

## СОЛНЕЧНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ЯРКОСТЬ ЗЕЛеноЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ

© 2004 г. О. Г. Бадалян, В. Н. Обридко

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк, Россия*

Поступила в редакцию 25.12.2003 г.; принята в печать 09.01.2004 г.

Проводится сопоставление синоптических карт яркости зеленой линии  $\lambda 530.5$  нм FeXIV и карт рассчитанной напряженности магнитного поля в короне за период 1977–2001 гг. Для количественного сопоставления вычислен коэффициент корреляции  $r$  между исследуемыми параметрами в одних и тех же точках синоптических карт. Показано, что обсуждаемый коэффициент корреляции для зоны пятнообразования  $\pm 30^\circ$  и зоны выше  $30^\circ$  имеет циклический ход. При этом значение  $r$  в этих двух зонах изменяется в противофазе. В низкоширотной зоне коэффициент корреляции всегда положителен, достигает наибольших значений в минимуме активности, а к максимуму сильно уменьшается. В зоне выше  $30^\circ$  коэффициент  $r$  достигает наибольших положительных значений в максимуме цикла активности, затем он постепенно уменьшается, переходит через ноль вблизи начала фазы минимума и в фазе минимума цикла активности становится отрицательным. Фурье-анализ временного хода коэффициента  $r$  показывает волну с периодом, близким к 1.3 года (известным также по данным гелиосейсмологии в области генерации магнитных полей в тахоклине), а также отчетливую волну с периодом около 5 лет. Природа широтной зависимости коэффициента корреляции  $r$ , по-видимому, связана с изменением вклада локальных, крупномасштабных и глобальных полей. Проведенный анализ позволяет подойти к решению сложной проблемы о механизмах нагрева короны.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время является совершенно очевидным, что природа активности на Солнце и звездах поздних спектральных классов типа Солнца, несомненно, связана с магнитными полями. Без магнитного поля звезды представляли бы собой “безжизненные” шары без выраженных проявлений активности. Однако, связь магнитных полей с разными активными процессами не одинакова, и механизмы этой связи пока еще до конца не изучены. Для выяснения природы влияния магнитного поля на физические процессы в короне необходимы работы по количественной оценке связи различных индексов с магнитным полем. Таких работ, к тому же опирающихся на достаточно большой статистический материал, пока еще не слишком много.

Очень важным индексом солнечной активности является интенсивность так называемой зеленой корональной линии. Это запрещенная линия  $\lambda 530.5$  нм FeXIV, возникающая в слоях нижней короны при температуре  $\sim 2$  МК. Ее свечение характеризует уровень активности в короне Солнца, что, в свою очередь, связано с активностью нижележащих слоев солнечной атмосферы. Области наиболее яркого свечения зеленой линии являются плотные петли и скопления петель, поскольку интенсивность этой линии пропорциональна квадрату плотности. Существование таких областей связано с корональными магнитными полями и с общей

проблемой нагрева короны. Области пониженного свечения зеленой линии генетически связаны с корональными дырами [1, 2]. Таким образом, изучение пространственно-временного распределения яркости зеленой короны и сопоставление его с характеристиками магнитного поля является весьма перспективным инструментом анализа вариаций солнечной активности и механизмов нагрева короны.

Большим достоинством индекса, характеризующего свечение зеленой линии, является то, что он определяется практически одновременно для всех гелиографических широт, тем самым позволяя изучать солнечную активность по однотипному материалу на всей поверхности Солнца. Тем самым этот индекс обеспечивает однородное и непрерывное цифровое поле для всех точек диска на большом временном интервале. Этим он выгодно отличается, например, от чисел Вольфа, характеризующих активность в низких широтах, или от полярных факелов, возникающих в высоких широтах.

К настоящему времени ряд систематических наблюдений зеленой корональной линии охватывает почти 6 циклов солнечной активности. Эти наблюдения проводились небольшим числом корональных станций, каждая из которых работала в своей собственной фотометрической шкале. Поэтому сведение всех наблюдений в единую систему представляет довольно сложную проблему.

Здесь мы используем базу данных, составленную Сикорой [3–5].

Поскольку свечение зеленой линии самым тесным образом связано с магнитными полями различных масштабов, изучение временной эволюции пространственного распределения яркости зеленой короны дает возможность проследить эволюцию корональных магнитных полей. Здесь особенно важным является то, что яркость зеленой корональной линии измеряется непосредственно, в отличие от характеристик магнитного поля в короне, которые рассчитываются в рамках некоторых предположений на основе фотосферных наблюдений. Существенно также подчеркнуть, что детальные и систематические наблюдения фотосферных магнитных полей охватывают значительно меньший временной интервал, чем наблюдения зеленой линии. Следовательно, выводы, полученные при совместном изучении магнитных полей и свечения зеленой корональной линии, могут быть экстраполированы в прошлое, когда магнитные поля измерялись лишь эпизодически и в разных шкалах.

К сожалению, не так много имеется работ, в которых проводится непосредственное сопоставление характеристик свечения корональных линий с магнитным полем. Можно отметить работу [6], в которой излучение короны сопоставляется с магнитным полем по данным за 1984–1992 гг. В этой работе авторы по отношению интенсивностей красной ( $\lambda$  637.4 нм FeX) и зеленой ( $\lambda$  530.3 нм FeXIV) линий вычисляли температуру короны, которую затем сопоставляли со свечением белой короны и продольной компонентой магнитного поля на фотосфере по измерениям на обсерватории Китт-Пик. Полученное авторами [6] распределение температуры мало похоже на распределение магнитного поля. Более интересным представляется пространственно-временное распределение яркости зеленой и красной короны. Можно видеть, что распределение излучения зеленой короны довольно близко к распределению магнитного поля. Так, на фазе роста цикла в каждом полушарии заметны среднеширотные полосы, в которых напряженность магнитного поля и яркости корональных линий увеличиваются. С приближением к максимуму цикла полосы расширяются в сторону как высоких, так и низких широт, а затем, по мере приближения к минимуму цикла, образуется одна экваториальная полоса.

Другой способ сравнения излучения в зеленой линии короны с характеристиками магнитного поля был применен в работе [7]. Авторы использовали данные наблюдений коронографа LASCO C1 на SOHO для 5 различных дней. По наблюдениями Солнечной обсерватории Вилкокса в Стэнфорде

была вычислена структура силовых линий магнитного поля в потенциальном приближении. Оказалось, что структура магнитного поля и излучения зеленой линии хорошо согласуются друг с другом. Было показано, что плотность в основании трубок магнитного поля связана с величиной магнитного поля следующим соотношением:  $n_{foot} \propto \langle B_{foot} \rangle^{0.9}$ .

Сейчас уже накоплен достаточно обширный материал по наблюдениям мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения на диске Солнца. Изображения короны, полученные с помощью космических аппаратов Yohkoh, SOHO, TRACE, КОРОНАС охватывают период с 1991 г. (примерно один цикл активности). Такие наблюдения позволяют сопоставлять снимки короны в различных рентгеновских линиях с ежедневными картами наблюдаемого магнитного поля. Существуют, однако, определенные трудности такого сопоставления за длительный период времени, связанный с тем, что аппаратура на этих космических аппаратах не идентична, что приводит к сильной неоднородности наблюдательного материала.

Излучение, регистрируемое на космических аппаратах в линии  $\lambda 195 \text{ \AA}$  FeXII, возникает практически в тех же областях, в которых светится зеленая корональная линия. На снимках в этой линии видно, что излучение короны усилено над активными областями и ослаблено над корональными дырами. Сопоставление синоптических карт зеленой линии и коротковолновых изображений короны [8] показывает их общее хорошее согласие. Имеющиеся расхождения, по-видимому, связаны с относительно кратковременными явлениями, которые не отражаются на синоптических картах.

Нами в [8] проанализировано пространственно-временное распределение яркости зеленой корональной линии за период 1943–2001 гг. На большом временном интервале было подтверждено, что яркость зеленой короны в большой степени определяется напряженностью коронального магнитного поля. Было продемонстрировано хорошее соответствие пространственной структуры на нескольких синоптических картах яркости зеленой короны и картах напряженности магнитного поля в короне на высотах свечения зеленой линии на фазе спада 21 цикла активности. Был сделан вывод об общей положительной коррелированности между яркостью зеленой линии и напряженностью магнитного поля в короне на низких широтах. Кроме того, в [8] был опробован метод количественной оценки корреляции синоптических карт яркости зеленой линии и коронального магнитного поля.

В настоящей работе проводится детальное сопоставление синоптических карт яркости зеленой линии и магнитного поля в короне за период

1977–2001 гг. (21, 22 и текущий 23 циклы активности). Для количественного сопоставления был вычислен коэффициент корреляции между яркостью зеленой линии и напряженностью магнитного поля в соответствующих точках синоптических карт зеленой короны и магнитных полей. Вычисления проводились как для всего широтного диапазона  $\pm 70^\circ$ , для которого рассчитывается магнитное поле, так и для отдельных широтных зон. Этот анализ позволяет сделать определенные выводы о степени влияния магнитных полей различных масштабов на свечение зеленой короны на различных фазах цикла солнечной активности. Такой подход позволяет вплотную подойти к решению очень сложной проблемы о механизмах нагрева короны.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМОГО МАТЕРИАЛА

### 2.1. База данных о яркости зеленой корональной линии

Патрульные наблюдения зеленой корональной линии  $\lambda 530.5$  нм FeXIV были начаты в 1939 г. на станциях Pic-du-Midi и Arosa. Первые несколько лет это были пробные наблюдения, и поэтому реально наблюдательные данные имеются для небольшого количества дней в соответствующих годах. С течением времени систематические наблюдения стали проводиться уже небольшой сетью корональных станций, что привело к увеличению наблюдательных дней за год. Но при этом каждая из этих станций вела наблюдения различными методами, в неизбежно различающихся фотометрических шкалах и на различной высоте над лимбом. Таким образом, возникла нетривиальная задача сведения наблюдений различных станций в единую систему. Вопросы, связанные с этой процедурой, подробно рассматривались в [3–5].

В настоящее время 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 [1, 9, 10]. В нашей работе используется база данных, составленная Ю. Сикорой (Словацкая республика). Подробное описание базы данных содержится в [11]. Наблюдения представлены в виде матрицы, в которой на каждый день приведены значения интенсивности зеленой линии вдоль солнечного лимба с шагом  $5^\circ$  по позиционному углу. Таким образом, синоптическая карта, которая может быть построена непосредственно по данным наблюдений, имеет разрешение  $\sim 13^\circ$  по долготе и  $5^\circ$  по широте. Интенсивность зеленой линии выражена в абсолютных корональных единицах (а.к.е.; абсолютная корональная единица — это одна миллионная доля излучения центра солнечного диска в

1 Å соседнего с линией континуума), и относится к высоте  $60''$  над лимбом.

База данных позволяет рассматривать циклические изменения яркости зеленой линии как для всего диапазона широт от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$ , так и в различных широтных зонах, с различным временным разрешением. Она дает возможность изучать северо-южную асимметрию в зависимости от гелиографической широты, отдельно исследовать наиболее яркие (активные) области в короне, а также области ослабленного свечения зеленой линии, по-видимому, связанные с корональными дырами [12]. Возможно также изучение активных долгот и скорости вращения короны на различных широтах [13].

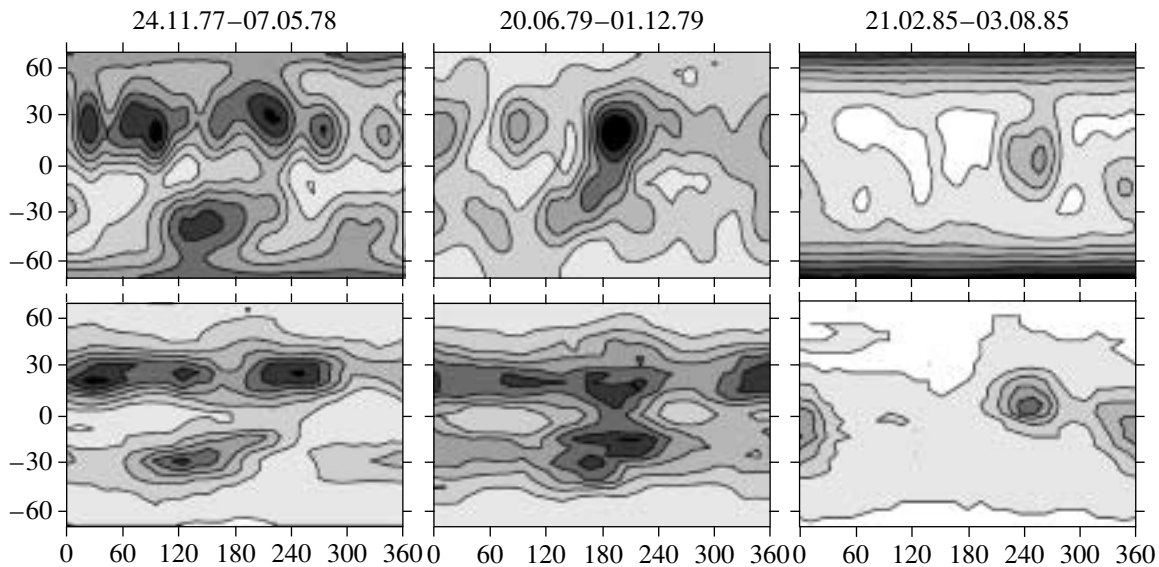
### 2.2. Расчеты коронального магнитного поля

Расчеты напряженности магнитного поля в короне были проведены в потенциальном приближении на основе наблюдений на уровне фотосферы, выполненных в Солнечной обсерватории Вилкоккса (данные получены через Интернет). Исходными данными являются наблюдения продольной компоненты магнитного поля на фотосфере, сведенные далее в синоптические карты для каждого кэррингтоновского оборота.

Магнитное поле в короне рассчитано нами с использованием широко известного метода, описанного ранее в [14, 15]. Для данной работы мы использовали программу, которая позволяет вычислять все компоненты магнитного поля от поверхности фотосферы до поверхности источника [16, 17]. Синоптические карты этих компонент могут быть рассчитаны для любого выбранного момента времени, который принимается за положение центрального меридиана. Нами для последующего анализа была рассчитана полная напряженность магнитного поля  $B$  (равная корню квадратному из суммы квадратов радиальной  $B_r$  и тангенциальной  $B_t$  компонент) на высоте  $1.1R_\odot$ , примерно соответствующей данным по зеленой корональной линии. В расчетах использовалось суммирование по 10 гармоникам и вводилась полярная коррекция, учитывающая недостаточную надежность измерений магнитного поля вблизи полюсов [18]. Как исходные, так и рассчитанные данные о магнитном поле ограничены широтным диапазоном  $\pm 70^\circ$ .

## 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ СИНОПТИЧЕСКИХ КАРТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕЛЕННОЙ ЛИНИИ И КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В [8] были рассмотрены циклические изменения распределения яркости зеленой корональной линии по синоптическим картам со скользящим



**Рис. 1.** Сопоставление синоптических карт для напряженности магнитного поля (верхний ряд) и для яркости зеленой линии (нижний ряд). Напряженность магнитного поля выражена в микротеслах, яркость зеленой линии — в абсолютных корональных единицах. На каждой карте общий диапазон значений соответствующих величин разделен на 8 градаций, самым большим значениям соответствует черный цвет, самым малым — белый. Шаг между изолиниями карт верхнего ряда составляет последовательно (слева направо) 30, 60 и 35 мкТ, для карт нижнего ряда — 18.75, 13.75 и 5 а.к.е. По оси абсцисс указана долгота, по оси ординат — широта; время возрастает справа налево.

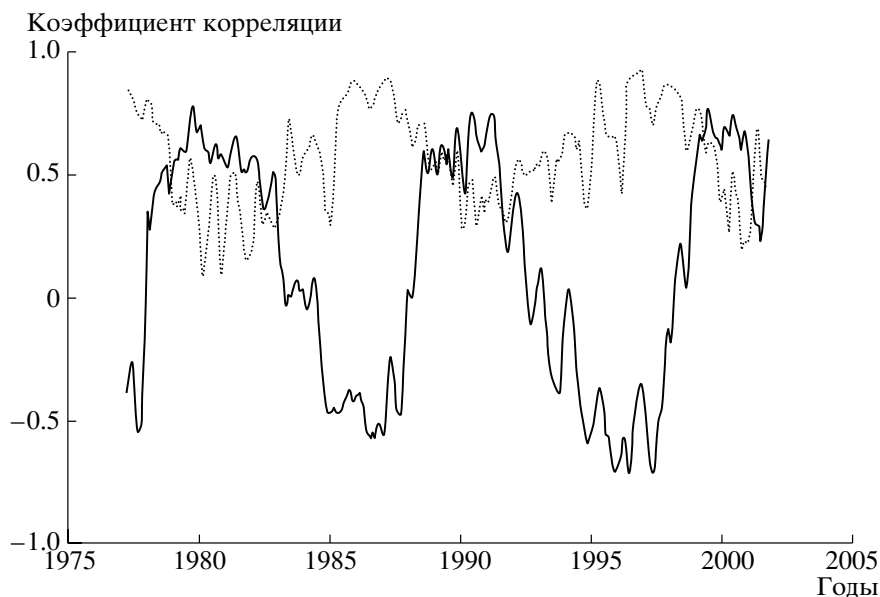
усреднением по 6 кэррингтоновским оборотам с шагом в один оборот за период 1943–2001 гг. Такие синоптические карты позволяют проследить постепенные изменения пространственного распределения яркости зеленой корональной линии в цикле солнечной активности. Использование сглаживания по 6 кэррингтоновским оборотам позволяет более уверенно отождествлять долгоживущие и достаточно крупномасштабные образования.

Для напряженности магнитного поля также были построены аналогичные синоптические карты, т.е. рассчитанные карты на каждый кэррингтоновский оборот затем усреднялись по 6 оборотам с шагом в один оборот. Все расчеты были выполнены для расстояния  $1.1R_{\odot}$ .

На рис. 1 представлены три пары синоптических карт для напряженности магнитного поля (верхний ряд) и для яркости зеленой линии (нижний ряд). Напряженность магнитного поля выражена в микротеслах, яркость зеленой линии — в абсолютных корональных единицах. На каждой карте выбранный общий диапазон значений соответствующих величин разделен на 8 градаций, самым большим значениям соответствует черный цвет, самым малым — белый. При этом, с целью более наглядного представления циклических изменений исследуемых параметров (например, уменьшения яркости зеленой линии в минимум активности), не всегда на картах присутствуют все 8 градаций. Так, например, на первой и второй картах нижнего ряда (зеленая линия) отсутствует белый цвет, а на третьей карте из того же ряда отсутствуют две

наибольшие градации черного цвета. Изолинии, ограничивающие самый темный цвет на картах верхнего ряда последовательно (слева направо) равны 240, 480 и 280 мкТ; на картах нижнего ряда — 150, 170 и 40 а.к.е. Таким образом, шаг между изолиниями карт верхнего ряда составляет соответственно 30, 60 и 35 мкТ, для карт нижнего ряда — 18.75, 13.75 и 5 а.к.е. Абсцисса и ордината на каждой карте дают гелиографические долготу и широту соответственно; время, таким образом, увеличивается справа налево. Заголовок над каждой парой карт указывает соответствующий временной интервал усреднения.

Карты на рис. 1 даны для различных фаз цикла активности. Видна общая высокая согласованность между яркостью зеленой линии и напряженностью магнитного поля. Хорошо совпадают области как больших, так и малых значений соответствующих параметров, особенно в зоне пятнообразования в низких широтах. Следующая пара карт относится к временному интервалу вблизи максимума цикла. Можно отметить уменьшение согласия карт в зоне пятнообразования и увеличение его в более высоких широтах. Третья пара карт построена для периода вблизи минимума цикла активности. Яркость зеленой корональной линии значительно уменьшилась, а магнитное поле стало значительно более однородным (менее структурным). Но при этом относительно редкие области повышенной напряженности магнитного поля в низкоширотной зоне (иногда это всего одна



**Рис. 2.** Временной ход коэффициента корреляции  $r$  между напряженностью магнитного поля и яркостью зеленой линии в совокупности пространственно совпадающих точек на картах в зоне пятнообразования  $\pm 30^\circ$  (пунктирная линия) и в более высокоширотной зоне выше  $30^\circ$  (сплошная линия).

