

УДК 523.98

## ПОСЛЕДНИЙ КОМПЛЕКС АКТИВНОСТИ 23 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

Работа посвящена исследованию комплекса активности (КА), развивавшегося на Солнце в ноябре 2006 г. – феврале 2007 г. на предминимальной фазе 23-го цикла солнечной активности. Этот КА вызвал большой интерес целым рядом необычных свойств.

### Метод исследования

На базе профессионального пакета 3D-Max создана компьютерная программа, исключая эффект вращения Солнца и позволяющая наблюдать активные образования на Солнце с позиции гипотетического наблюдателя, «зависшего» над избранной точкой солнечной поверхности, в кэррингтоновской системе координат. В результате были переобработаны (исправлены за эффект проекции) изображения Солнца в интегральном свете, в линии 195 Å и магнитограммы, полученные космическим аппаратом SOHO в период развития КА. Получены фильмы из изображений КА в одном и том же ракурсе за время четырех его прохождений по диску Солнца с жесткой привязкой в кэррингтоновской системе координат (точность не хуже 0.05° для зоны 60° от центра диска). Фильмы позволили визуализировать и сделать наглядными многие процессы движений и эволюционных изменений в пространственном распределении структурных и магнитных элементов КА. Программа обеспечивает наложение с высокой точностью последовательно полученных снимков один на другой для изучения связи морфологических элементов, наблюдаемых в разных диапазонах спектра, и изучения наблюдаемых изменений. В результате анализа серии изображений с использованием программы выявлен ряд особенностей морфологии и развития КА.

### Морфологические и эволюционные характеристики КА

Основой КА являлась группа пятен, представленная основным крупным пятном S-полярности (координаты  $L=8^\circ$ ,  $\varphi=-7^\circ$ ). Пятно образовалось 23.10.2006 г. перед заходом за западный лимб и существовало, смещаясь в кэррингтоновской системе координат не более чем на величину собственного диаметра, на протяжении по меньшей мере четырех оборотов, что является крайне редким случаем, тем более на фазе минимума (рис. 1, 2).

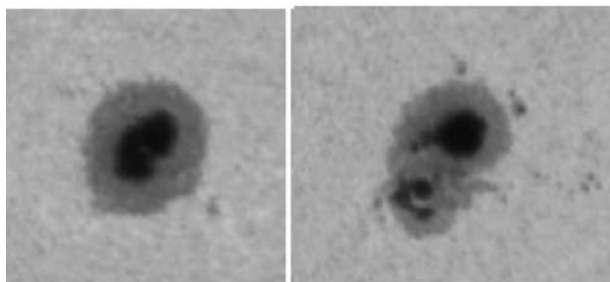


Рис. 1. Основное пятно западной ветви КА 17 ноября 2006 г. (слева), справа – то же пятно 13 декабря. Снимки SOHO.

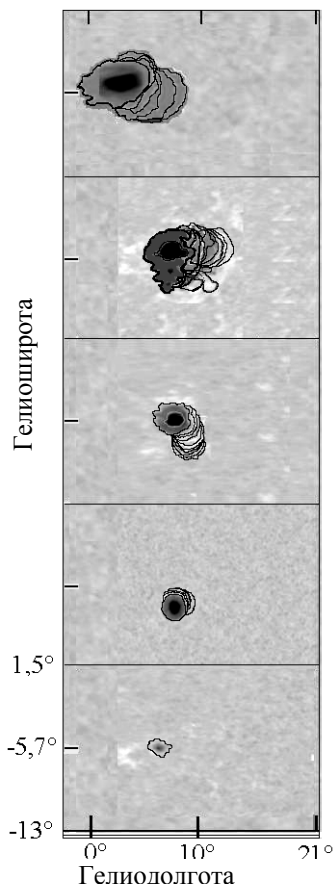


Рис. 2. Смещение основного пятна западной ветви КА в кэррингтоновской системе координат в течение пяти прохождений по диску.

*Первое прохождение* КА по диску (АО № 10923) наблюдалось в период с 8 по 20.11.2006 г. Максимальное количество пятен на этом обороте – 7, максимальная площадь группы пятен достигала 660 м.д.п. После 16 ноября начался плавное уменьшение площади основного пятна [1, 2]. Анализ изменений формы границ тени и полутени пятна, а также положений отдельных элементов пятна в системе координат, связанной с центром пятна, показал, что в период с 8 по 13 ноября пятно испытывало вращение вокруг своей оси в кэррингтоновской системе координат, повернувшись за 125.35 ч на 55° против часовой стрелки (средняя скорость вращения 26.34 °/ч). Начиная с 13 ноября, вплоть до ухода за западный лимб 20 ноября, пятно вращалось по часовой стрелке, повернувшись за 164.52 часа на 58° (средняя скорость вращения 21.18 °/час). Изучение смещения выделенных элементов в полутени и тени пятна показало, что тень и полутень вращались синхронно, как единое целое.

*Второе прохождение.* КА снова появился на восточном лимбе 4.12.2006 г. В УФ-диапазоне, по данным наблюдений SOHO, наблюдалась гигантская система высоких петель, достигавшая высот не менее 300 тыс. км и простиравшаяся на север от КА, по крайней мере, на 300 тыс. км и на 200 тыс. км на юг. Прохождение с 5 по 18 декабря (АО № 10930) отмечалось существенными событиями. Общая конфигурация АО мало изменилась (крупное пятно, небольшие пятна и поры с запада и юга, максимальное число пятен 17, максимальная площадь пятна 680 м.д.п. [3]).

Активность АО в это период была высокой. Анализ последовательности фотосферных снимков SOHO показал, что в декабре пятно продолжало вращаться по часовой стрелке. В период с 6 по 16 декабря (238.13 ч) тень пятна повернулась на 45° (средняя скорость вращения 11.4 °/час). За этот же период, судя по смещениям отдельных элементов (ядер) в пределах полутени, последняя повернулась на 30° (7.56 °/ч, рис. 3). При этом увеличивались размеры пятна – постепенно возрастало расстояние изучаемых элементов от геометрического центра пятна (рис. 4). Угловая скорость вращения элементов тени пятна оказалась в 1.5 раза больше, чем элементов полутени. Возможно, это одно из обстоятельств, связанных с высокой вспышечной активностью в АО.

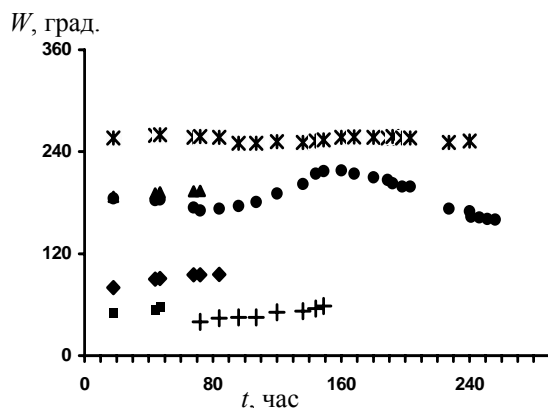


Рис. 3. Смещение нескольких отдельных ядер (элементов тени) основного пятна КА в декабре 2006 г. по углу в радиальной систем координат, связанной с геометрическим центром пятна.

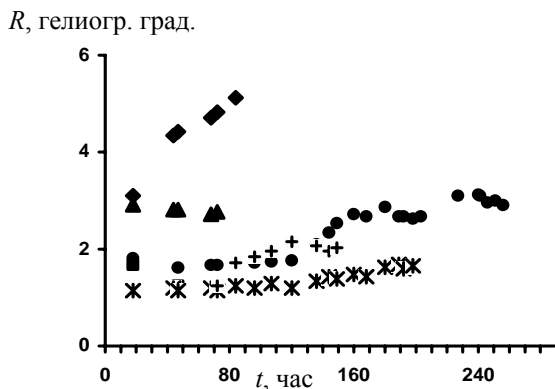


Рис. 4. Смещение тех же ядер, что и на рис. 3, по радиусу в той же системе координат.

Период с 5 по 13 декабря в пятне происходили заметные изменения: полутень (большой площади) быстро изменялась, в ней возникали новые отдельные ядра тени, включая области противоположной по отношению к основному ядру полярности. На юге пятна наблюдалось всплытие нового магнитного потока в виде пятна в рамках выступа полутени основного пятна. Основные этапы этого сложного процесса происходили следующим образом.

Начиная с 6 декабря наблюдался процесс формирования второго крупного ядра внутри общей полутени к югу от основного ядра пятна. На снимке 17:52 06 декабря появилось небольшое новое ядро. В период до 00:01 9 декабря наблюдались колебательные смещения этого ядра – сначала в западном направлении (против направления общего вращения пятна), затем на восток, затем опять на запад, при этом амплитуда смещения возрастала с каждым разом. К 20:10 08 декабря оно заметно сместилось на восток вдоль южной границы полутени. Характерная величина смещения в 3–5 раз превышала величины смещений, связанных с вращением полутени пятна. Таким образом, речь идет о собственных движениях новых небольших ядер в пределах полутени.

Начиная с 00:01 9 декабря вплоть до 4:48 12 декабря, происходило ускоренное движение этого нового ядра к востоку (примерно тангенциально по отношению к основной «старой» тени пятна). Возникшие поблизости остальные новые ядра к этому времени сблизилась между собой в пределах полутени вблизи ее южной границы. К 00:00 11 декабря они слились в одно новое крупное ядро. В 00:00 12 декабря это ядро, приобретая форму гантели, снова разделилось на два, при этом их общая площадь существенно выросла.

В период с 4:48 до 16:12 12 декабря наблюдалось вращение этих ядер против часовой стрелки вокруг нового общего центра, расположенного между ними, – геометрического центра формирующейся тени нового крупного пятна. В процесс вращения были вовлечены и другие элементы его формирующейся тени. Вращение нового пятна со значительной средней скоростью 2.7 °/ч осуществлялось в направлении, противоположном вращению первоначального пятна; в этом смысле район контакта старого и нового пятен походил на область зацепления двух вращающихся шестеренок.

На снимке 16:12 12 декабря видно, что от нового пятна отделился и стал быстро удаляться темный элемент (пора) с зачаточной полутенью, в дальнейшем его контраст падал по мере удаления от родительского образования. Тень нового южного пятна разделилась на несколько отдельных ядер. Судя по снимку 12:08 13 декабря, в этот период происходило быстрое разрастание полутени южного пятна по всем направлениям. В нем наблюдались активные динамические процессы.

За время второго прохождения в КА произошли X/4 + M/5 + C/48 рентгеновских вспышек, а также 3/1 + 2/3 + 1 /4 + S/51 оптические вспышки. Особое внимание привлекают рентгеновские вспышки X9.0/2N 5.12.2006 (8 место по мощности в 23-м цикле),

X6.5/3B (13 место в 23-м цикле), X3.4/2B 13.12.2006 и X1.5/1N 14.12.2006. [4]. Даже учитывая необычную вспышку X2.6/1B в июле 1996 г. на фазе минимума цикла [4], высокая вспыхивающая активность рассматриваемого КА на предминимальной стадии цикла выглядит беспрецедентной. Логично предположить, что она связана с описанными выше динамическими процессами в основном ядре, связанными с выходом нового магнитного потока непосредственно в полутени основного пятна 9 – 13 декабря. После всплеска вспыхивающей активности 5–14 декабря, начиная с 16 декабря, пятно стало уменьшаться, а общая магнитная структура – упрощаться.

Можно отметить сходство некоторых параметров исследуемого КА и нескольких АО, рассмотренных в [5]. В [5] указано, что в этих вспыхивающих областях новые пятна также «всплывали» внутри полутени существующего пятна  $\delta$ -конфигурации, мощные вспышки происходили после максимального поворота группы пятен, а после вспышек происходило изменение направления вращения. Важно, что исследованные в [5] области наблюдались на стадии максимума солнечной активности (1989–1991 гг.), в нашем же случае мы имеем аналогичный пример на стадии минимума цикла.

*Третье прохождение.* Вопреки ожиданиям, после бурных событий в декабре развитие КА продолжалось. На обратной стороне Солнца к западу от основной АО КА сформировалась новая ветвь КА (АО № 10953, координаты  $L=39^\circ$ ,  $\phi=-4^\circ$ ). Она появилась на восточном лимбе 30 декабря, представляя собой крупное головное пятно N-полярности (в нарушение правила Хэйла) и несколько мелких пятен S-полярности к востоку от него. Через экватор к северу от нее отмечена небольшая короткоживущая группа мелких пятен и пор (АО № 10934, координаты  $L=38^\circ$ ,  $\phi=+3^\circ$ ), в ней расположение полярностей было «правильным». К востоку от этих АО продолжало существовать описанное выше пятно основной ветви КА (третье прохождение по диску, АО № 10935). Пятно уменьшилось в размерах, но его координаты практически не изменились (рис. 2, третья панель).

Судя по магнитограмме SOHO, магнитная структура КА при январском прохождении (30.12. – 13.01) выглядела следующим образом (рис. 5).

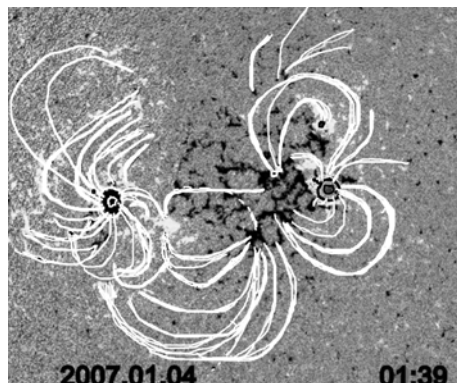


Рис. 5. Структура КА в январе 2007 г. На фоне магнитограммы в левой части восточная ветвь с долгоживущим пятном, в правой части – молодая (западная) ветвь КА. Светлыми линиями показаны проекции на солнечную поверхность высоких корональных петель в линии 195 Å.

Основная (старая, или восточная ветвь КА) представляла собой все то же крупное пятно S-полярности, окруженное со всех сторон обширной зоной поля N-полярности. Исключение – примыкавшая к пятну с юга узкая полоска S-полярности. N-поле простиралось в северное полушарие вплоть до широты  $+12^\circ$ . Здесь наблюдалось МП типа «усиленной сетки» – узелки и полоски поля концентрировались на границах супергранул, в пространственном распределении напряженности поля явно просматривалась структура супергрануляции. В центрах супергрануляционных ячеек поле отсутствовало (серый фон на магнитограммах).

В новой западной ветви КА (справа на рис. 5) крупное пятно оказалось на западной границе обширной зоны S-полярности, примыкавшей к аналогичной N-зоне старой ветви КА. Структура поля здесь была такая же (модулирована супергрануляцией) с тенденцией к сгущению магнитных элементов к западной части новой ветви. В итоге МП КА в январе представляло собой биполярную зону из двух крупных трансэкваториальных магнитных ячеек (западная – S-полярности, восточная – N-полярности). В этих ячейках развивались две АО – в западной новая с крупным пятном N-полярности, в восточной старая (существующая уже три оборота) с основным крупным пятном S-полярности. Полная долготная протяженность КА составила по крайней мере  $60^\circ$ , расстояние между центрами основных пятен АО двух ветвей КА составило  $31^\circ$ . Наблюдения SOHO на длине волны 195 Å показали, что высокие корональные петли соединяют между собой зоны восточной и западной ветвей КА, что подтверждает версию о том, что обе ветви являются частями одного КА (рис. 5).

Изучение ряда снимков показало, что в январе оба основных пятна обеих ветвей КА вращались. «Старое» Восточное пятно вращалось по часовой стрелке, западное – против. Угловые скорости вращения отдельных элементов теней и полутеней отличались в пределах от 1 до 15  $^\circ$ /час. Средние скорости вращения обоих пятен, полученные в результате усреднения скоростей по нескольким элементам, близки и равны приблизительно 14  $^\circ$ /час. За весь период наблюдений на январском обороте западное пятно повернулось на  $255^\circ$  вокруг своей оси.

В основном пятне новой ветви КА также наблюдались активные изменения, к западу от него появлялись динамично изменяющиеся небольшие пятна, однако вспыхивающая активность первоначально была невысокой. Во второй половине периода прохождения (8–14.01.2007) она несколько усилилась (три рентгеновские вспышки класса C, оптические вспышки 2/1 + 1/2 + S/5).

*Четвертое прохождение.* КА наблюдался в период 26.01–10.02.2007. Основные пятна в западной (АО № 10940) и восточной (АО № 10941) ветвях КА продолжали существовать! Пятна уменьшились, стали симметричными, практически без дополнительных ядер в полутени. Вспыхивающая активность за все время прохождения была незначительной (C4 + S4). Отметим, что пятно западной ветви сместилось к западу примерно на  $5^\circ$  за оборот.

*Пятое прохождение.* В восточной ветви на месте пятна наблюдалась небольшая группа пор, на месте западной ветви еще более уменьшившееся основное пятно сместилось еще на  $5^\circ$  к западу.

Таким образом, основное пятно, составившее основу западной ветви КА, существовало с октября 2006 по февраль 2007 г., что представляется крайне редким явлением (в 23-м цикле солнечной активности аналоги отсутствуют). На третьем, четвертом и пятом оборотах наблюдалась новая западная ветвь КА, которая, судя по топологии распределения магнитного поля и замыканиям корональных петель, составляла единую систему со старой ветвью.

Анализ изменений МП пятен по магнитограммам показал наличие сложных эффектов истечения из тени пятна движущихся наружу магнитных элементов [6]. Эти процессы требуют отдельного изучения.

### Выводы

1. Разработан эффективный программный пакет, позволяющий анализировать динамику солнечных образований, приводя разновременные снимки к одному ракурсу, и исключая эффекты проекции и перспективного сокращения. Пакет применен к исследованию эволюционных и морфологических параметров уникального КА, развивавшегося на предминимальной фазе 23-го цикла солнечной активности.

2. Основу КА составило крупное пятно, существовавшее на протяжении по крайней мере 4 солнечных оборотов, не смещаясь в кэррингтоновской системе координат. Пятно вращалось на первом обороте против, а затем по часовой стрелке со средней скоростью  $23^\circ/\text{ч}$ . На втором обороте вращение замедлилось ( $11^\circ/\text{ч}$ ), при этом тень вращалась в 1.5 раза быстрее полутени. Произошли формирование новой тени и отделение пятна от начального. В это период АО генерировала серию крупных вспышек.

3. Показано, что на третьем обороте к западу от КА возникла его новая ветвь, с некэррингтоновской скоростью вращения. Головное пятно АО новой ветви имело аномальную магнитную полярность и вращалось в противоположном направлении с той же скоростью, что и основное пятно старой ветви в этот период ( $14^\circ/\text{ч}$ ).

4. Предполагается, что КА сформировался на основе крупномасштабной конвективной ячейки с характерным размером порядка глубины конвективной зоны. Последнее обстоятельство привело к тому, что ячейка не смещалась в кэррингтоновской системе координат, обеспечивая стабильность положения основного пятна. Указанная ячейка способствовала формированию к западу на третьем обороте еще одной ячейки, породившей новую АО. Масштабы второй ячейки, судя по всему, были меньше (без контакта с дном конвективной зоны), что и позволило АО смещаться к западу на  $5^\circ$  за оборот под влиянием дифференциального вращения. Глубокая укорененность полей КА и отсутствие поблизости других АО обусловили высокую стабильность как основного пятна первой ячейки, так и всего КА в целом. Взаимодействие вращающихся долгоживущих разновозрастных систем петель магнитного поля обеспечило генерацию мощных вспышек в декабре. Редкий пример развития КА на фазе минимума цикла можно рассматривать как случай, удобный для анализа.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках проекта РНП.2.2.3.1.4833., а также при поддержке научной школы «Физика солнечных процессов и явлений и создание новых методов их изучения» НШ-4741.2006.2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишков В.Н. Обзор состояния солнечной активности, геоэффективных явлений и их воздействий на околоземное космическое пространство на период 06–12.11.2006 // [www.izmiran.ru](http://www.izmiran.ru)
2. Ишков В.Н. Ibid, 13–20.11.2006.
3. Ишков В.Н. Ibid, 11–17.12.2006.
4. Ишков В.Н. Ibid, 03–10.12.2006.
5. Макарова Е.А., Бочкарев Н.Г., Порфирьева Г.А., Делоне А.Б., Якунина Г.В. Вспышечно-продуктивные активные области – большие  $\delta$ -конфигурации // Труды ГАИШ. 2001. Т. 71. М. С. 107–120.
6. Ravindra B. Moving Magnetic Features In and Out of Penumbra Filaments // *Solar Phy.* 2006. V. 237, N 2. P. 97–319.

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

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