

ФЕНОМЕН КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

^{1,2}С.А. Язев, ^{1,2}В.И. Сидоров

PHENOMENON OF ACTIVITY COMPLEXES ON THE SUN

^{1,2}S.A. Yazev, ^{1,2}V.I. Sidorov

Обзорная лекция посвящена феномену комплексов активности (КА) на Солнце. Дается краткий очерк открытия и базовых этапов исследования КА, включая исследования КА в ИСЗФ. КА рассматриваются как долгоживущие крупномасштабные магнитные структуры на Солнце. В отличие от фоновых полей, основными элементами КА являются активные области, формирующиеся как последовательно, так и одновременно в пределах единой магнитной системы КА. Описана феноменология КА по наблюдениям в белом свете, хромосферных линиях, коротковолновом диапазоне, а также по магнитограммам. Приведены результаты исследования закономерностей пространственно-временного распределения КА по солнечной поверхности. На материалах 21–23 циклов солнечной активности отмечены северо-южная асимметрия и квазипериодический характер развития в КА в течение цикла солнечной активности. Описаны отличительные особенности КА на раннем, максимальном и завершающем этапах развития. Показано, что для КА характерен кэррингтоновский (недифференциальный) характер вращения, вплоть до завершающего (беспятенного) этапа эволюции КА, когда начинает наблюдаться дифференциальность вращения магнитных ячеек распадающегося КА. Описана морфология КА при наблюдениях в разных диапазонах спектра, предложена классификация основных типов КА. Отдельно рассмотрен вопрос о геоэффективности КА. Показано, что до 95 % всех наиболее мощных протонных вспышек происходит в КА. Приведены свидетельства генетической связи КА и корональных дыр.

This is a review on phenomenon of complexes of activity (CA) on the Sun. Discovery and basic stages of CA investigations including those carried out at ISTP are briefly discussed. CA are considered to be long-lived large-scale magnetic structures on the Sun. Unlike background fields, CA main elements are active regions formed both consecutively and simultaneously within the entire magnetic system of CA. The CA phenomenology is described using observations in the white light, chromospheric lines, short-wave range, and magnetograms as well. Results of research into regularities of CA space-time distribution over the solar surface are presented. The north-southern asymmetry and quasi-periodic character of development in CA during a solar cycle are noted based on data of the 21–23 solar cycles. CA features at the initial, maximal, and completion phases of evolution are presented. It is shown that CA are characterized by Carrington (non-differential) rotation character right up to the completion (spotless) phase of CA evolution, when differentiability of magnetic cells rotation of a decaying CA starts to be observed. The CA morphology when observing in different spectral bands is described; the classification of basic CA types is suggested. The question concerning CA geoeffectivity is considered in its own right. It is shown that up to 95 % of the most energetic proton flares take place in CA. Evidences are presented of the genetic relation of CA and coronal holes.

Введение

В 2009 г. будет отмечаться 400 лет с тех времен, когда пионеры телескопических наблюдений – Галилей, Фабрициус, Гарриот и Шейнер впервые навели на небо свои оптические приборы. Одним из важных открытий, сделанных на заре телескопической эры, было обнаружение темных пятен на Солнце и убедительное подтверждение того, что пятна – суть образования на самом Солнце, а не планеты, оказывающиеся на линии Солнце–Земля. Циклы наблюдений, начатые Галилеем и Шейнером, позволили выявить ряд существенных свойств солнечных пятен. В частности, было установлено, что, как правило, пятна не появляются по одному (было введено понятие группы пятен). Выяснилось, что группы существенно различаются по площади, конфигурации и числу отдельных пятен, при этом возможны быстрые и существенные изменения всех параметров группы. Статистика показала, что группы пятен – как правило, короткоживущие образования. Более половины всех наблюдаемых групп пятен существуют меньше двух дней, 90 % – меньше 11 суток [1]. Оказалось, что обычно пятна возникают не дальше 35–40° от экватора, при этом первые группы 11-летнего цикла солнечной активности (СА) возникают вблизи высокоширотной границы этой зоны. Последующие группы появляются все ближе к экватору (закон Шперера).

Четыре века назад обнаружен и на сегодняшний

день хорошо исследован эффект так называемого дифференциального вращения: полярные области Солнца вращаются со скоростью, примерно на 30 % меньшей, чем экваториальные. Это сказывается на вращении всех образований СА и, в частности, групп пятен. Все (точнее, почти все) активные образования на Солнце вращаются с разными скоростями, зависящими от их широты, а протяженные по широте образования деформируются со временем под действием ненулевого градиента угловой скорости для разных широт. Для удобства описания деталей солнечной поверхности введена прямоугольная система гелиографических координат. Эта система координат, предложенная в XIX в. Кэррингтоном, жестко вращается вместе с Солнцем со средней скоростью вращения пятен, соответствующей синодическому периоду 27.2753 сут. Соответствующая скорость характерна для широты около 15° и, согласно ныне существующим представлениям, равна скорости вращения Солнца на нижней границе конвективной зоны (около 200 тыс. км под фотосферой), где Солнце вращается уже как твердое тело. В данной системе координат долгоживущие высокоширотные структуры на поверхности дрейфуют к востоку, а низкоширотные – к западу.

Современные представления используют термин «группа пятен» нечасто, как правило, применяется более широкое понятие «активная область» (АО, [2]). АО включает в себя не только пятна, но весь

комплекс связанных с ними активных образований – факельное поле на фотосфере и флоккулы в хромосфере, зону возмущенной структуры хромосферы, охватывающую зону группы пятен, а также корональные структуры (системы магнитных петель), поднимающиеся высоко в корону. Давно известно, что именно в АО, за редкими исключениями, происходят солнечные вспышки. Физической основой АО является ее магнитное поле (МП), в ряде случаев обладающее очень сложной структурой.

Исследования распределения АО по гелиографической долготе показали, что ожидаемая равномерность такого распределения реализуется не всегда. Выявлено и подтверждено существование так называемых активных долгот (АД). Суть эффекта состоит в том, что при суммировании в кэррингтоновской системе координат долготного распределения какого-либо индекса, связанного с АО (например, площади групп пятен), в течение длительных промежутков времени (нескольких 11-летних циклов) можно выделить интервалы долгот, отличающиеся достоверным превышением значений данного индекса [3] по сравнению с соседними интервалами. Существование АД известно давно, но по-прежнему вызывает некоторое недоумение. Строго говоря, причина их существования остается неясной.

Одна из гипотез, развитая Л.Л. Кичатиновым и А.В. Мордвиновым [4], заключается в том, что в лучистом ядре Солнца существует некое реликтовое неосесимметричное магнитное поле. Взаимодействуя с осесимметричным полем, оно должно приводить к наблюдаемому явлению северной асимметрии СА и переменности высоты соседних солнечных циклов (правило Гневешева-Оля). Гипотеза выглядит перспективной, но не является общепризнанной (например, В.Н. Обридок [5] выдвинул ряд сомнений по этому поводу).

Таким образом, традиционно выделяются два основных уровня организации СА: АО как основной «кирпичик» СА и АД как долгоживущие долготные зоны преимущественного образования АО. Теперь, когда свойства указанных уровней кратко перечислены, можно перейти к описанию свойств третьего (промежуточного) уровня организации СА.

Упомянутый третий уровень был обнаружен исследователями достаточно давно (1960-е гг.), но долгое время ему не уделялось должного внимания и данные о нем не были систематизированы. Суть феномена состоит в том, что на одном и том же участке солнечной поверхности в кэррингтоновской системе координат длительное время (несколько солнечных оборотов) наблюдается непрерывное пятнообразование. При этом речь идет не об одной долгое время существующей АО: одни АО здесь исчезают, другие возникают, но в целом система долгоживущего МП существует значительно дольше типичного времени жизни отдельной АО. При этом входящие в такую систему последовательно и одновременно возникающие индивидуальные АО нельзя считать в полной мере независимыми: их локальные МП входят в единую систему их общего МП.

Такие образования (впрочем, первоначально выделенные по картам распределения МП, а не АО)

получили название комплексов активности (КА) [6]. Несмотря на то, что исследованию разных сторон феномена КА посвящено немало исследований, в целом данные о КА нельзя назвать систематизированными. Настоящая работа преследует именно такую цель – обобщить некоторые данные о КА на базе полученных, в том числе нами, результатов.

Структура КА

Рассмотрим структуру КА на примере хорошо изученного крупного КА, наблюдавшегося в мае 1981 г. (рис. 1).

Как правило, можно выделить так называемое «ядро» КА – область максимальной активности. Это одна или чаще несколько близкорасположенных АО. Отдельные АО могут возникать и исчезать, но ядро как область постоянного пятнообразования может существовать в течение нескольких оборотов. По аналогии с пятном Банин [7] предложил для ядра КА термин «тень КА». В хромосферных линиях тень КА выглядит как зона флоккулов, охватывающих пятна. В крыле водородной линии H α эта зона выглядит как сравнительно бесструктурная темная область, или темная площадка [8]. МП с напряженностью, характерной для пятен (тысячи гаусс) и флоккулов (сотни гаусс), направлено здесь преимущественно вертикально.

Тень КА окружена обширной «полутенью». При наблюдениях в центре линии H α – это зона фибрилл, или волоконце – внешняя вихревая структура АО. В случае КА она может охватывать кольцо сразу несколько групп пятен. При наблюдениях в крыле линии H α здесь видны трансформированные, вытянутые преимущественно радиально по отношению к ядру КА супергрануляционные хромосферные ячейки. Большие оси ячеек соответствуют направлению фибрилл и трассируют горизонтальную компоненту МП. МП с напряженностью сотни и десятки гаусс здесь направлено квазигоризонтально.

Анализ магнитограмм показывает, что в зоне ядра КА наблюдаются сильные МП, отличающиеся ячеистой структурой, порожденной, по-видимому, конвекцией, с характерным размером супергранулы. При этом внутренняя часть ячеек «заполнена» полем.

В отличие от ядра, в полутени КА наблюдаются магнитные ячейки, где повышенная концентрация поля (десятки гаусс) наблюдается только на их границах. Внутренние части ячеек отличаются пониженной напряженностью поля, сравнимой с невозмущенной хромосферой. На границах ячеек видны узелки МП, в хромосферных линиях они проявляются как отдельные яркие узелки хромосферной сетки. Ширина полутени КА, где преобладают горизонтальные поля и видны мощные квазирадialные «потoki» фибрилл среди отдельных узелков поля, составляет в случае развитых КА 100–200 тысяч километров и сопоставима с характерными размерами ядер КА.

При наблюдениях в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах над КА видна сложная система высоких разноуровневых арок, соединяющих отдельные элементы ядра КА между собой. Наблюдаются

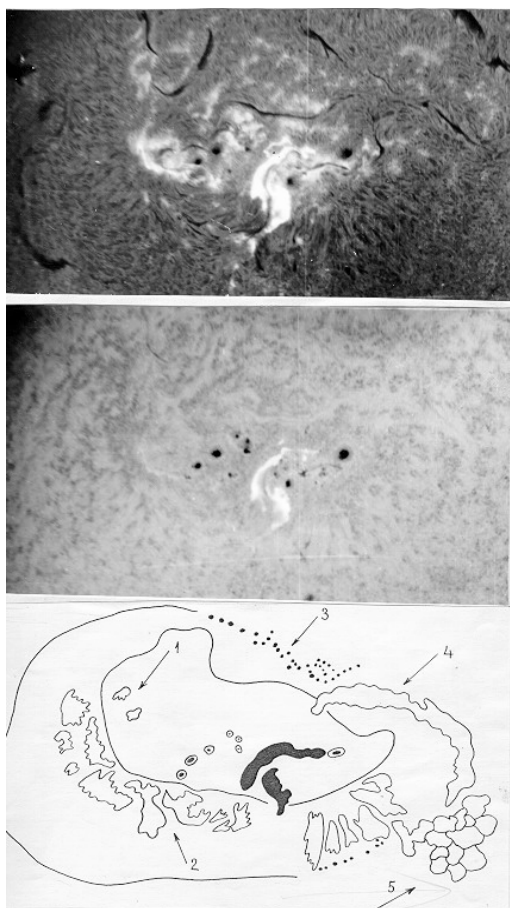


Рис. 1. Вид КА в мае 1981 г. в линии $H\alpha$. *a* – центр линии; *b* – красное крыло линии ($H\alpha+0.05$ нм); *в* – схематическая зарисовка структур по (*b*). Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН.

также арки, соединяющие элементы ядра с элементами полутени КА и даже с областями далекой периферии КА и за его пределами. Есть свидетельства тому, что некоторые арки пересекают солнечный экватор, соединяя КА с областями в другом полушарии. В большинстве случаев петли, выходя из области ядра КА, замыкаются на узелки МП на границах супергранул.

Полутень, или периферийная зона КА, не видна при фотосферных наблюдениях групп пятен, поэтому внешнюю границу и общие размеры КА по фотосферным данным определить невозможно. Пятна КА можно сравнить с выступающей над водой вершиной айсберга. Для изучения всего айсберга (его подводной части) требуются наблюдения в разных диапазонах спектра, включая, в первую очередь, коротковолновые внеатмосферные, а также магнитографические данные.

Анализ КА в 21–23 циклах показал, что в ряде случаев наблюдается эффект так называемых «ветвей» КА. Речь идет о том, что вблизи КА иногда возникают одна или несколько АО за пределами полутени КА или на ее границе, существуя, в отличие от АО в ядре КА, всего в течение 1–2 оборотов. Последнее обстоятельство не позволяет отнести эти области к разряду ядер КА. Тем не менее, связь ветви КА с основным КА несомненна: наблюдения в рентгеновском и УФ-диапазоне показывают, что области КА и ветви КА связаны высокими коро-

нальными петлями. Наблюдения в хромосферных линиях свидетельствуют о том, что со временем и КА, и его новая ветвь охватываются широким кольцом возмущенной хромосферы, состоящим из фибрилл, соединяющих узелки усиленной хромосферной сетки. Такое кольцо образует новую односвязную полутьню системы «основная часть КА – ветвь КА».

Вращение КА и метод площадок длительной активности

Идентификация КА (в смысле установления его отличий от индивидуальных АО) сопряжена с рядом трудностей. На стадии максимума цикла, когда на Солнце одновременно развиваются многие АО, трудно провести границу между ними – пояс возмущенной структуры тянется вдоль всего круга широты, и тогда можно рассматривать весь этот пояс как специфическое образование – один сверхгигантский КА [9].

Кроме того, преимущественно крупные группы пятен, которые обычно входят в состав КА, сами отличаются повышенной продолжительностью жизни. Поэтому всегда есть риск назвать долгоживущую группу пятен комплексом активности и допустить смешение понятий. Популяция крупных групп пятен всегда привлекала особый интерес исследователей, и сотни работ посвящены их статистике, эволюции и морфологии. Тем не менее, прямо применять эти результаты к КА нельзя, поскольку КА и АО – неидентичные образования.

В [10, 11] был использован следующий подход. Ядра КА обладают важным свойством: они не смещаются в кэррингтоновской системе координат. Тогда выделение в этой системе координат областей на поверхности Солнца, где пятна наблюдаются как минимум три оборота подряд, позволяет отождествить ядра КА. Такой подход, названный методом площадок длительной активности (ПДА), позволяет легко выделять ядра (тени) КА, элиминируя стохастическую компоненту (многочисленные короткоживущие АО). Показано [10, 11], что ПДА идентичны ядрам КА.

Поскольку более 99 % всех групп пятен существует меньше трех солнечных оборотов, долгоживущая структура с зоной постоянного пятнообразования должна гарантированно включать в себя несколько, а не одну долгоживущую АО. В тех немногочисленных случаях, когда индивидуальная АО все-таки существует в течение трех и более солнечных оборотов (в 23 цикле отмечен один такой случай), неизбежно наблюдаются вторичные выходы новых потоков МП (новых АО) рядом с долгоживущей АО. Это позволяет идентифицировать подобные структуры как КА. Размер участков для изучения исследуемого признака был выбран равным 20×20 гелиографических градусов – это типичный размер ядра небольшого (элементарного) КА, включающего в данный момент времени одну АО.

Описанная методика применена для анализа последовательности синоптических карт пятненной активности Солнца за период с 1980–2007 г. (кэррингтоновские обороты 1690–2061). Тем самым, проанализированы 21 цикл солнечной активности начиная

со стадии его максимума, а также 22 и 23 циклы полностью.

В результате составлен каталог ядер КА за указанный период. Следует подчеркнуть, что речь идет о каталоге именно ядер КА, а не самих КА: помимо элементарных, существуют и многоядерные комплексы активности [10, 11], где в топологически односвязной возмущенной структуре развиваются два, три или четыре ядра КА, связанных в единую магнитную систему. Количество ядер КА по полушариям в разных циклах СА приведено в таблице 1.

Таблица 1
Ядра КА в циклах солнечной активности

Цикл	Северное полушарие	Южное полушарие	Всего	Комментарий
21	31	52	83	Данные, начиная с середины цикла
22	52	52	104	
23	69	77	146	

Наблюдения показали, что ядра КА существенно различаются между собой, при этом они изменяются со временем. Отмечены, в частности, примеры, когда пятенная активность в ядре КА выражена в виде одной–двух групп малых пятен без полутеней общей площадью в несколько десятков миллионных долей полусферы (м.д.п.). В то же время отмечались и гигантские группы пятен, не умещавшиеся в стандартный размер $20 \times 20^\circ$ (площадь пятен достигала 2600 м.д.п.). В связи с этим встала необходимость введения специального индекса, описывающего различия в степени запятненности ядра КА.

Такой индекс был введен Баниным и Язевым [10]. Первоначально была предложена трехуровневая классификация ядер КА: балл 1 – малая запятненность, балл 2 – средняя (умеренная) и балл 3 – высокая. Баллы определялись визуально по изображениям групп пятен на синоптической карте либо на оригинальных снимках фотосферы Солнца. Позже были введены промежуточные баллы (0.5, 1.5, 2.5). Краткий перечень результатов изучения ядер КА методом ПДА приводится в следующем разделе.

Основные свойства ядер КА

1. Изменение суммарной мощности ядер КА в течение цикла СА в первом приближении повторяет ход чисел Вольфа, однако есть и существенные отличия. И для 22, и для 23 циклов на стадии максимума по числам Вольфа отмечен заметный спад суммарной мощности ядер КА продолжительностью 3–5 оборотов. Предположительно, указанный спад связан с глобальной перестройкой МП на Солнце в этот период.

2. Преобладают короткоживущие ядра КА (продолжительность существования 3–4 оборота, рис. 2). Тем не менее, немало и долгоживущих структур (5–8 оборотов). В 23 цикле отмечено даже ядро КА, существовавшее 17 солнечных оборотов (1.5 года).

3. На первом и втором оборотах существования ядер КА в них сразу наблюдаются сравнительно крупные АО [12]. По данным 22 цикла, только 21 %

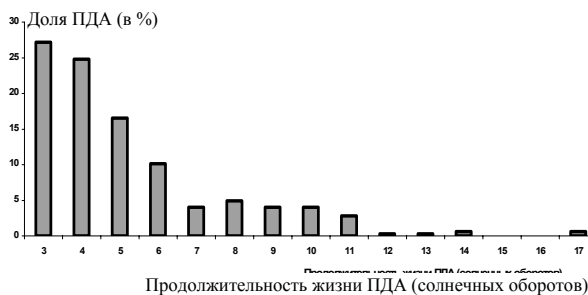


Рис. 2. Распределение ядер КА по продолжительности жизни (327 структур в 21–23 циклах СА).

ПДА представляли собой на первом обороте жизни одиночную группу пятен. Как правило, во время первого прохождения по диску в ядре КА наблюдались две группы (35 случаев), 3 группы (23 % случаев), 4 группы (17 % случаев) и даже 5 групп (4 % случаев). На втором обороте жизни КА одиночных групп в ПДА было еще меньше (17 % случаев). Наиболее характерной была ситуация с образованием в ядре КА трех, двух и четырех групп пятен (25, 21 и 20 % случаев соответственно). В отдельных КА число АО на втором обороте варьировало от 3 до 10.

4. Исследование распределения ядер КА по долготам отдельно по полушариям позволяет выделить существенную неравномерность. Во-первых, обнаруживается своеобразный эффект дополнителности: максимумы распределения в одном полушарии совпадают по долготам с минимумами в другом, что указывает на отсутствие независимости процессов генерации КА в разных полушариях. Во-вторых, в отдельных случаях ядра КА имеют свойство располагаться близко друг от друга, образуя своеобразные тесные концентрации КА [13]. В таблице 2 приведен перечень концентраций ядер КА, наблюдавшихся на Солнце, начиная с середины 21 цикла. Анализ показал, что концентрации представляют собой системы многоядерных КА. Концентрации дают основной вклад в долготное распределение КА. При этом, как видно из таблицы 2, концентрации ядер КА в разное время наблюдаются на разных долготам. После исчезновения концентрации на ее месте долго (10–20 солнечных оборотов) не возникают новые ядра КА. В результате, суммарное долготное распределение КА дает максимум в том диапазоне долгот, где концентрация КА находилась на стадии максимума цикла (когда общая мощность ядер КА была максимальной). Хотя в течение цикла концентрации наблюдаются в разное время во всех долготных интервалах, их мощности различаются, будучи модулированными общим ходом цикла активности. Это обстоятельство приводит к возникновению кажущегося эффекта АД КА. Максимум долготного распределения за один цикл оказывается там, где наблюдались концентрации КА во время фазы максимума цикла. Кроме того, эффект дополнителности приводит к возникновению максимумов распределения на разных долготных интервалах для разных полушарий, в результате суммарное распределение может оказаться достаточно сложным.

5. Исследования показали, что практически все крупные вспышки на Солнце происходят именно в ядрах КА [13]. Для популяции мощных протонных

Концентрации ядер КА в 1980–2006 гг.

Цикл	№ ядра КА	Долготный интервал, град.	Временной Интервал	Число ядер КА	Протяженность по долготе, град.	Продолжительность жизни (в оборотах)
21	NI	140–260	1690?–1709	7	120	20?
	NIИ	260–50	1695–1728	13	150	34
	SI	240–360	1707–1750	16	120	44
	SII	90–200	1717–1740	9	110	24
22	NI	80–220	1801–1818	6	140	18
	NIИ	275–50	1817–1838	8	135	22
	NIИИ	100–190	1821–1840	5	90	20
	SI	45–160	1801–1822	7	116	22
	SII	140–260	1818–1869	10	120	52
	SIIИ	270–40	1821–1869	13	130	49
23	NI	280–360	1947–1972	7	80	26
	NIИ	0–100	1959–1986	8	100	27
	NIИИ	130–240	1970–1990	8	110	21
	NIИИИ	260–360	1980–2003	8	100	24
	SI	100–180	1948–1967	6	80	20
	SII	260–340	1958–1987	10	120	30
	SIIИ	80–250	1972–2008	19	170	31

событий из списка [14] начиная с 1980 г. в 21 цикле 91 % [13], в 22 цикле 86 % [15], в 23 цикле 94 % таких событий, отождествленных с конкретными АО, произошли в ядрах КА (как правило, в наиболее крупной АО в ядре КА).

На рис. 3 показана зависимость частоты возникновения таких вспышек от продолжительности жизни генерирующего вспышку ядра КА. Большинство мощных вспышек возникает на первых трех оборотах жизни, что закладывает основу для долговременного прогноза мощных вспышек в КА.

6. В [16–18] показана связь КА и корональных дыр (КД). В ряде случаев КД возникает непосредственно на месте распавшегося КА. В других случаях, КД вплотную примыкает к ядру КА, либо охватывает его полукольцом, что свидетельствует о физической связи между этими типами структур.



Рис. 3. Зависимость числа мощных вспышек от типа (длительности жизни) ядер КА.

Связь в указанном смысле прослежена для всех КА, наблюдавшихся в 22 цикле [18]. В результате можно констатировать, что КА относятся к разряду наиболее геоэффективных структур на Солнце, поскольку именно здесь происходят мощные солнечные вспышки. Потоки высокоскоростного солнечного ветра формируются в низкоширотных КД, также генетически связанных с КА.

Строение КА

Кэррингтоновская скорость вращения КА позволяла предполагать, что КА связаны с системами МП, укорененными на жестко вращающемся дне конвективной зоны [19]. Современные данные гелиосейсмологии указывают, что пятна могут считаться относительно поверхностными образованиями, и связанные с ними неоднородности, по-видимому, не простираются столь глубоко. Отсюда можно сделать вывод, что качественные модели «магнитных деревьев», предлагавшиеся Пиддингтоном [19] для объяснения всех типов фотосферных МП, скорее всего, должны быть признаны неприменимыми.

Для объяснения феномена КА нужно учитывать следующие важные свойства последних, в частности, долговременное существование (вплоть до 17 солнечных оборотов), т. е. последовательное всплытие новых магнитных потоков новых АО практически в одном и том же месте – внутри ядра КА. Кроме того, необходимо объяснить кэррингтоновскую скорость вращения КА и их неподверженность дифференциальному вращению на стадии развития пятен в ядрах. После исчезновения пятен наблюдается быстрая (обычная) деформация структуры распадающегося МП КА дифференциальным вращением.

Может быть предложена следующая качественная модель строения КА. Типичный КА формируется предположительно на основе крупномасштабной конвективной ячейки, простирающейся от фотосферы до дна конвективной зоны (рис. 4, ср. с рис. 1). Этим обстоятельством обеспечивается кэррингтоновский (а в общем случае, недифференциальный) характер вращения КА. На рисунке стрелками обозначено направление циркуляции вещества в крупномасштабной конвективной ячейке. Толстыми стрелками показано место ускоренного всплывания плазмы, вращательная составляющая (несомненно, существующая) для упрощения картины не показана. Увлекаемое потоками вещества, вмороженное в плазму магнитное поле концентрируется вблизи «дна» ячейки в ее центре. Здесь сила магнитной плавучести ускоряет всплывание петель МП. В результате на фотосферном уровне и выше в ячейке формируется КА, обычно включающий в себя несколько активных областей, которые последовательно и одновременно формируются в центральной зоне ячейки на всем протяжении ее длительного (несколько солнечных оборотов) существования.

Можно выделить две области ячейки (см. рис. 4): центральная зона, где на фотосферном уровне наблюдается квазивертикальное поле со значительной непотенциальной составляющей, и периферийная зона ячейки со слабыми, преимущественно горизонтальными полями. Центральной зоне ячейки соответствует тень КА, периферийной зоне – полутень. В пределах центральной зоны в местах наибольшей концентрации поля (в пятнах) оно, тем не менее, носит потенциальный характер.

Поле тени КА (исключая пятна) содержит множество последовательно и одновременно всплывающих петель со значительной непотенциальной составляющей поля, обусловленной близкими значениями плотности энергии магнитного поля и плотности энергии движений плазмы. На большей части площади тени КА (вне пятен) часть энергии конвективных движений трансформируется в непотенциальную энергию магнитного поля.

При выходе поля тени КА в корону происходит накопление энергии в корональных петлях и последующее ее высвобождение в серии мощных солнечных событий. Вспышечное высвобождение энергичных частиц вдоль линий магнитного поля из короны в хромосферу во время вспышек проявляется только на тех участках хромосферы, через которые непотенциальная энергия МП ранее вышла в корону. Этим можно объяснить известный факт, что в большинстве случаев вспышечная эмиссия не распространяется на локальные области теней пятен, где поле в основном потенциально.

В периферийной зоне ячейки (полутени КА) поле на фотосферном уровне значительно слабее поля тени КА. Здесь вещество вдоль квазигоризонтальных магнитных трубок (фибрилл и нитей

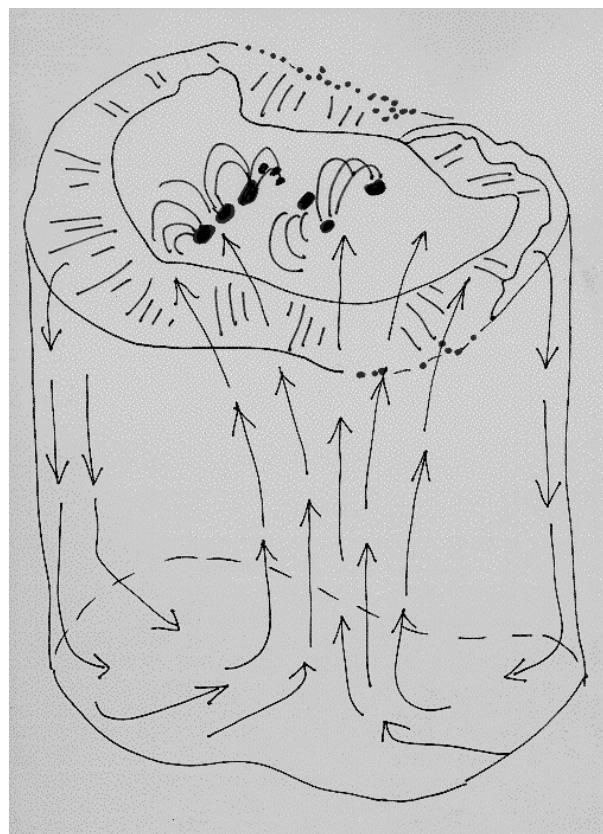


Рис. 4. Модель КА на основе крупномасштабной долгоживущей конвективной ячейки.

в хромосфере) перемещается к внешней границе ячейки, чтобы затем погружаться в недра конвективной зоны. Комплексы активности могут рассматриваться как основная, базовая компонента солнечной активности, обладающая наибольшим геоэффективным потенциалом. Именно здесь возникают наиболее крупные вспышечноактивные АО, с которыми связаны источники высокоскоростного солнечного ветра – низкоширотные КД. Для ряда случаев удалось доказать, что мощные вспышки в КА тесно связаны с выбросами корональной массы [20]. Выявленные закономерности генерации мощных вспышек в КА позволяют конструировать алгоритмы заблаговременного прогноза таких событий и рассматривать КА как объект дальнейших актуальных исследований.

Авторы благодарны Л.Л. Кичатинову, В.В. Пипину и А.В. Гетлингу за полезные обсуждения вопроса о природе КА. 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. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 296 с.
2. Степанян Н.Н. Рождение активных областей. Возникновение и эволюция активных областей на Солнце. М.: Наука, 1976. С. 3–14.
3. Витинский Ю.И. Солнечная активность. М.: Наука,

Глав. ред. физ.-мат. лит., 1983. 192 с.

4. Кичатинов Л.Л., Мордвинов А.В. Активные долготы и северо-южная асимметрия активности Солнца как проявления реликтового магнитного поля // АЖ. 2004. Т. 81, № 3. С. 281–288.

5. Бадалян О.Г., Обридо В.Н., Рыбак Я., Сикора Ю. Северо-южная асимметрия солнечной активности и ее квазидвухлетние вариации // АЖ. 2005. Т. 82, № 8. С. 74–752.

6. Bumba V, Howard R. A study of development of active regions on the Sun // Ap. J. 1965. V. 141, N. 4. P. 1493–1501.

7. Банин В.Г. Комплекс активности и большие солнечные вспышки в мае 1981 г. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1983. Вып. 65. С. 129–150.

8. Корниенко Г.И. Сравнительное изучение активной области по фильтрограммам в центре и симметричных крыльях $\Delta\lambda=\pm 0.5 \text{ \AA}$ линии $\text{H}\alpha$ // Солнечные данные. 1977. № 2. С. 84–90.

9. Gaizauskas V., Harvey K.L., Harvey J.W., Zwaan C. Large-scale patterns formed by active solar regions during the ascending phase of cycle 21 // Ap. J. 1983. V. 265. P. 1056–1065.

10. Саттаров И.С. О развитии комплексов активности на Солнце // Солнечные данные. 1989. № 5. С. 93–100.

11. Язев С.А. О развитии трех комплексов активности на Солнце в 1989 году // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1991. Вып. 95. С. 152–165.

12. Язев С.А., Рожина А.И. К вопросу о ранней идентификации комплексов активности на Солнце // Труды IV съезда Астрономического общества. М.: 1998. С. 287–291.

13. Банин В.Г., Язев С.А., Некоторые характеристики пространственно-временного распределения площадок долгоживущей активности на ветви спада 21 цикла // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1989. Вып. 87. С. 100–113.

14. ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SAT_ENVIRONMENT/PARTICLES/p_events.lst

15. Язев С.А. Геоэффективность комплексов активности и долготный фактор / Конференция, посвященная памяти М.Н. Гневыхова и А.И. Оля «Современные проблемы солнечной активности». Труды. СПб, 1997. С. 247–251.

16. Банин В.Г., Язев С.А. Комплексы активности и корональные дыры // Солнечные данные. 1991. № 1. С. 78–83.

17. Язев С.А. Корональные дыры и площадки длительной активности на фазе роста 22 цикла солнечной активности / Избранные проблемы астрономии. Материалы научно-практической конференции «Небо и Земля». Иркутск: ИГУ, 2006. С. 231–240.

18. Язев С.А. О связи корональных дыр и комплексов активности / Там же. С. 241–246.

19. Пиддингтон Дж. Солнечные магнитные поля и конвекция. Обзор теории первичного поля. Проблемы солнечной активности. М.: Мир, 1979. С. 173–202.

20. Сидоров В.И., Язев С.А. О топологии солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 г. / Избранные проблемы астрономии. Материалы научно-практической конференции «Небо и Земля». Иркутск: ИГУ, 2006. С. 216–224.

¹Астрономическая обсерватория ИГУ, Иркутск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск