное и южное полушария объединены.

женным, т.е. коэффициент  $b$  достигает наибольшей отрицательной величины, оставаясь при этом меньше по абсолютной величине коэффициента дифференциальности, типичного для фотосферы (что скорее всего это отражает пониженную дифференциальность тех слоев в конвективной зоне, с которыми связано крупномасштабное магнитное поле короны).

Обнаруженные циклические изменения дифференциального вращения короны удобно представить в зависимости от фазы цикла. Фаза цикла рассчитывалась согласно [40] как

$$\Phi = (\tau - m) / (|M - m|). \quad (2)$$

Здесь  $\tau$  — текущий момент времени,  $M$  и  $m$  — моменты ближайших максимума и минимума 11-летнего цикла, соответственно. Таким образом,

согласно (2) в минимуме цикла фаза равна 0, положительна на возрастающей ветви цикла и отрицательна на убывающей ветви. Для вычисления фазы цикла были взяты общепринятые значения моментов минимумов и максимумов циклов активности, момент наступления минимума текущего 23-го цикла (прогноз) принят равным 2006.5.

Зависимость коэффициента дифференциальности от фазы цикла представлена на нижнем графике рис. 7. Здесь приведены значения  $b$ , усредненные по всем циклам, совместно по северному и южному полушариям. Каждая точка на этом графике есть усреднение по 13 временным моментам, представленным на верхнем графике рис. 7, т.е. является средним из 130–150 значений — 5 или 6 циклов (так как 23-й цикл — неполный), 2 полушария и

13 моментов времени. Формальная ошибка определения коэффициента  $b$  на этом графике составляет  $\sim 0.5^\circ/\text{сут}$ , однако, поскольку существует реальное различие между циклами, истинная ошибка, конечно, меньше.

Рисунки 6 и 7 показывают, что возникновение вращения, наиболее близкого к твердотельному, происходит вблизи момента фазы  $\Phi = -0.5$ , т.е. на ветви спада активности, примерно за 3 года до минимума. Здесь квазитвердотельное вращение фиксируется достаточно надежно и во всех циклах соответствует примерно одному и тому же значению  $\Phi$ . Достаточно уверенно определяется и время возникновения вращения с наибольшей дифференциальностью. Эта точка находится на ветви роста активности (иногда захватывает максимум) и в среднем соответствует моменту  $\Phi = +0.5$ , примерно за 1–1.5 года до максимума. Отметим при этом, что в каждом отдельном цикле момент наиболее высокой дифференциальности определяется довольно точно, но, в отличие от квазитвердотельного вращения, положение момента максимальной дифференциальности на фазе роста несколько различно в разных циклах, и поэтому на сводной кривой на нижнем графике рис. 7 получается нечто вроде плато высоких значений коэффициента  $b$ .

С учетом зависимостей, приведенных на рис. 7, карту на рис. 6 можно теперь интерпретировать следующим образом. Квазитвердотельное вращение короны на фазе спада постепенно сменяется вращением со все более выраженной дифференциальностью. Это можно связать с тем, что на фазе роста на высоких широтах в короне возникают медленно вращающиеся элементы, что и приводит к общему наблюдаемому увеличению периода  $T$  на высоких широтах. Как видно из рис. 3 (нижний график) и из карты на рис. 6, скорость на экваторе также не постоянна, и в ее временном изменении есть некоторый намек на 22-летний период.

Следует здесь отметить, что уже более 30 лет назад некоторые характеристики вращения солнечной короны, близкие к детально рассмотренным нами выше, были указаны в [13]. Авторы [13] методом автокорреляционного анализа по значительно менее протяженной базе данных с существенно меньшим пространственным и временным разрешением, чем в используемой нами, получили, что на низких широтах синодический период вращения близок к 27 дням и почти не изменяется в течение цикла. На высоких широтах, примерно за 2 года до минимума, период вращения короны начинает увеличиваться, достигая  $\approx 29.4$  дня за 1–2 года до максимума; на фазе спада активности на этих широтах период вращения начинает убывать и постепенно достигает  $\approx 27.8$  дня. Наше исследование, проведенное по гораздо более представительному

материалу, подтверждает ряд выводов работы [13] и дает новое развитие идей, высказанных в ней.

