

УДК 523.98

## ПОСЛЕДНИЙ КОМПЛЕКС АКТИВНОСТИ 23-го ЦИКЛА НА СОЛНЦЕ. II. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

<sup>1</sup>М.Ю. Савинкин, <sup>1,2</sup>С.А. Язев

## LAST COMPLEX OF ACTIVITY OF THE 23 SOLAR CYCLE. II. STRUCTURE AND DYNAMICS OF CORONAL LOOPS

<sup>1</sup>M.Yu. Savinkin, <sup>1,2</sup>S.A. Yazev

Работа посвящена продолжению исследований комплекса активности, наблюдавшегося на Солнце в период с ноября 2006 г. до февраля 2007 г. Эволюция комплекса активности сопровождалась развитием мощных систем высоких корональных петель, наблюдавшихся космическим аппаратом SOHO в диапазоне волн вблизи 195 нм. Выполнен анализ геометрических параметров петель и их изменения со временем. Показано, что на начальном этапе развития набор значительной высоты петель описывается гауссовым распределением (в ноябре 2006 г.), затем распределение становится двухвершинным. После формирования новой ветви комплекса активности (активной области к западу от предыдущей) две ветви были связаны гигантской системой высоких корональных петель. Приведены характерные параметры корональных петель в комплексе активности, выполнен анализ их изменений во время мощной солнечной вспышки.

This study is sequel to investigation into the complex of solar activity observed in November 2006 – February 2007. Evolution of the complex of activity involved development of powerful systems of high coronal loops observed by the SOHO space vehicle in the waveband near 195 nm. We analyze loop geometric parameters and their time variations. Values of loop height are shown to be described by the Gaussian distribution (November 2006) at the initial development stage, whereupon the distribution becomes bimodal. When a new branch of the complex of activity (active region to the west of the previous one) is formed, two branches are tied together with a giant system of high coronal loops. Characteristic parameters of coronal loops in the complex of activity are presented, and their variations during a powerful solar flare are analyzed.

### Введение

Работа посвящена продолжению исследований комплекса активности (КА), наблюдавшегося на Солнце в период с ноября 2006 г. до февраля 2007 г. [1]. Эволюция КА сопровождалась развитием мощных систем высоких корональных петель, наблюдавшихся космическим аппаратом SOHO в диапазоне 195 Å. Как правило, для КА с относительно простой магнитной структурой типа исследуемого характерны существенно менее развитые петли. В работе выполнен анализ геометрических параметров петель и их изменений со временем.

Метод исследования. Применена авторская компьютерная программа «Солнцеворот», использующая возможности пакета объектно-ориентированного программирования 3D StudioMax и позволяющая наблюдать активные образования на Солнце с позиции гипотетического наблюдателя, «зависшего» над избранной точкой солнечной поверхности [1, 2]. Таким образом, устранен эффект перспективного сокращения и другие эффекты проекции, связанные с положением наблюдателя (аппарата SOHO) и сферичностью вращающегося Солнца (камера «рабочий вид», [2]). Модификация программы, выполненная в 2009 г., позволила расширить набор ее функций. Изучена и применена возможность строить модели корональных петель в виде дуг или изогнутых трубок, фиксированные основания которых могут иметь любые гелиографические координаты на поверхности модельной каркас-сферы и отражать реальную геометрию объектов на Солнце, включая произвольный наклон по отношению к локальной поверхности.

Для моделирования трехмерных петельных структур в новой версии программы предустановлен ряд вспомогательных объектов, в частности, инст-