такая область) как правило совпадают с областями усиленного свечения зеленой линии. В высокоширотной же области можно отметить отрицательную корреляцию между яркостью зеленой линии и напряженностью магнитного поля. Видно, что напряженность поля возрастает к полюсу и существенно превышает значение  $B$  в экваториальной зоне, а яркость зеленой линии, наоборот, к полюсу уменьшается. Заметим, что в [8] представлены три пары карт для нисходящей фазы цикла 21, которые вместе с рис. 1 настоящей статьи позволяют получить представление о постепенном изменении соответствия рассматриваемых параметров в низких и высоких широтах в течение цикла активности.

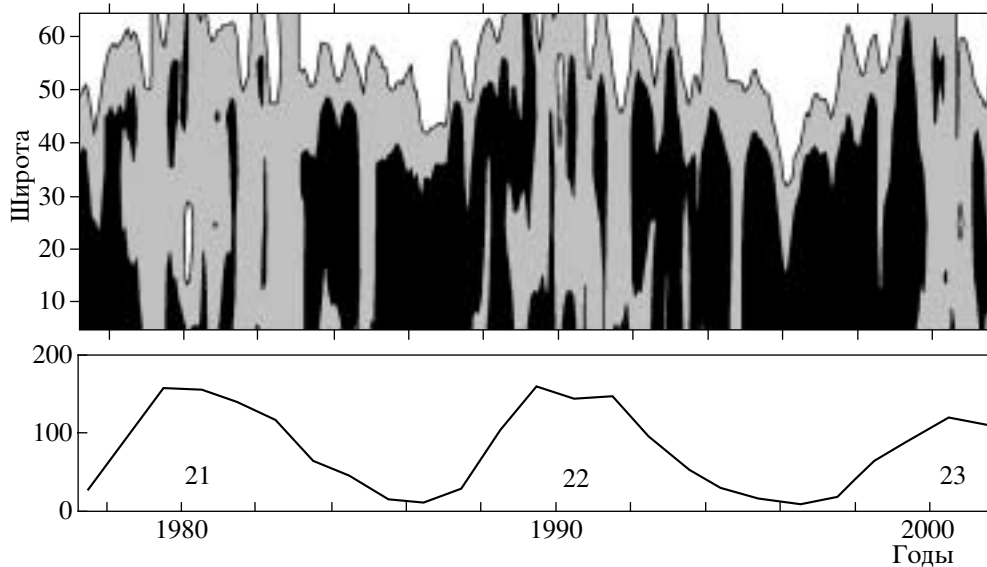
Для количественной оценки сходства или различия синоптических карт в [8] было предложено вычисление коэффициента кросс-корреляции в одних и тех же точках карт зеленой короны и магнитных полей. С этой целью значения напряженности магнитного поля рассчитывались для тех точек на синоптической карте, для которых имеются реальные данные по зеленой линии — это 27 точек по долготе (один оборот) и 29 точек по широте (т.е. через  $5^\circ$  в диапазоне  $\pm 70^\circ$ , для которого рассчитывалось магнитное поле). Такую кросс-корреляцию можно провести как для всего широтного диапазона  $\pm 70^\circ$ , так и в отдельных более узких широтных зонах.

Уже первые оценки по такой методике, выполненные в [8], показали, что интенсивность излучения зеленой короны тесно связана с величиной напряженности магнитного поля. Но эта связь сильно зависит от широтной зоны и от фазы цикла. Коэффициент корреляции и даже его знак

различны в полярной зоне и в низкоширотной зоне пятнообразования. Был сделан вывод, что для высокоширотной (выше  $30^\circ$ ) короны коэффициент корреляции увеличивается вблизи максимума, когда поле в высоких широтах относительно мало. Затем он постепенно уменьшается к минимуму и меняет знак. Здесь это можно видеть на рис. 1.

В данной работе такое сопоставление было выполнено гораздо более детально для всех имеющихся в нашем распоряжении синоптических карт яркости зеленой корональной линии и магнитного поля. Это позволило проследить циклические изменения связи между яркостью зеленой линии и напряженностью магнитного поля в различных широтных зонах.

На рис. 2 показан временной ход обсуждаемого коэффициента корреляции  $r$  для двух широтных зон — зоны пятнообразования  $\pm 30^\circ$  и высокоширотной зоны. Здесь и ниже под высокоширотной зоной мы понимаем зоны в северном и южном полушариях, широта которых превышает  $30^\circ$  по абсолютной величине. Прежде всего, видно, что коэффициент  $r$  в каждой из этих зон имеет циклический ход. Далее следует отметить, что значение  $r$  в рассматриваемых зонах изменяется как бы в противофазе. В низкоширотной зоне коэффициент корреляции всегда положителен, достигает наибольших значений в минимуме активности, а к максимуму сильно уменьшается. В высокоширотной зоне выше  $30^\circ$  все происходит иначе. В максимуме цикла активности коэффициент  $r$  достигает своих максимальных положительных значений. Затем  $r$  постепенно уменьшается, переходит через ноль, а затем его значения становятся отрицательными



**Рис. 3.** Общая диаграмма широта–время для коэффициента корреляции  $r$ . Черным цветом показаны области с коэффициентом корреляции  $r > 0.5$ , серым цветом — области с  $-0.5 < r < 0.5$ , белым цветом — области с  $r < -0.5$ . На нижней панели приведены среднегодовые числа Вольфа (ось ординат), цифры указывают номера соответствующих циклов активности.

и к моменту минимума активности отрицательные значения  $r$  по абсолютной величине становятся примерно равными его положительным значениям в максимуме активности. В то же время, абсолютные значения  $r$  в высокоширотной зоне никогда не достигают таких больших значений, каких он достигает в зоне пятнообразования в периоды минимума цикла активности Солнца. Коэффициенты кросс-корреляции для карт, представленных на рис. 1, равны в зоне  $\pm 30^\circ$  последовательно (слева направо) 0.812, 0.574, 0.800; в зоне выше  $30^\circ$  — 0.274, 0.755,  $-0.458$ .

Заметим, что смена знака коэффициента  $r$  в высоких широтах с точностью до нескольких месяцев происходит в опорных точках цикла  $t_{mA}$  (начало фазы роста) и  $t_{Dm}$  (конец фазы спада и начало фазы минимума), и таким образом, отрицательные значения этого коэффициента довольно точно окаймляют фазу минимума активности. (Здесь мы использовали определения календарных дат опорных точек, выполненное в [19]).

На рис. 3 показано пространственно-временное изменение коэффициента корреляции  $r$  на всем широтном интервале  $\pm 70^\circ$ . Все особенности изменения величины  $r$  во времени и с широтой отчетливо прослеживаются на этой диаграмме. Можно отметить, что области относительно высокого положительного значения  $r \geq 0.5$  в периоды уменьшения активности Солнца охватывают довольно большой широтный интервал, чередуясь в то же время с небольшими вкраплениями уменьшения этого коэффициента, также в большом широтном интервале. Такими же “волнами” происходит увеличение полярной области отрицательных значе-

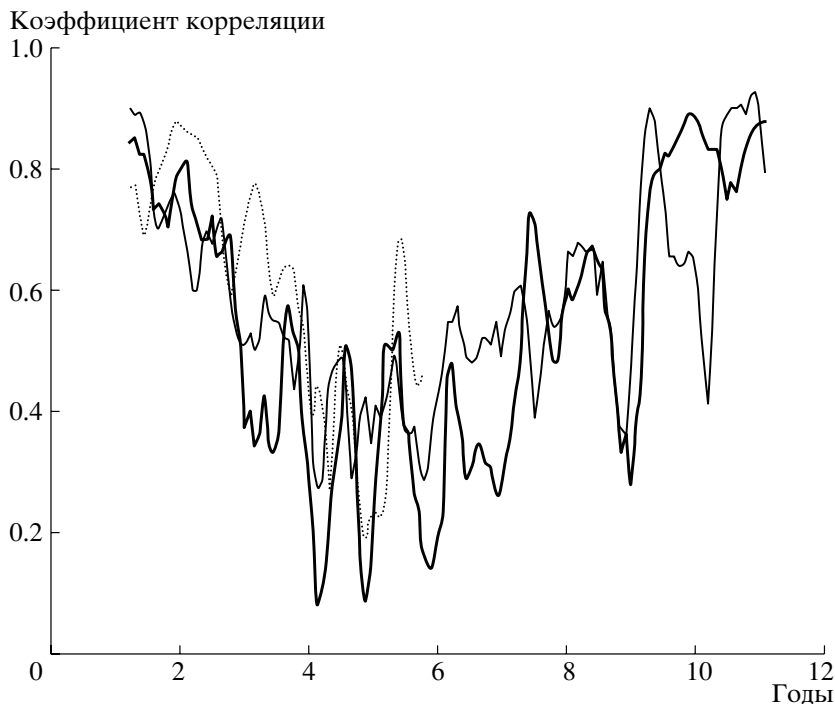
ний  $r$  в периоды, близкие к минимуму активности Солнца. Интересно отметить, что существует широтная зона  $30^\circ - 40^\circ$ , в которой коэффициент  $r$  близок к значению 0.5 и его циклические изменения практически отсутствуют. Из этого следует, что зоны различного временного поведения коэффициента корреляции разделяются примерно на широте пояса спокойных волокон.

Природа широтной зависимости коэффициента корреляции  $r$  вероятнее всего связана с изменением вклада локальных, крупномасштабных и глобальных полей, каждое из которых имеет свою специфическую зависимость от фазы цикла.

#### 4. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ ОТ ФАЗЫ ЦИКЛА

Временной интервал, для которого можно было провести кросс-корреляцию синоптических карт яркости зеленой линии и коронального магнитного поля (иначе говоря, интервал, для которого возможны расчеты магнитного поля по данным Стенфордской обсерватории), охватывает 21-ый, 22-ой и часть 23-го циклов активности. Представляет интерес проследить изменение коэффициента  $r$  от цикла к циклу. Это можно сделать путем наложения временной зависимости коэффициента корреляции в разных циклах на один график.

Результат такого наложения для зоны  $\pm 30^\circ$  представлен на рис. 4. Временной сдвиг подбирался таким образом, чтобы совпадение (попарная корреляция) всех трех кривых было наилучшим. По оси абсцисс указаны годы в некоторой условной шкале, что означает следующее. Для первого из



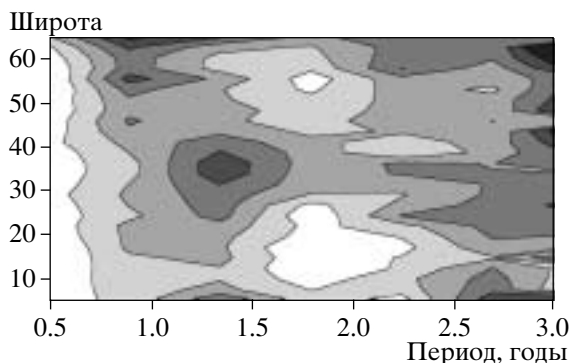
**Рис. 4.** Временная зависимость коэффициента корреляции  $r$  в циклах 21 (сплошная жирная линия), 22 (тонкая сплошная линия), 23 (пунктирная линия) для зоны  $\pm 30^\circ$ . Сдвиг в 133 кэррингтоновских оборота подобран таким образом, чтобы попарная корреляция всех трех кривых была наилучшей. По оси абсцисс указаны годы в некоторой условной шкале: для цикла 21 “ноль” соответствует 1976 году, а “12” — 1988 году; для циклов 22 и 23 шкала смещена на 133 и 266 оборотов, соответственно. На всех кривых отчетливо выделяется квазигодовая волна, накладывающаяся на циклическое изменение коэффициента  $r$ .

рассматриваемых циклов (цикл 21, сплошная жирная линия) “ноль” на шкале абсцисс соответствует 1976 году, а “12” — 1988 году. Для следующих двух циклов 22 и 23 шкала смещена на один и два выбранных временных сдвига соответственно.

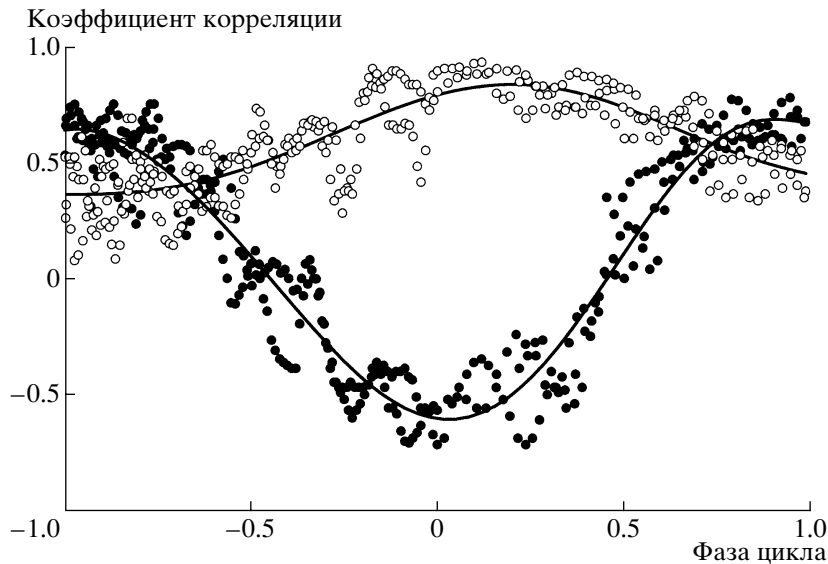
Отметим следующее. Как на рис. 2, так и на общей карте на рис. 3 можно довольно отчетливо видеть некоторую квазипериодическую компоненту, которая накладывается на общий временной ход коэффициента  $r$ . Фурье-анализ, о котором более

подробно будет сказано ниже, показал, что эта компонента имеет период, близкий к 1.5 года. Влияние этой волны оказывается довольно значительным при подборе наилучшего временного сдвига на рис. 4. Окончательно этот сдвиг был выбран в 133 кэррингтоновских оборота, т.е. несколько меньше 10 лет. Как видно из рис. 4, можно отметить как общее хорошее совпадение циклического хода коэффициента  $r$ , так и совпадение многих деталей, связанных с высокочастотной компонентой. Корреляция кривых на рис. 4 для 21 и 22, 21 и 23, 22 и 23 циклов в широтной зоне  $\pm 30^\circ$  при выбранном временном сдвиге составляет соответственно 0.755, 0.768 и 0.728.

С целью более объективного выявления квазипериодических изменений коэффициента корреляции  $r$  был проведен фурье-анализ. Расчеты были проведены для отдельных 10-градусных широтных зон, а также для всего широтного интервала в целом. Также был выполнен фурье-анализ для самих величин яркости зеленой короны и напряженности магнитного поля, усредненных за 6 оборотов, в двух широтных интервалах  $\pm 30^\circ$  и выше  $30^\circ$ . Сумма квадратов всех амплитуд в фурье-спектре равна среднеквадратическому отклонению коэффициента корреляции  $r$  от его среднего значения на изучаемом интервале времени. Фурье-анализ подтвердил наличие высокочастотной (1–1.5 года) волны в



**Рис. 5.** Фурье-периодограмма коэффициента корреляции  $r$  в диапазоне периодов от 0.5 до 3 лет. Шаг между изолиниями амплитуды колебаний  $r$  составляет 0.0075. Хорошо заметны колебания в диапазоне 1–1.5 года, квазидвухлетние колебания выражены очень слабо.



**Рис. 6.** Изменение коэффициента корреляции  $r$  с фазой цикла для зоны пятнообразования (верхняя кривая, светлые кружки) и для зоны выше  $30^\circ$  (нижняя кривая, темные кружки).

коэффициенте  $r$  на всех широтах, а также довольно хорошо выделенную 5-летнюю волну. Колебания в областях 1–1.5 года и 5 лет отчетливо видны как в коэффициенте корреляции  $r$ , так и в самих индексах.

На рис. 5 дана фурье-периодограмма коэффициента корреляции  $r$  для всех широт в диапазоне периодов от 0.5 до 3 лет. Диапазон изменений амплитуды колебаний коэффициента  $r$  для этой диаграммы выбран в пределах от 0.015 до 0.06 и разделен на 6 градаций; таким образом, шаг между изолиниями на рис. 5 составляет 0.0075.

На рис. 5 хорошо выделяются колебания в диапазоне 1–1.5 года, причем на высоких широтах преобладают колебания с периодом около одного года, а на средних и низких широтах — с периодом 1.3 года. Здесь можно обратить внимание на то, что именно такой период 1.3 года выделен методами гелиосейсмологии в области генерации магнитных полей в тахоклине [20]. Заметим также, что и на уровне тахоклины колебания с периодом 1.3 года выражены на средних и низких широтах, а на высоких широтах колебания, по-видимому, ослаблены или имеют меньший период. Что касается широко известных квазидвухлетних колебаний, то они очень слабо выражены на рис. 5. Следует еще раз напомнить, что мы здесь анализируем коэффициент корреляции между яркостью зеленой корональной линии и напряженностью магнитного поля и, естественно, не все колебания, которые заметны в индексах активности, будут проявляться и в их корреляции. В данном случае квазидвухлетние колебания в напряженности магнитного поля и в яркости зеленой линии выражены вполне заметно. Еще более сильно квазидвухлетние колебания

проявляются в асимметрии различных индексов солнечной активности [21, 22].

В отличие от периодов 1–1.5 года, колебания  $r$  в области 5 лет постепенно усиливаются к высоким широтам (на рис. 5 область низких частот не показана). В средних широтах колебания с этим периодом в спектре образуют четко выраженный изолированный пик. В более высоких широтах с низкочастотной стороны этот пик постепенно переходит в общее увеличение амплитуды колебаний вплоть до 11-летнего периода. На низких широтах колебания с периодом 5 лет выражены относительно слабо, и наблюдается просто постепенный рост амплитуды колебаний в низкочастотную область.

В фурье-спектре коэффициента корреляции низкочастотная часть значительно ослаблена на широтах  $30^\circ$ – $40^\circ$ . Это согласуется с тем, что, как было сказано выше при обсуждении рис. 3, в области широт  $30^\circ$ – $40^\circ$  одиннадцатилетний цикл в коэффициенте корреляции выражен слабо.

На рис. 6 показана зависимость обсуждаемого коэффициента корреляции  $r$  между напряженностью магнитного поля в короне и яркостью зеленой корональной линии от фазы цикла. Фаза цикла здесь рассчитана согласно [23] как  $\Phi = (T - m)/(|M - m|)$ , где  $T$  — текущий момент времени,  $M$  и  $m$  — моменты ближайших максимума и минимума 11-летнего цикла, соответственно. Таким образом, по этому определению в момент минимума цикла фаза равна нулю, положительна на возрастающей ветви цикла и отрицательна на убывающей ветви.

Рис. 6 наиболее четко иллюстрирует общее изменение коэффициента корреляции  $r$  с фазой цикла для зоны пятнообразования (верхняя кривая,



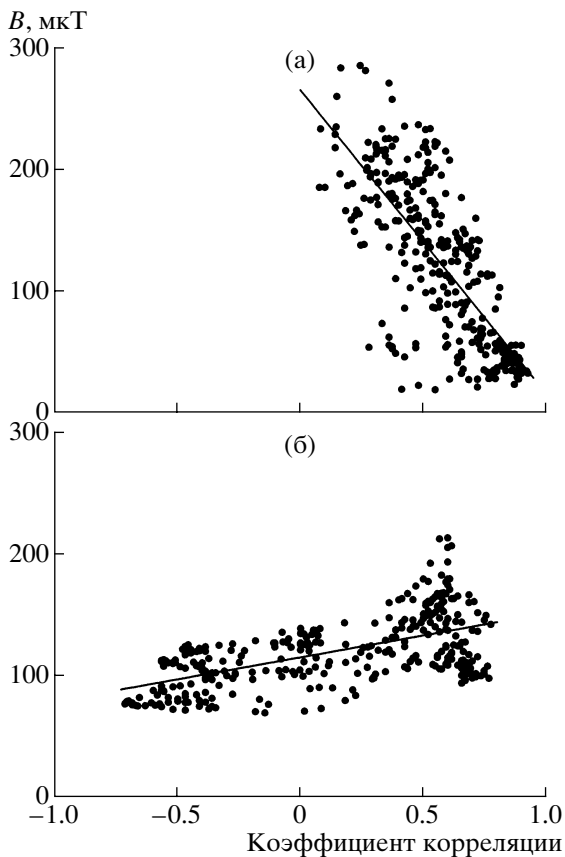


Рис. 7. Связь между коэффициентом  $r$  и напряженностью магнитного поля в зоне пятнообразования (верхняя панель) и в зоне выше  $30^\circ$  (нижняя панель).

светлые кружки) и для зоны выше  $30^\circ$  (нижняя кривая, темные кружки). Все рассмотренные выше особенности во временном ходе  $r$  в двух рассматриваемых широтных зонах выразительно проявляются на этом рисунке. Можно видеть, что в зоне пятнообразования средний коэффициент корреляции изменяется от  $\approx 0.35$  в максимуме активности до  $\approx 0.85$  в минимуме, а в высокоширотной зоне от  $\approx 0.6$  до  $\approx -0.6$ , соответственно. Заметно также влияние высокочастотной волны, приводящее к соответствующим отклонениям реального хода коэффициента  $r$  от сплошных линий, аппроксимирующих циклические изменения  $r$ .

На рис. 7 представлена связь между коэффициентом  $r$  и самой величиной напряженности магнитного поля на высоте  $1.1R_\odot$  для двух рассматриваемых широтных зон. Верхняя панель относится к зоне  $\pm 30^\circ$ , нижняя — к зоне  $> |30^\circ|$ . Здесь можно отметить следующие особенности. Прежде всего, это убывание коэффициента корреляции  $r$  с возрастанием напряженности магнитного поля в зоне пятнообразования и, наоборот, возрастание его с ростом  $B$  в зоне выше  $30^\circ$ . При этом магнитное поле в течение цикла изменяется в зоне пятнообразования значительно, примерно в 10–15 раз, прибли-

жаясь в минимуме к значениям  $B \sim 20$  мкТ. Напомним, что это — поле, усредненное за 6 кэррингтоновских оборотов для рассматриваемой широтной зоны. В более высоких широтах (нижний график) среднее магнитное поле в течение цикла изменяется в существенно меньших пределах — всего в 1.5–2 раза, достигая значений 70–100 мкТ в максимуме активности (отрицательные значения  $r$ ) и значения не более 200 мкТ в минимуме активности.

Совместное рассмотрение рис. 6 и 7 отчетливо показывает, что в зоне пятнообразования яркость зеленой линии наиболее тесно связана с напряженностью магнитного поля на фазах цикла, близких к минимуму активности. В зоне пятнообразования поле уменьшается, упорядочивается, а отдельные области его усиления приводят к соответствующим усилениям свечения зеленой корональной линии. В высоких же широтах поле к минимуму возрастает, а яркость зеленой линии, напротив, убывает (рис. 1).

В максимуме активности, при высокой напряженности магнитного поля в низких широтах, такая связь отсутствует, что выражается в значительном уменьшении коэффициента  $r$ . Важно при этом подчеркнуть, что общий циклический ход как яркости зеленой линии, так и напряженности магнитного поля в зоне пятнообразования четко соответствует хорошо известной кривой чисел Вольфа. В широтной же зоне выше  $30^\circ$  яркость зеленой линии по-прежнему следует циклической кривой Вольфа, а напряженность находится в противофазе с числами Вольфа.

Таким образом, рис. 6 и, особенно, рис. 7 показывают, что связь яркости зеленой линии с магнитным полем в короне не определяется одной универсальной закономерностью. Поля разных масштабов по-разному влияют на яркость зеленой короны.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено детальное сопоставление синоптических карт яркости зеленой линии  $\lambda 530.5$  нм и напряженности магнитного поля в короне за период 1977–2001 гг. (21-ый, 22-ой и текущий 23-ий циклы активности). Карты яркости зеленой корональной линии строились по фотометрически однородной базе данных [3, 11], со скользящим усреднением по 6 кэррингтоновским оборотам с шагом в один оборот, что позволяет выделять крупномасштабные долгоживущие образования. Напряженность магнитного поля была рассчитана по данным наблюдений продольной компоненты поля на уровне фотосферы на обсерватории Джона Вилкокса в Стэнфорде. Расчеты были выполнены для расстояния  $1.1R_\odot$  в потенциальном приближении для широтной зоны  $\pm 70^\circ$ , и полученные в процессе

расчетов синоптические карты затем также были усреднены по 6 оборотам с шагом в 1 оборот.

Для количественного выражения согласия каждой пары карт зеленой линии и напряженности магнитного поля вычислялся коэффициент корреляции  $r$  между этими параметрами в тех точках синоптических карт, для которых имелись реальные наблюдения яркости зеленой линии. Такой коэффициент корреляции был вычислен как для всего широтного диапазона  $\pm 70^\circ$ , так и для узких  $10^\circ$ -градусных зон, а также отдельно для зоны пятнообразования  $\pm 30^\circ$  и для зоны выше  $30^\circ$ .

Получено, что в низкоширотной зоне и в зоне высоких широт коэффициент корреляции  $r$  имеет циклический ход. Между ними располагается пояс широт  $30^\circ$ – $40^\circ$ , близкий к зоне спокойных волокон, в которой этот циклический ход практически отсутствует. Коэффициенты  $r$  в зоне пятнообразования  $\pm 30^\circ$  и в зоне выше  $30^\circ$  изменяются в противофазе. В низкоширотной зоне коэффициент корреляции всегда положителен, достигает наибольших значений в минимуме активности, а к максимуму сильно уменьшается. В зоне выше  $30^\circ$ , наоборот, в максимуме цикла активности  $r$  достигает своих максимальных положительных значений, затем он постепенно уменьшается и к фазе минимума цикла активности становится отрицательным.

Коэффициент  $r$  с ростом напряженности магнитного поля увеличивается в зоне пятнообразования и убывает в высокоширотной зоне выше  $30^\circ$ . При этом средняя за 6 кэррингтоновских оборотов напряженность магнитного поля изменяется примерно в 10–15 раз в зоне пятнообразования и достигает в минимуме цикла активности значений  $B \sim 20$  мкТ. В зоне широт выше  $30^\circ$  магнитное поле в течение цикла активности изменяется в среднем лишь в 1.5–2 раза, но все время остается в пределах 50–60 мкТ в максимуме активности и не более 200 мкТ в фазе минимума.

Фурье-анализ временного хода коэффициента  $r$  показывает волну с периодом, близким к 1.3 года; на более высоких широтах период этой волны несколько уменьшается. Известно, что данные гелиосейсмологии указывают на существование периода в 1.3 года в области генерации магнитных полей в тахоклине на средних и низких широтах. В фурье-спектре амплитуды колебаний коэффициента  $r$  заметно выделяется также 5-летний период. В низкочастотной области амплитуда колебаний значительно ослаблена в широтном поясе  $30^\circ$ – $40^\circ$ , в более высоких и в более низких широтах 11-летний цикл выражен отчетливо.

Зависимость коэффициента корреляции  $r$  от фазы цикла является прямым указанием на различное влияние полей разного масштаба на яркость короны. В самом деле, легко показать, что при наличии универсальной линейной связи между

магнитным полем и яркостью, коэффициент корреляции вообще не должен зависеть от средней величины магнитного поля и, следовательно, от фазы цикла. При нелинейной связи  $r$  может меняться, но в небольших пределах. В нашем же случае наблюдается не только циклическая вариация, но даже изменение знака  $r$  в высоких широтах. Это свидетельствует о различии механизмов формирования короны в полях малых, средних и больших масштабов. Результаты, полученные в нашей работе, могут быть использованы для количественного тестирования различных моделей нагрева короны.

Наиболее простая картина наблюдается в минимуме цикла. В это время на полюсах Солнца крупномасштабное магнитное поле квазидипольного типа достигает максимума. В короне в это время наблюдаются полярные корональные дыры. Яркость короны и величина магнитного поля на полюсах меняются в противофазе. В экваториальной зоне крупномасштабное поле практически исчезает, остаются только изолированные комплексы локальной активности. В это время связь яркости короны и магнитных полей в экваториальной зоне выражена особенно хорошо, и коэффициент  $r$  достигает максимальной величины.

Ситуация в максимуме активности значительно сложнее. Локальные поля поднимаются до довольно высоких широт, а языки крупномасштабных полей проникают (сопровождаясь корональными дырами) в область экватора. Сильно выражены поля промежуточных характерных размеров (фоновые и флоккульные поля, а также петли над крупномасштабными нейтральными линиями). Кроме того, влияющие на физические процессы в короне, но не учитываемые на синоптических картах магнитного поля эфемерные активные области, существующие 1–3 дня, и нановспышки наиболее эффективно проявляются именно в фазе максимума. Это приводит к значительному уменьшению коэффициента корреляции  $r$  в экваториальной зоне в период максимума цикла.

Таким образом, обнаруживается, что связь яркости зеленой короны с магнитным полем, а, следовательно, и механизмы нагрева короны, по-видимому, различны для полей разных масштабов. В полях относительно небольших масштабов (локальные поля) в низкоширотной области нагрев короны определяется невысокими трубками и нестационарными процессами в них и в их окрестности. Поскольку магнитное поле в максимуме цикла состоит из сложной смеси арок и петель разной высоты и конфигурация является довольно сложной, яркость зеленой короны хотя и увеличивается с ростом напряженности поля, однако коэффициенты корреляции  $r$  не могут быть высокими. Такая смесь полей разных масштабов существует также и в более высоких широтах. С приближением

к минимуму структура поля и в высоких, и в низких широтах упорядочивается, возникают отдельные комплексы активности в зоне пятнообразования и протяженные области крупномасштабного поля в высоких широтах. Коэффициент корреляции  $r$  при этом всюду возрастает, но связь яркости зеленой линии с напряженностью магнитного поля в этих широтных зонах противоположна по знаку.

Такая простая схема описывает общий циклический характер связи излучения зеленой корональной линии с магнитным полем, но, естественно не объясняет некоторых деталей. Интерпретация целого ряда более тонких эффектов, выявившихся при проведенном анализе, требует более тщательной разработки и детализации.

Авторы выражают благодарность Ю. Сикоре за обсуждение отдельных вопросов, затронутых в работе. Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 02-02-16199) и фондом ИНТАС (грант 2000-840).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Šýkora, *Solar Phys.* **140**, 379 (1992).
2. V. Letfus, L. Kulčár, and J. Šýkora, in *Solar and Interplanetary Dynamics*, ed. M. Dryer and E. Tandberg-Hanssen (Reidel, Dordrecht, 1980), p. 49.
3. J. Šýkora, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **22**, 12 (1971).
4. J. Šýkora, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **22**, 55 (1992).
5. V. Letfus and J. Šýkora, *Atlas of the Green Corona Synoptic Charts for the Period 1947–1976*, Veda, Bratislava (1982).
6. M. Guhathakurta, R. R. Fisher, and R. C. Altrock, *Astrophys. J.* **414**, L145 (1993).
7. Y.-M. Wang, N. R. Sheeley Jr., S. H. Hawley, *et al.*, *Astrophys. J.* **485**, 419 (1997).
8. O. G. Badalyan, V. N. Obridko, and J. Šýkora, *Solar Phys.* (submitted).
9. 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.
10. 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.
11. O. G. Badalyan, V. N. Obridko, and J. Šýkora, *Solar Phys.* **199**, 421 (2001).
12. L. Kulčár and J. Šýkora, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **24**, 79 (1994).
13. J. Šýkora, *Adv. Space. Res.* **14** (4), 73 (1994).
14. J. T. Hoeksema and P. H. Scherrer, *The Solar Magnetic Field – 1976 through 1985*, WDCA Report UAG-94, NGDC, Boulder (1986).
15. J. T. Hoeksema, *Solar magnetic fields – 1985 through 1990*, Report CSSA-ASTRO-91-01 (1991).
16. К. Г. Иванов, А. П. Харшиладзе, *Геомагн. и аэрон.* **34**, 22 (1994).
17. J. Šýkora, O. G. Badalyan, and V. N. Obridko, *Solar Phys.* **212**, 301 (2003).
18. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* **184**, 187 (1999).
19. В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, *Астрон. журн.* **80**, 1034 (2003).
20. R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, *et al.*, *Science*, **287**, 2456 (2000).
21. O. G. Badalyan, V. N. Obridko, J. Rybák, and J. Šýkora, *Proc. ISCS 2003 Symp. Solar Variability as an Input to the Earth's Environment (ESA SP-535)*, ed. A. Wilson (Noordwijk, The Netherlands, 2003), p. 63.
22. О. Г. Бадалян, В. Н. Обридко, Тр. конф. *Климатические и экологические аспекты активности Солнца*, ред. В. И. Макаров, В. Н. Обридко (ГАО РАН, С. Петербург, 2003), с. 33.
23. S. A. Mitchell, *Handb. Astrophys.* **7**, 4, 231 (1929).

## Solar Magnetic Fields and the Intensity of the Green Coronal Line

O. G. Badalyan and V. N. Obridko

Synoptic maps of the intensity of the  $\lambda 530.5$  nm FeXIV green coronal line and maps of computed coronal magnetic fields for the period 1977–2001 are compared. For quantitative comparisons, the correlation coefficients  $r$  for the correlation between these two parameters at corresponding points of the synoptic maps are calculated. This coefficient exhibits cyclic variations in the spot-formation zone,  $\pm 30^\circ$ , and the zone above  $30^\circ$ , and is in antiphase in these two zones. In the low-latitude zone, the correlation coefficient is always positive, reaches its maximum at activity minimum, and strongly decreases by activity maximum. Above  $30^\circ$ ,  $r$  reaches maximum positive values at activity maximum and then gradually decreases, passing through zero near the beginning of the phase of activity minimum and becoming negative during this phase. A Fourier analysis of  $r$  as a function of time reveals a wavelike variation with a period close to 1.3 yr (known also from helioseismological data for the tachoclinic region of magnetic-field generation), as well as a pronounced wave with a period of about 5 yr. The latitude dependence of  $r$  seems to be related to variations in the contributions from local, large-scale, and global fields. Our analysis suggests an approach to studying the complex problem of mechanisms for coronal heating.