## 5. ДВЕ МОДЫ ВРАЩЕНИЯ КОРОНЫ

Многие детали, характеризующие изменение периода вращения короны с широтой и со временем, дают основания полагать, что наблюдаемое вращение короны является суперпозицией двух компонент, или двух мод. Сам средний закон дифференциального вращения короны, представленный на рис. 4, наводит на мысль, что на низких широтах мы видим одну моду, более быструю, на высоких — более медленную, а на средних — некоторую их композицию. К такому же заключению нас приводит асимметричность и даже иногда двухвершинность контуров на рис. 1. В [39] была рассмотрена возможность представления таких контуров в виде суммы двух гауссиан; здесь пример такого представления дается для левого верхнего контура на рис. 1. Кроме того, двумерные периодограммы (примеры которых приведены на рис. 2), построенные с большим пространственным разрешением, показывают как бы разделение общей полосы на две составляющие, особенно выраженное на средних широтах [21, 39]; при еще большем пространственном разрешении (как здесь на диаграмме рис. 3) на средних широтах можно видеть переход с одной моды на другую. Еще более отчетливо это прослеживается на графиках типа рис. 5, на котором показана зависимость периода вращения от времени для широты  $50^\circ$  южного полушария. Можно видеть, что скорость в определенные моменты как бы перескакивает из одного квазистойчивого состояния в другое.

Строго говоря, эти аргументы могут говорить как о наличии двух мод вращения, существующих одновременно и связанных с различными объектами на Солнце, так и об общем изменении характера вращения всей короны. В первом случае объекты, дающие вклад в излучение короны, распределены на Солнце, каждый по своему закону, и мы можем объяснить наблюдаемые закономерности как некий интегральный эффект. Есть все основания связать эти объекты с локальными и крупномасштабными полями. Некоторые дополнительные аргументы в этом отношении можно получить, обратившись к структуре вращения конвективной зоны по данным гелиосейсмологии [41]. С другой стороны, все наблюдаемые эффекты можно было бы объяснить также и изменяющимся во времени характером вращения всей короны, которое при интегрировании по времени приводит к наблюдаемому среднему закону вращения (рис. 4), двухвершинности средних спектров (рис. 1) и многим другим особенностям.

Первая возможность, однако, представляется значительно более логичной. Именно к выводу о возможном одновременном сосуществовании двух мод вращения Солнца (квазитвердотельной и слабо дифференциальной) неоднократно приходили многие исследователи [12, 13, 26, 42, 43]. В нижней короне, где светится линия FeXIV 530.3 нм, имеются многочисленные структурные образования (петли, различные скопления петель, корональные конденсации, корональные дыры и т.п.), “неявно” служащие трассерами при определении закона вращения короны. Различные объекты, связанные и контролируемые магнитными полями различных масштабов, укоренены на разной глубине под фотосферой и отражают вращение этих глубинных слоев Солнца (которое в последние годы интенсивно изучается методами гелиосейсмологии). Различие глубин укоренения отдельных трассеров может привести к различию в характере их вращения. Все это говорит о том, что, вероятнее всего, многие наблюдаемые особенности во временном и пространственном изменении характера вращения короны могут объясняться именно сосуществованием двух мод.

Ясно, что общая задача разложения вращения короны на две моды является неопределенной, неоднозначной. Поэтому для ее решения требуется ввести некоторые дополнительные условия. Самым простым из них могло бы быть предположение о двух “квазитвердотельных” модах: примерно 26–27 дней и 30–31 день. Их композиция, в которой вклад каждой из них изменяется со временем и с широтой, даст наблюдаемую общую картину распределения скорости вращения короны, представленную на карте на рис. 6. Однако это предположение кажется не слишком вероятным, так как мы видим, что оно должно было бы привести к устойчивому положению пиков с максимальной амплитудой в наших спектрах для каждого отдельного окна, чего на самом деле не наблюдается. Кроме того, поскольку в конвективной зоне областей со строго твердотельным вращением не обнаружено, такое предположение для короны выглядело бы слишком искусственным.

Более вероятным представляется несколько иное предположение. Быстрая мода существует практически всегда, но имеет различный вклад в суммарное вращение короны в зависимости от широты и от времени. Наиболее отчетливо эта мода выражена на фазе спада активности, когда она существует как бы “в чистом виде”. Эта мода слабо дифференциальна, а ее скорость на экваторе несколько меняется со временем. Вторая мода, медленная, также может существовать всегда и тоже с разным вкладом. Но она заметна, с возможностью ее выделения, только в отдельные интервалы времени и, как правило,

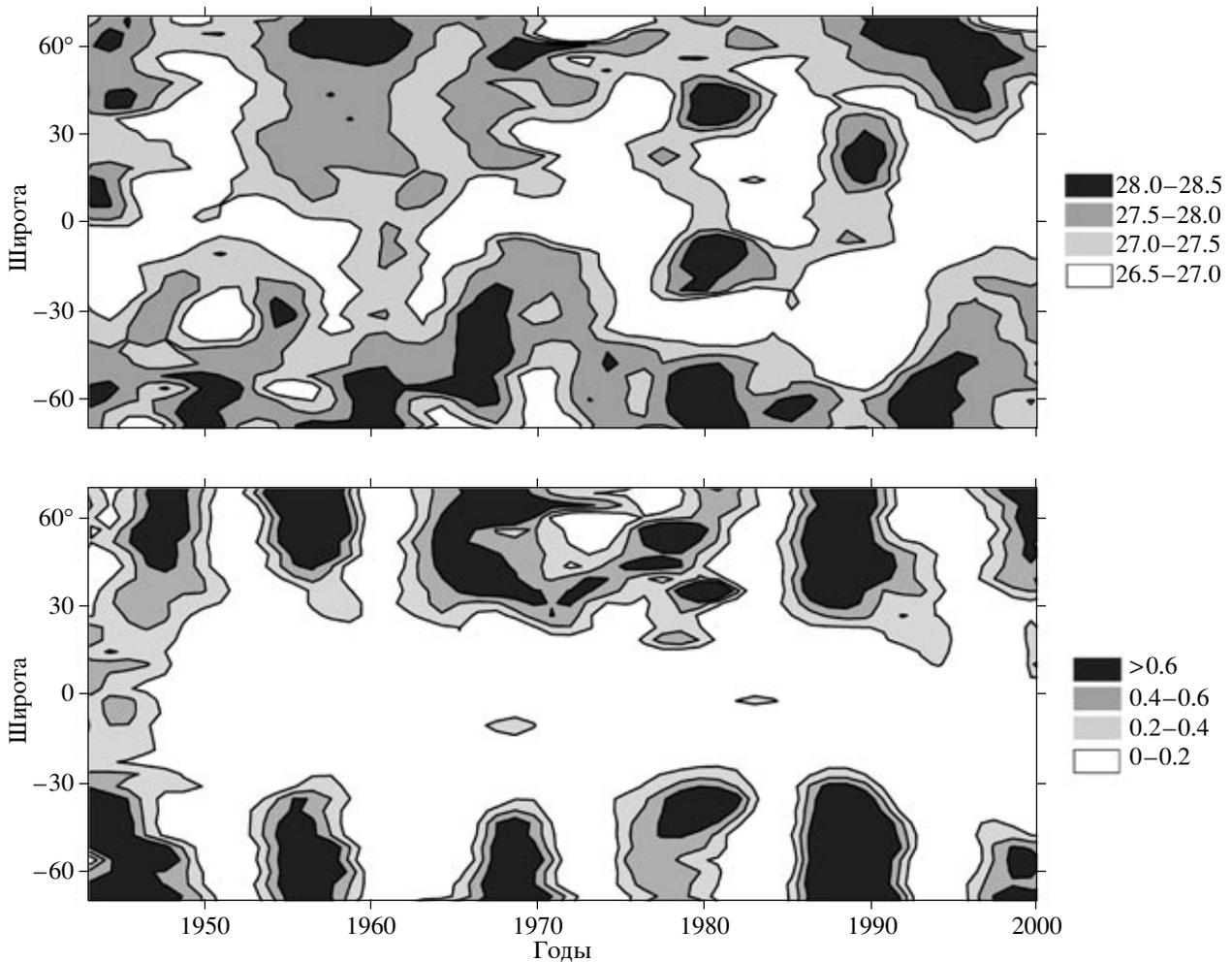
на высоких широтах. Определить ее возможную дифференциальность затруднительно, поскольку она ограничена относительно узким диапазоном широт.

Нами в [21, 39] был предложен метод выделения каждой из мод и были получены их характеристики. Исходя из рассмотрения СВАН-диаграмм, мы приняли условие, что линия раздела периодов двух мод проходит по значению 29 дней, т.е. одна из мод имеет период меньше 29 дней, а другая — больше 29 дней. В соответствии с этим условием в каждом окне все периоды были разделены на две последовательности — периоды менее и более 29 дней, соответственно. В каждой из последовательностей был найден свой период с максимальной амплитудой, а затем найдены средние значения периодов, которые можно принять за периоды каждой из мод для данной широты. Окончательно, в [21, 39] было получено, что период быстрой моды изменяется примерно от 27 дней на экваторе до 28 дней на высоких широтах, а медленная мода с широтой не изменяется, и ее период равен 30.5 дня.

В данной работе мы несколько модифицировали эту процедуру выделения двух мод вращения короны. Для быстрой моды, как и в [21, 39], для каждой широты применялся метод максимальных амплитуд, но только для диапазона периодов, не превышающих 29 дней. Это условие позволяет получить для быстрой моды такие же последовательности, как и на рис. 5, но с указанными ограничениями по периодам. Совокупность этих последовательностей для всех широт северного и южного полушарий дает возможность построить общую карту распределения быстрой моды. Она приведена вверху на рис. 8. Для ее построения мы так же, как и для карты на рис. 6, применяли свертку по 10 первым гармоникам для каждой широты. Можно видеть, что в большинстве областей карты период быстрой моды изменяется в пределах от ~26.5 до ~28 дней и лишь иногда несколько превышает 28 дней.

Что касается медленной моды, то поскольку, как это следует из карты на рис. 6, она заметна лишь в определенные моменты времени, только для этих моментов ее и следует определять. Например, на рис. 5 это — точки, лежащие над горизонтальной линией. Если медленную моду выделять только в эти временные интервалы (в отличие от [21, 39]), то ее скорость лежит в пределах 30.5–31.5 дней.

Зная теперь для каждого момента времени и для каждой широты величины периодов (скоростей) этих двух мод, можно построить карту распределения вклада любой из мод в координатах широта–время. Обозначим относительный вклад быстрой моды в общую скорость вращения короны через  $D$ , тогда вклад медленной моды будет равен  $1 - D$ . Наблюдаемая угловая скорость вращения



**Рис. 8.** Вверху — диаграмма широта—время периодов быстрой моды вращения короны (шкала периодов дана в днях). Внизу — карта распределения вклада медленной моды  $1 - D$  в суммарную скорость вращения короны.

короны  $\omega$  (синодические периоды представлены на карте рис. 6) выразится тогда как

$$\omega = \omega_1 D + \omega_2(1 - D), \quad (3)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — угловые скорости быстрой и медленной мод вращения короны, соответственно. Эта формула позволяет рассчитать распределение вклада каждой из мод в зависимости от времени и широты.

Для расчетов по формуле (3) мы приняли распределение периодов вращения для быстрой моды, приведенное на верхней карте на рис. 8, а для периода медленной моды было принято среднее значение 31 день. Нижняя карта рис. 8 показывает вклад медленной моды  $1 - D$ . Как и можно было ожидать, карта для величины  $1 - D$  похожа на карту на рис. 6. Иначе говоря, вклад медленной моды, естественно, значителен на тех широтах и в те временные интервалы, когда из наблюдений получаются большие периоды (т.е. малые скорости)

вращения. Как показывает нижняя карта на рис. 8, на низких широтах всегда доминирует быстрая мода, она же дает основной вклад в суммарное вращение на фазах спада активности. Отметим здесь, что если для быстрой моды принять наиболее простой закон вращения, т.е. взять некоторое среднее значение коэффициента дифференциальности  $b$ , а для экватора — временной ход, соответствующий нижнему графику на рис. 3 (за исключением, естественно, тех моментов времени, когда период превышает 29 дней), то карта вклада медленной моды, вычисленная по формуле (3), практически не изменится. Это связано с тем, что в тех областях карты, где доминирует медленная мода, вклад быстрой моды настолько мал, что почти не влияет на вычисляемое значение  $1 - D$ .