румент «Плоскость» для плоского проецирования опорных изображений полного диска Солнца вместе с наблюдаемыми в УФ-диапазоне петлями на лимбах. С этой же целью построены модели Солнца в виде каркас-сфер, на которые в планарной проекции накладываются любые его изображения (текстурные карты или снимки). При этом получаемое изображение в точности совпадает с его плоским текстурным аналогом (или с изображением на «Плоскости»). Создана функция, позволяющая изменять прозрачность изображений, что удобно при наложении, отождествлении и сопоставлении положений деталей структуры фотосферы, хромосферы и магнитограмм Солнца в различные моменты фотографирования. Программа позволяет локализовать основания магнитных петель в сопоставлении с элементами разной полярности на магнитограммах, которыми предварительно текстурируется поверхность опорной сферы. Вращая трехмерную модель Солнца в одном из видовых окон, можно выбрать наиболее удобный ракурс для анализа корональных структур КА. Все сформированные на основании снимков трехмерные объекты подчиняются корректным преобразованиям вращения. Для удобства обозначения и классификации элементов структуры КА программная модель корональных петель допускает их представление в виде линий разных цветов и различной толщины. Петли отображаются в специальном окне при выводе высококачественного трехмерного изображения (практически без потери информации по сравнению с оригинальными снимками Солнца) в заданном ракурсе наблюдения. В этих целях используется инструмент «Камера гелиостационарного наблюдения».

В программу введен новый измерительный инструмент – «Высотомер». Он позволяет измерить вы-

соту любой петли над лимбом Солнца или его поверхностью, над которой данная петля «нависает» в любой ее точке. Высота определяется как длина перпендикуляра, опущенного от вершины петли к лимбу либо к поверхности Солнца. «Высотомер» выполнен в виде связанных при вращении концентрических кругов изменяемого радиуса. Вращением плоскости «Высотомера» осуществляется наводка на выбранную петлю. Радиус малого круга этого инструмента равен радиусу Солнца, радиус большого круга свободно меняется в широких пределах с точностью до километра. При установке измерителя на вершину петли значения радиусов отображаются в двух окнах, а их разница дает искомую величину.

Усовершенствована возможность измерять угловые расстояния между произвольными точками на сферической модели Солнца с помощью инструмента «сферический» угломер. Он позволяет быстро измерять базы (расстояния между основаниями) петель, как установленных в качестве трехмерных структур, так и по положениям их оснований на снимках, которые накладываются на каркас-сферу. В целом пакет «Солнцеворот» позволяет эффективно выполнять различные измерения геометрических размеров трехмерных объектов в короне Солнца.

### Результаты

Корональные петельные структуры КА продемонстрировали высокую динамику, уровень которой постепенно уменьшался со временем. Так, в ноябре в КА были заметны активные перемещения петельных структур, изменения яркости отдельных петель, их наклона, наблюдались пересоединения и скручивания магнитных трубок. В период с 17:36 7.11.2006 по 07:36 8.11.2006 происходили значительные и изменения геометрии и пространственного расположения петель. За этим последовал активный рост высоты петель с 03:59 до 05:12 UT 9.11.2006. Быстрый рост высоты некоторых петель в северной части КА составил до 30 % от первоначальных значений.

Распределение корональных петель в исследуемом КА по высоте над лимбом, наблюдаемом в свете линии 195 Å, приведено на рис. 1. Измерения высот петель выполнялись по изображениям Солнца, полученным космическим аппаратом SOHO с интервалами примерно в 13 суток, когда КА оказывался поочередно то на восточном, то на западном лимбах Солнца.

На начальном этапе развития КА набор значений высоты петель описывается гауссовым распределением (ноябрь 2006 г., рис. 1, а), затем максимум распределения сместился в сторону больших значений высоты (декабрь 2006 г., рис. 1, в). В конце декабря во время нахождения на западном лимбе в распределении высот намечается провал в области средних значений гистограммы (рис. 1, з). Спустя две недели, во время нахождения на восточном лимбе в январе 2007 г., распределение приобретает ярко выраженную двухвершинную форму (рис. 1, д). К концу января высота наиболее мощных петель достигала 410 Мм, рис. 1, е, что превышает половину радиуса Солнца и редко наблюдается в этом диапазоне длин волн. Так, в работе [3], посвященной корональным петлям мощного КА в октябре 1991 г., показано, что высота петель не превышала 300 Мм.

После формирования новой ветви КА (активной области к западу от предыдущей, [1]) две (старая и новая) ветви были связаны гигантской системой высоких корональных петель. Вкладом петель, связавших между собой активные области КА, объясняется второй пик распределения на рис. 1, е.

На рис. 2 показаны распределения расстояний между основаниями корональных петель в КА (баз), измеренных во время нахождения КА в центре видимого полушария Солнца. В ноябре 2006 г. распределение выглядит сравнительно симметричным с нерезким максимумом в области 90–180 Мм (рис. 2, а). В декабре характер распределения изменился: наблюдался резкий максимум в районе 60 Мм с относительно плавным спадом в сторону больших размеров

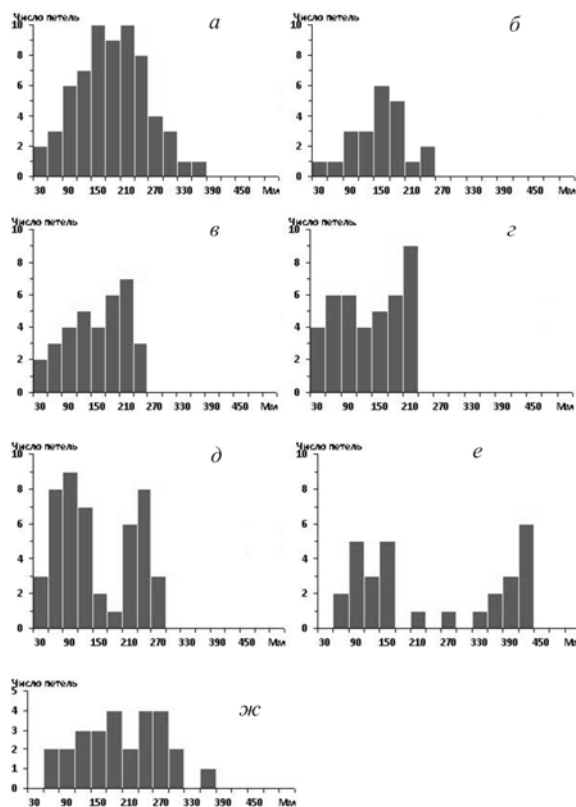


Рис. 1. Распределение корональных петель КА по высоте нависания во время нахождения на восточном и западном лимбах. По оси абсцисс – высота в мегаметрах (1Мм = 1000 км); а, б – ноябрь, в, г – декабрь, д, е – январь, жс – февраль (западный лимб).

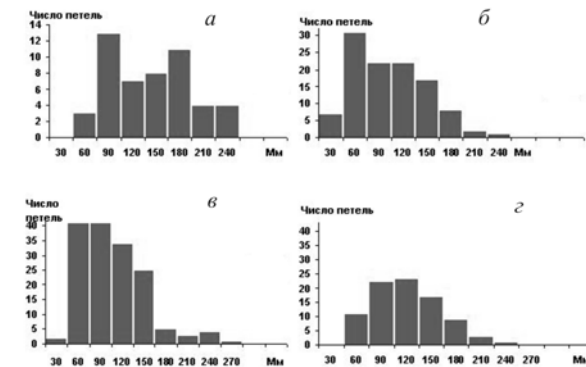


Рис. 2. Распределение корональных петель КА по расстояниям между основаниями петель. По оси абсцисс – высота в Мм; а – ноябрь, б – декабрь, в – январь, г – февраль.

(рис. 2, б), при этом «хвост» распределения достигал значений 240 Мм. В целом, сходный характер распределения сохранился и в январе 2007 г. (рис. 2, в). В этот период, когда возникли трансобластные петли, соединяющие две ветви КА, наблюдалось небольшое количество петель с базой до 270 Мм. На завершающем этапе развития КА в феврале 2007 г. общий характер зависимости в целом не изменился, кроме сдвига всего распределения в сторону больших значений с одновременным исчезновением наиболее длинных петель (рис. 2, г).

*Классификация петель КА.* Попытки предложить классификацию корональных петель, развивающихся над КА, предпринимались ранее другими авторами. Так, например, в работе [3] предложена трехъярусная классификация корональных петель по результатам анализа КА в октябре 1991 г., по данным спутника *Yohkoh* (табл. 1).

Таблица 1

Параметры корональных петель над КА в октябре 1991 [3].

Ярусы	Протяженность, Мм	Высота (Мм)	Длина (Мм)	Толщина (Мм)
1. Нижний	30–121	30	60	10
2. Средний	121–365	150	300	>10
3. Высокий	Более 365	290	1000	30

Изучение корональных петель в КА на рубеже 2006–2007 гг. позволило предложить следующую их классификацию, которая представляется более адекватной (табл. 2, рис. 3). Здесь приняты следующие обозначения (рис. 4):

1.  $b$  – расстояние между основанием петель (база), выраженное в мегаметрах (Мм);

2.  $h$  – высота нависания петель над поверхностью Солнца (максимальное значение перпендикуляра, опущенного из одной из точек на контуре петли на лимб, Мм);

3.  $L$  – длина радиальной полуоси (при аппроксимации петель полуэллипсами, Мм).

В обеих таблицах близки по основным параметрам только ярус 1 и класс 1 (низкие петли), для других классов имеются различия.

Отметим, что в табл. 1 не учитывается форма петель, в то время как это важный фактор. Анализ показал, что петли могут аппроксимироваться полуэллипсами с разными эксцентриситетами, причем

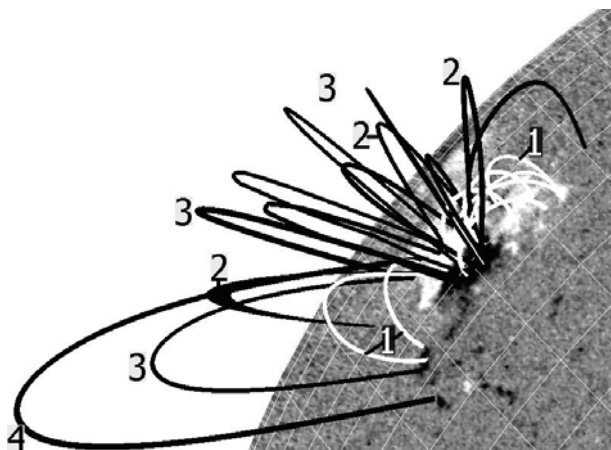


Рис. 3. Классы 1, 2, 3, 4 внутренних петель.

радиальная полуось (близкая к нормали к локальной поверхности Солнца) может быть и большой, и малой. Согласно табл. 2, большая полуось располагается горизонтально только у низких внутренних петель класса 1, остальные классы отличаются радиальным расположением больших полуосей петель. Обнаруженные различия в форме петель приводят к выводу, что с ростом их высоты не обязательно растет база: у петель с одинаковой высотой (табл. 2) могут существенно различаться базы, соответствуя разным ярусам в табл. 1.

Взаимное расположение разноуровневых систем корональных петель в КА оказалось достаточно сложным. Так, в ноябре 2006 г. обнаружена система вложенных петель (магнитная «матрешка»). Средствами программы «Солнцеворот» была построена ее трехмерная модель (рис. 5). В отличие от других петель, проявлявших высокую степень динамичности, данная структура обладала значительной устойчивостью. Она состояла из петель 1, 2 и 3 класса типа I (внутренние), основные параметры которых указаны в табл. 2. Ориентации осей систем верхних и нижних петель были перпендикулярны друг другу.

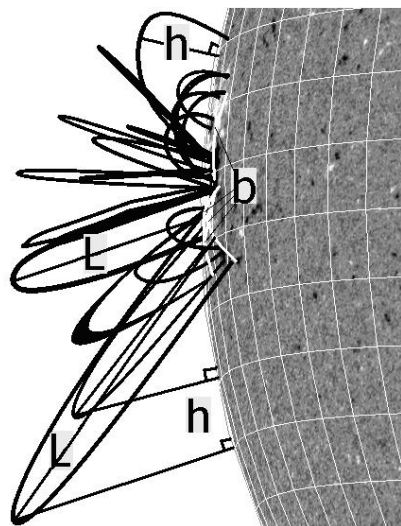


Рис. 4. Геометрические параметры петель.  $B$  – база,  $h$  – высота,  $L$  – длина радиальной полуоси.

