

**ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЬНЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЯРКОСТИ ЗЕЛЕННОЙ КОРОНЫ*****О.Г. Бадалян¹, Г.В. Куклин², В.Н. Обридко¹*****CYCLIC VARIATIONS OF PARAMETERS OF MODEL GREEN CORONA
BRIGHTNESS DISTRIBUTIONS*****O.G. Badalyan¹, iG.V.Kuklin², V.N. Obridko¹***

We propose a new avenue of analysis of space-time variations in green corona brightness. Towards this end, brightness distribution histograms are approximated by characteristic statistical distributions (gamma-distribution, and Weibull distribution). A study is made of the cyclic variations of distribution parameters and of their cross correlation, as well as their association with four evolution regimes of green corona emission determined by the principal component method. It is shown that these parameters contain "coded" information about the distribution of structural elements of the corona emitting in the green line, and about their evolution in a cycle of activity. Possibilities of interpreting results obtained, and also the avenues of further investigation are discussed.

Предлагается новое направление для анализа пространственно-временных вариаций яркости зеленой короны. С этой целью гистограммы распределения яркости аппроксимируются характерными статистическими распределениями (гамма-распределение и распределение Вейбулла). Изучены циклические вариации параметров распределений и их взаимная коррелированность, а также их связь с четырьмя эволюционными режимами свечения зеленой короны, определенными по методу главных компонент. Показано, что в этих параметрах "зашифрована" информация о распределении структурных элементов короны, излучающих в зеленой линии, и об их эволюции в цикле активности. Обсуждаются возможности интерпретации полученных результатов и пути дальнейшего исследования.

Введение

Данная работа является следующим логическим шагом в анализе гистограмм распределений интенсивности зеленой корональной линии в 18–22 циклах активности. Одной из задач при интерпретации циклических изменений солнечной активности является минимизация количества математических параметров, описывающих эволюционные процессы. В предыдущих работах [1-3] гистограммы распределений интенсивности зеленой линии I_λ исследовались с помощью метода главных компонент (МГК). Применение этого метода позволило найти собственные функции (главные компоненты), описывающие форму гистограммы. Это означает, что гистограммы разлагались на отдельные функции и исследовалось, как с течением времени меняются вклады этих функций и как это влияет на форму гистограммы. Каждая из собственных функций в МГК, вероятнее всего, не имеет особого физического смысла. Важными являются коэффициенты - "веса", с которыми эти функции входят в исходное распределение (гистограмму). Именно они позволили выделить четыре режима эволюции свечения зеленой короны в цикле активности. В данной работе поставлен вопрос о том, какие выводы можно сделать при рассмотрении формы гистограммы сразу,

не отвлекаясь на отдельные составляющие функции. С этой целью гистограммы аппроксимируются характерными статистическими распределениями. Изучаются два типа стандартных распределений - гамма-распределение и распределение Вейбулла. Мы рассчитываем, что параметры распределений могут указать на некоторые интегральные характеристики короны и их вариации с циклом.

Эта работа только начата. В данной статье кратко описываются уже найденные закономерности эволюции параметров распределений, их взаимная коррелированность, связь с коэффициентами разложения по МГК и обсуждаются пути дальнейшего применения используемого метода и интерпретации результатов его применения.

Параметры статистических распределений

Исходные гистограммы распределений интенсивности зеленой линии можно интерпретировать как распределения по объектам с соответствующей яркостью. Это означает, что гистограммы отражают пространственно-временное распределение ярких элементов в солнечной короне.

Исходя из формы гистограмм, для их аппроксимации были выбраны следующие характерные распределения:

1) гамма-распределение

$$f(x) = A x^{\beta} \exp(-cx), \quad (1)$$

2) распределение Вейбулла

$$f(x) = 1 - \exp(-x/\mu)^{\rho}. \quad (2)$$

Здесь x - средняя интенсивность линии в данном интервале гистограммы; β , c , μ и ρ - параметры соответствующих распределений, свойства которых рассматриваются ниже.

В выбранных распределениях есть много родственного. Есть и ряд отличий. Гамма-распределение (1) непосредственно описывает форму гистограммы. Оно хорошо подходит для описания найденных ранее эволюционных режимов А и В. Для режимов С и D, относящихся к слабому свечению короны в зеленой линии, гамма-распределение пригодно гораздо хуже, так как параметр ρ не может быть меньше 1. Это означает, что оно не позволяет описывать гистограммы, в которых при данной аппроксимации максимум окажется в области отрицательных значений I_{λ} .



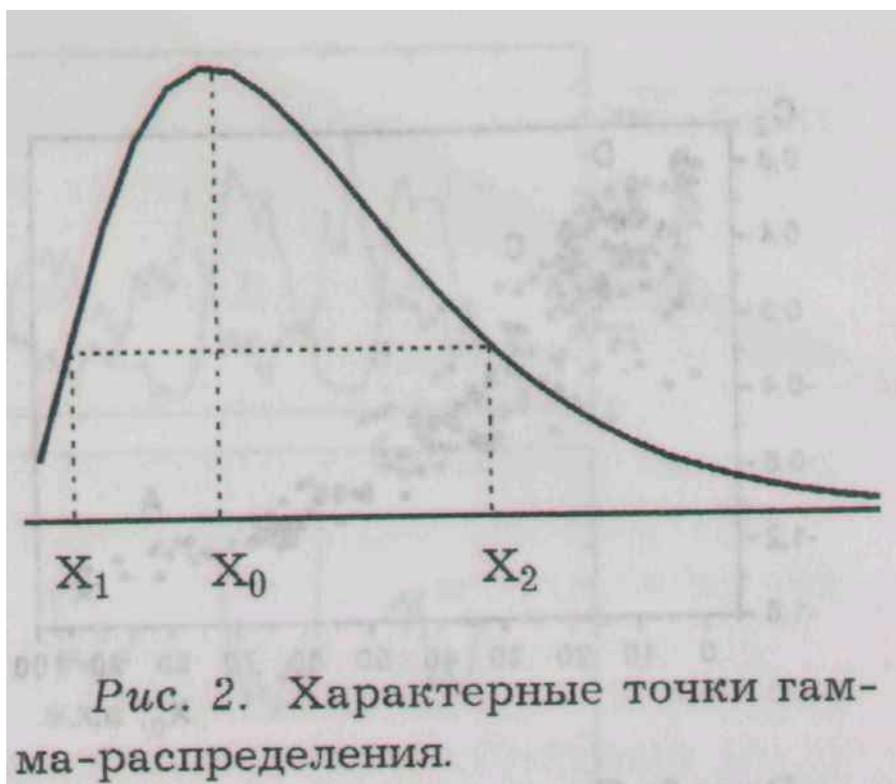
Распределение Вейбулла в формуле (2) описывает не саму исходную гистограмму, а "накопленную сумму" - т.е. каждое следующее значение функции $f(x)$ в данном случае

равно сумме всех предыдущих значений ординат исходной гистограммы. Распределение Вейбулла применимо практически ко всем исходным распределениям и охватывает весь диапазон имеющихся гистограмм.

Для каждой из 306 гистограмм (102 полугодия и три широтные зоны за 1943 -1993 гг.) параметры β , σ , μ и ρ распределений (1)-(2) были найдены с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты расчетов показали, что оба параметра распределения Вейбулла μ и ρ , а также параметр гамма-распределения β обнаруживают циклические вариации, наилучшим образом выраженные в экваториальной области. Все эти три параметра достигают максимума в максимуме активности. Параметр гамма-распределения с такой выраженной связи с циклом активности не обнаруживает (иначе говоря, в нем не выражены четко минимумы и максимумы), хотя более детальный анализ показывает, что этот параметр в режиме А тоже достигает максимума в период максимальной яркости зеленой короны. Выяснилось, что четыре режима свечения зеленой короны, выявленные ранее с применением МГК, различаются и по параметрам этих распределений на соответствующих диаграммах μ - ρ и β - σ . В [3] приведен пример такой связи между параметрами распределения Вейбулла для цикла 18, показывающий, что найденные с помощью МГК четыре режима четко выделяются также по параметрам μ - ρ .

Было обнаружено, что параметры рассматриваемых двух распределений по-разному коррелируют между собой в зависимости от того, рассматривается ли их связь в цикле активности или в пределах каждого из режимов. Это представлено в виде графов на рис. 1, где толщина линии, связывающей каждые два параметра, характеризует величину соответствующего коэффициента корреляции. Можно видеть, что, например, параметры ρ и β (в большей степени описывающие область гистограммы с малыми значениями интенсивности) всегда хорошо коррелируют друг с другом. В то же время связь между β и σ сильна только в пределах данного режима свечения зеленой короны.



Связь параметров гамма-распределения с коэффициентами разложения по МГК

Сопоставление параметров рассматриваемых в данной работе распределений с коэффициентами разложения по МГК показало их взаимную коррелированность. Здесь мы более детально рассмотрим эту связь для гамма-распределения. На рис. 2 схематически изображена функция некоторого гамма-распределения, аппроксимирующая гистограмму режимов А или В. Для удобства описания формы гистограммы были введены три характерные точки: $X_0 = \beta/c$ - максимум гистограммы, а также X_1 и X_2 - точки, в которых значение ординаты в точке X_0 уменьшается в e раз. Оказалось, что положение этих точек на оси абсцисс тесным образом связано с коэффициентами C_1 , C_2 и C_3 , полученными по МГК.

На рис. 3 сопоставляется второй коэффициент разложения по МГК с параметром β/c для экваториальной зоны $\pm 20^\circ$. На рисунке хорошо видно, что точки, относящиеся к выделенным ранее по МГК четырем режимам, расположились в определенных местах диаграммы $C_2-\beta/c$ (заметим, что в режимах С и D исключены точки, в которых $\beta-1 < 0$). Из рис. 3 следует, что среднее значение β/c уменьшается примерно в два раза при переходе от одного режима к другому (этим отчасти объясняется высокая корреляция между β и c в пределах каждого из режимов, показанная выше на рис. 1). В табл. 1 приведены соответствующие значения β/c для четырех режимов свечения короны в зеленой линии, выраженные в абсолютных корональных единицах (а.к.е.).

Рисунок 4 иллюстрирует корреляционную связь между параметром $X_0 = \beta/c$ и первыми тремя коэффициентами разложения по МГК для режима А. Можно сделать вывод, что коэффициенты

Таблица 1

Режим	β/c
А	65.6
В	31.7
С	15.0
Д	6.2

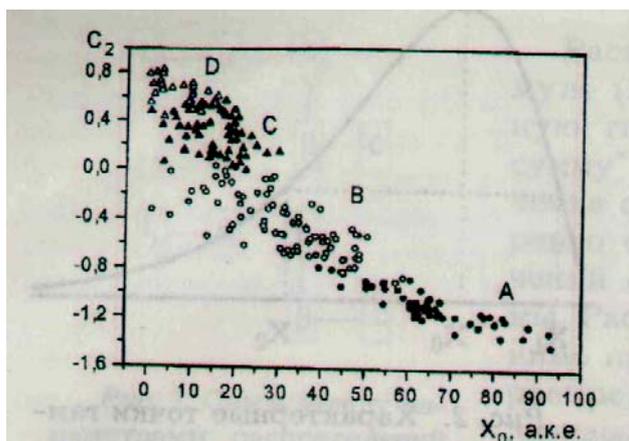
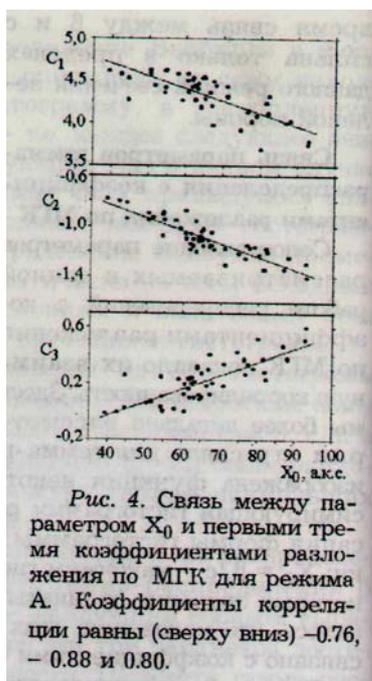


Рис. 3. Связь между параметром X_0 и вторым коэффициентом C_2 для четырех режимов в экваториальной зоне. Точки, относящиеся к различным режимам, обозначены различными значками.



корреляции достаточно высоки, причем самая большая корреляция (с отрицательным знаком) отмечается между положением максимума гистограммы и вторым коэффициентом C_2 .

Такие же корреляционные связи существуют также между положениями X_1 и X_2 и первыми тремя коэффициентами разложения по МГК. При этом сами значения коэффициентов корреляции характеризуют роль каждой из главных компонент в описании гистограммы, т. е. распределения излучающих в зеленой линии элементов короны. Например, параметр X_2 лучше коррелирует с коэффициентом C_1 (связанным с интенсивностью зеленой линии), а X_0 и β - с C_2 (характеризующим положение максимума гистограммы).

Рассмотрим также еще две возможные характеристики данных гистограмм это асимметрия и "нормированная полуширина". Сопоставление этих параметров для экваториальной зоны с числами Вольфа W приведено на рис. 5. На верхней панели рисунка показаны циклические изменения асимметрии исходного распределения, вычисленной стандартным образом с использованием моментов. Сопоставление с числами Вольфа показывает, что асимметрия находится в противофазе с W . На нижней панели приведен параметр $(X_2 - X_1)/X_0$, который мы назвали "нормированной полушириной". Ясно, что этот параметр не может быть определен для гистограмм периода минимума активности. "Нормированная полуширина" изменяется в фазе с асимметрией и находится в противофазе с числами Вольфа.

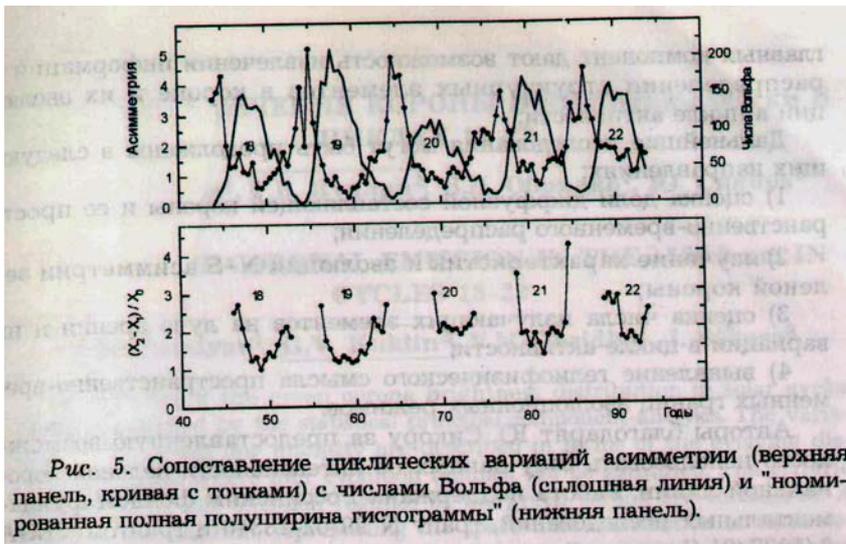


Рис. 5. Сопоставление циклических вариаций асимметрии (верхняя панель, кривая с точками) с числами Вольфа (сплошная линия) и "нормированная полная полуширина гистограммы" (нижняя панель).

Это означает, что в максимуме активности распределение элементов короны по яркости становится более симметричным, а вклад элементов с относительно большой и маленькой яркостью (по отношению к средней яркости) уменьшается.

Заключение

Рассмотрена возможность аппроксимации гистограмм распределения интенсивности зеленой корональной линии стандартными статистическими распределениями. Выявлены циклические изменения параметров распределений, их взаимная коррелированность и связь с коэффициентами разложения по методу главных компонент. Параметры рассмотренных здесь распределений позволяют лучше понять роль главных компонент (собственных функций) в описании формы гистограмм, которые, в свою очередь, характеризуют физические особенности и пространственное распределение ярких элементов в короне.

Основные результаты, полученные к настоящему времени, можно сформулировать следующим образом:

- 1) яркость наиболее часто встречающихся элементов в короне характеризует эволюционный режим и при переходе от режима к режиму меняется примерно в 2 раза;
- 2) "нормированная полная ширина" и асимметрия распределения уменьшаются с ростом активности как внутри цикла, так и от цикла к циклу;
- 3) совместный анализ параметров модельных распределений яркости зеленой короны и коэффициентов разложения по методу главных компонент дают возможность извлечения информации о распределении структурных элементов в короне и их эволюции в цикле активности;

Дальнейшие исследования могут быть продолжены в следующих направлениях:

- 1) оценка доли диффузной составляющей короны и ее пространственно-временного распределения;
- 2) изучение характеристик и эволюции N-S асимметрии зеленой короны;
- 3) оценка числа излучающих элементов на луче зрения и их вариации в цикле активности;
- 4) выявление гелиофизического смысла пространственно-временных границ эволюционных режимов.

Авторы благодарят Ю. Сикору за предоставленную возможность использовать базу данных об интенсивности зеленой корональной линии. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант N 99-02-18346 и грантом VEGA 2/1022/21 Словацкой академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I

1. Badalyan O.G., Kuklin G.V. Evolutionary regimes of the green-line coronal brightness during cycles 20-21 // *Astron. and Astrophys. Transact.* 2000.1 V. 18. N6. P. 839-859.
2. Бадалян О.Г., Куклин Г.В., Обридко В.И., Сикора Т.О. Режимы свечения короны в линии X 530.3 им в циклах 18-22 // *Настоящий сборник.* С.33.
3. Бадалян О.Г., Куклин Г.В., Обридко В.Н., Сикора Ю. Динамика режимов свечения зеленой короны в циклах 18-22 / *Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы* / Под. ред. В.И. Макарова. СПб.: ПИЯФ, 1999. С. 5-10.
4. Badalyan O.G., Obridko V.N., Sykora J. Brightness of the coronal green line and prediction for activity cycles 23 and 24 // *Solar Phys.* 2001. (in press).
5. Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Сикора Ю. Прогноз 23-24 циклов солнечной активности по данным о яркости зеленой короны // *Настоящий сборник.* С. 159.

¹ИЗМИРАН

²ИСЗФ СО РАН