В [21, 39] был определен относительный вклад быстрой и медленной мод исходя из среднего закона дифференциального вращения (рис. 4). Расчеты привели к выводу, что вклад быстрой моды

всюду является значительным и даже на высоких широтах составляет примерно 40%. В терминах настоящей статьи это означает, что на высоких широтах примерно столько по времени доминирует быстрая мода.

## 6. СВЯЗЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИИ

В последние годы гелиосейсмология достигла очень больших успехов. Проведенные тонкие эксперименты позволили, в частности, определить скорость вращения подфотосферных слоев Солнца в зависимости от глубины и от широты. Замечательные рисунки, иллюстрирующие эти достижения, представлены в [41].

Сопоставим полученные нами скорости вращения короны с данными гелиосейсмологии. Синодический период в экваториальной области для быстрой моды равен 27 дням, или  $13.333^\circ/\text{сут}$ . Угловая сидерическая скорость составляет  $14.319^\circ/\text{сут}$ . Один сидерический оборот совершается за 25.14 дней, что равно 460 нГц. Это значение примерно соответствует скорости вращения Солнца в экваториальной области в подфотосферном слое вплоть до основания конвективной зоны. Аналогично, для медленной моды, которая как показано выше, доминирует на фазе роста в высоких широтах, имеем: синодический период равен 31 день, соответствующая угловая сидерическая скорость равна  $12.598^\circ/\text{сут}$ . Следовательно, один сидерический оборот совершается за 28.57 дней, что составляет 405 нГц. Это соответствует скорости вращения Солнца вблизи поверхности на широтах около  $50^\circ$ , или скорости на уровне  $0.8 R_\odot$ , практически не изменяющейся от полюса до широты  $50^\circ$ , по данным гелиосейсмологии. Заметим, что эта модель получена в [41] для фазы роста 23-го цикла. В это время, согласно нашим выводам, и существуют две моды вращения короны, согласующиеся с данными гелиосейсмологии.

Таким образом, можно полагать, что дифференциальное вращение солнечной короны в значительной степени отражает вращение ее внутренних слоев. Трассеры, связанные с соответствующими слоями в конвективной зоне, вращаются по разным законам, происходит смешивание областей, движущихся с различной скоростью, что приводит к наблюдаемому вращению солнечной короны. Можно полагать при этом, что активные области короны, расположенные в низких широтах, управляются в большей степени локальными магнитными полями, источник которых находится в верхней части подфотосферных слоев, в то время как корона более высоких широт существует под влиянием глобальных, крупномасштабных полей, ориентированных в области тахоклины.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено детальное исследование пространственных и временных характеристик вращения солнечной короны на основе нашей базы данных о яркости зеленой корональной линии FeXIV 530.3 нм, охватывающей примерно 6 последних циклов активности (1939–2001 гг.). Использовался периодограммный метод анализа. Получены следующие принципиальные результаты.

1. Рассмотрение интегральных, т.е. средних за весь изучаемый временной интервал, характеристик вращения короны, проведенное методом периодограмм, подтвердило полученный ранее вывод о том, что дифференциальное вращение короны менее выражено, чем это получается по фотосферным трассерам. На низких широтах синодический период вращения близок к 27 дням. После  $\pm 15^\circ$  период вращения начинает увеличиваться и постепенно доходит до значений, несколько превышающих 29 дней. Выше  $45^\circ$ – $50^\circ$  скорость вращения короны уже практически не изменяется (рис. 4).

2. Более детальный анализ показал, что скорость дифференциального вращения короны изменяется со временем (рис. 6). Это изменение носит периодический характер и связано с 11-летним циклом активности. На фазе спада активности, примерно в ее середине, степень дифференциальности понижена, вращение короны близко к твердотельному. Более высокая степень дифференциальности (но все же более низкая, чем на фотосфере) проявляется на фазе роста активности, и иногда захватывает фазу максимума. Наибольший коэффициент дифференциальности достигается примерно в середине фазы роста активности, и этот временной интервал несколько меняется от цикла к циклу.

3. Показано, что общая скорость вращения короны может быть представлена в виде суперпозиции двух мод, быстрой и медленной, и предложен метод выделения этих мод. Получено, что синодический период быстрой моды вблизи экватора примерно равен 27 дням и несколько меняется со временем. Эта мода слабо дифференциальна, на высоких широтах ее период доходит примерно до 28 дней. Она существует всегда и на всех широтах. Примерно в середине фазы спада она выражена наиболее отчетливо, “в чистом виде”. Медленная мода заметно проявляется только в высоких широтах, на фазе роста активности. Синодический период этой моды близок к 31 дню.

4. На основе полученного пространственно-временного распределения периодов вращения обеих мод рассчитан относительный вклад каждой из мод в общую скорость вращения. Получено, что этот вклад зависит как от времени, так и от

гелиографической широты. На низких широтах вращение короны практически полностью определяется быстрой модой, она также доминирует в середине фазы спада активности. Медленная мода полностью преобладает на высоких широтах на фазе роста активности, где ее вклад доходит до 100% (рис. 8).

5. Изложенные выше результаты непосредственно указывают на то, что вся структура поля скоростей в конвективной зоне также должна меняться со временем. Нами показано, что на фазе роста характеристики двух мод вращения короны удовлетворительно согласуются с существующей моделью вращения Солнца в конвективной зоне [41]. Из наших результатов следует, что модель вращения в конвективной зоне на фазе спада должна быть другой, в ней должна быть более сильно выражена быстрая мода с низкой дифференциальностью на всех широтах. Этот вывод в ближайшем будущем может быть проверен методами гелиосейсмологии.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 05-02-16090), и грантом VEGA 2/4013/24 Словацкой академии наук.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. H. Schröter, *Solar Phys.* **100**, 141 (1985).
2. R. S. Bogart, *Solar Phys.* **110**, 23 (1987).
3. G. Rüdiger, *Differential Rotation and Stellar Convection (Sun and Solar-Type Stars)* (Berlin: Akademie-Verlag, 1989).
4. K. G. Libbrecht and C. A. Morrow, in: *Solar Interior and Atmosphere*, eds A. N. Cox, W. C. Livingston, and M. S. Matthews (Tucson: University of Arizona Press, 1991), p. 479.
5. H. B. Snodgrass, in: *The Solar Cycle*, ed. K. L. Harvey, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser. **27**, 205 (San Francisco, 1992).
6. C. J. Schrijver and C. Zwaan, *Solar and Stellar Magnetic Activity*, Cambridge Astrophys. Ser. **34** (Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2000).
7. Z. Mouradian, R. Bocchia, and C. Botton, **394**, 1103 (2002).
8. A. F. Lanza, M. Rodono, I. Pagano, P. Barge, and A. Llebaria, *Astron. and Astrophys.* **403**, 1135 (2003).
9. P. V. Foukal, *Solar Astrophysics*, 2nd revised edition (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2004).
10. M. Stix, *The Sun (An Introduction)*, corrected 2nd edition (Berlin: Springer, 2004).
11. M. Trellis, *Ann. d'Astrophysique*, Suppl. No. 5 (1957).
12. J. Sýkora, *Solar Phys.* **18**, 72 (1971).
13. E. Antonucci and L. Svalgaard, *Solar Phys.* **34**, 3 (1974).
14. V. Letfus and J. Sýkora, *Atlas of the Green Corona Synoptic Charts for the Period 1947–1976* (Bratislava: Veda Publ. House, 1982).
15. V. Letfus and J. Sýkora, *Hvar Obs. Bull.* **6**, 117 (1982).
16. D. G. Sime, R. R. Fisher, and R. C. Altrrock, *Astrophys. J.* **336**, 454 (1989).
17. J. Rybák, *Hvar Obs. Bull.* **24**, 135 (2001).
18. В. И. Макаров, А. Г. Тлатов, *Астрон. журн.* **72**, 749 (1995).
19. В. И. Макаров, А. Г. Тлатов, *Астрон. журн.* **74**, 615 (1997).
20. R. C. Altrrock, *Solar Phys.* **312**, 23 (2003).
21. O. G. Badalyan and J. Sýkora, *Adv. Space Res.*, submitted (2004).
22. A. F. Timothy, A. J. Krieger, and G. S. Vaiana, *Solar Phys.* **42**, 135 (1975).
23. W. J. Wagner, *Astrophys. J.* **198**, L141 (1975).
24. J. E. Insley, V. I. Moore, and R. A. Harrison, *Solar Phys.* **160**, 1 (1995).
25. J. Sýkora, *Adv. Space Res.* **14** (4), 73 (1994).
26. Z. Mouradian, M. J. Martes, I. Soru-Escout, and L. Gesztelyi, *Astron. and Astrophys.* **183**, 129 (1987).
27. N. R. Sheeley, Jr., A. G. Nash, and Y.-M. Wang, *Astrophys. J.* **319**, 481 (1987).
28. Y.-M. Wang, A. G. Nash, and N. R. Sheeley, Jr., *Science* **245**, 712 (1989).
29. Y.-M. Wang and N. R. Sheeley, Jr., *Astrophys. J.* **414**, 916 (1993).
30. Л. Л. Кичатинов, *Астрон. журн.* **81**, 176 (2004).
31. J. Sýkora, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **5**, 7 (1975).
32. J. Sýkora, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **22**, 12 (1971).
33. Р. Н. Ихсанов, В. Г. Иванов, *Тр. конф. "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля"*, ред. В. И. Макаров, В. Н. Обридко (ГАО РАН, 2001), с. 175.
34. А. Г. Тлатов, С. А. Гусева, Ким Гун-дер, *Тр. конф. "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля"*, ред. В. И. Макаров, В. Н. Обридко (ГАО РАН, 2001), с. 385.
35. M. Storini and J. Sýkora, *Nuovo Cimento* **20C**, 923 (1997).
36. O. G. Badalyan, V. N. Obridko, and J. Sýkora, *Solar Phys.* **199**, 421 (2001).
37. J. Sýkora and J. Rybák, *Adv. Space Res.* **35**, 393 (2004).
38. J. Sýkora, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **22**, 55 (1992).
39. O. B. Badalyan and J. Sýkora, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **35**, 180 (2005).
40. S. A. Mitchell, *Handb. Astrophys.* **4**, 231 (1929).
41. J. Schou, H. M. Antia, S. Basu, *et al.*, *Astrophys. J.* **505**, 390 (1998).
42. E. Antonucci and A. Doderо, *Solar Phys.* **53**, 179 (1977).
43. J. O. Stenflo, *Astron. and Astrophys.* **61**, 797 (1977).

## Cyclic Variations in the Differential Rotation of the Solar Corona

**O. G. Badalyan, V. N. Obridko, and J. Šykora**

The rotation of the solar corona is analyzed using data on the brightness of the FeXIV 530.3 nm coronal green line covering six recent activity cycles. The velocity of the differential rotation of the corona depends on the cycle phase. In decay phases, there are only small differences in the rotation, which is similar to that of a rigid body. The differences are more significant (though less pronounced than in the photosphere) during rise phases, just before maxima, and sometimes at maxima. The net velocity of the coronal rotation is a superposition of two, i.e., fast and slow, modes. The synodic period of the fast mode is approximately 27 days at the equator and varies slightly with time. This mode displays weak differences in rotation and is most pronounced in the middle of decay phases. The slow mode is observed only at high latitudes during the rise phases of activity, and displays a mean period of 31 days. The relative contribution of each mode to the total rotational velocity is determined as a function of time and heliographic latitude. These results indicate that the structure of the velocity field in the convective zone must also vary with time. This conclusion can be verified by helioseismology measurements in the near future.