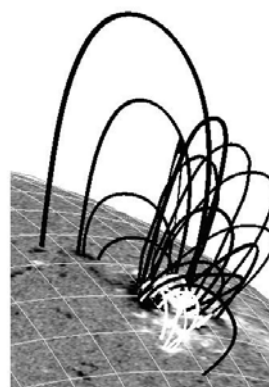


Рис. 5. Магнитная «матрешка» – многоуровневая система вложенных петель со взаимно перпендикулярными осями. Контуры петель показаны на фоне магнитограммы.

Параметры корональных петель над КА в ноябре 2006 – феврале 2007.

Тип	Класс	Локализация оснований	Типичная база $b$ петли (Мм)	Типичная высота $L$ петли (Мм)	Типичная высота $h$ нависания петли (Мм)	Отношение длины полуоси к базе ( $L:b$ )	Комментарий
I. Внутренние	1. Низкие	Одно – у пятна, другое – в окружающих флоккулах КА	60	45	41	~1:2–1:1	Наблюдались в Центральной зоне Восточной ветви КА, весь период
	2. Средние	Одно – у пятна, другое – в удаленных флоккулах КА	70	180	102	2:1–3:1	В центральной зоне КА, над низкими петлями системы 2, перпендикулярны системам 1
	3. Высокие	Там же	100	218	135	2: 1–2.5: 1	Над системами 1 и 2, параллельны системе 2
	4. Сверхвысокие	Одно – у пятна, второе – в периферийных областях КА	>121	>240	>200	2 : 1	Могут быть сильно наклонены к поверхности Солнца
II. Внешние	1, 2, 3, 4	Оба основания во флоккулах периферийной зоны КА	-----	-----	-----	1:1–3:1	Любой наклон к локальной поверхности
	5. Транс-областные	Основания принадлежат периферийным флоккулам разных АО (в западной и восточной ветвях КА)	~150	~80	~110	~1:1–1:2	Наклон к локальной поверхности, как правило, мал

**Выводы**

Могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Эволюция последнего КА 23-го цикла солнечной активности в ноябре 2006 – феврале 2007 гг. сопровождалась развитием аномально мощной системы корональных петель, достигавших 410 Мм в высоту и 270 Мм в длину (по расстоянию между основаниями).

2. В ходе эволюции корональных петель КА сформировались по крайней мере две группы петель с типичными высотами 90 Мм и 240 Мм. Высоты второй группы постепенно увеличивались, достигнув характерного значения около 400 Мм.

3. Предложена классификация петель на основе различий в локализации оснований и геометрической форме петель.

4. По-видимому, взаимодействия в сложной системе разноуровневых корональных петель со взаимно перпендикулярной ориентацией осей могли привести к генерации серии мощных солнечных вспышек в ноябре 2006 г., нетипичных для далекой пост-максимальной фазы цикла солнечной активности.

5. Не исключено, что быстрое развитие аномально мощных систем корональных петель, сопровождавших на раннем этапе появление сравнительно простой, с точки зрения магнитной структуры основной активной области КА, может рассматриваться как прогностический фактор, указывавший на

будущую уникальную длительность существования (около 5 солнечных оборотов) основного пятна КА. Это предположение может быть проверено на других примерах.

6. Не исключено, что уникальные особенности КА (высокая продолжительность существования основного пятна, уровень развития мощных систем корональных петель, а также необычно высокая вспышечная активность) связаны с последующими аномальными свойствами фазы спада 23-го цикла солнечной активности.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Савинкин М.Ю., Язев С.А. Последний комплекс активности 23 цикла солнечной активности. Труды X конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы». Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2007. С. 242–245.  
 2. Савинкин М.Ю., Язев С.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009610344.  
 3. Сагтаров И., Шерданов Ч.Т., Ладенков О.В. Рентгеновская структура комплексов активности на Солнце. Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. М., 2001. Т. 71. С. 219–222.

<sup>1</sup> Астрономическая обсерватория ИГУ, Иркутск

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск