



УДК 523.98

Комплексы активности на Солнце в 1980–2008 гг. Комментарии к каталогу данных

С. А. Язев (uustar@star.isu.ru)

Аннотация. В работе представлен каталог ядер (зон постоянного пятнообразования) комплексов активности на Солнце, наблюдавшихся в 1980–2008 гг., составленный по наблюдениям в Байкальской и Саянской обсерваториях ИСЗФ СО РАН. Комплексы активности рассматриваются как проявления солнечной активности, которые отличаются наибольшей геоэффективностью. Дано описание типов данных, приведенных в каталоге, и обоснование использованных индексов.

Ключевые слова: комплексы активности, солнечная активность, индексы.

Введение

Проблема воздействия проявлений солнечной активности на земные процессы стоит перед научным сообществом давно. За два последних столетия выполнено гигантское количество исследований, показывающих, что сам факт воздействия, несомненно, существует (см., например, монографию Владимирского и Темуриянц, подводящую итоги работам по этому направлению, выполненным в XX в. [6]). Активно анализируются возможные физические механизмы, способные отвечать за передачу возмущений от Солнца к геосферам [12].

Как правило, основные проявления солнечной активности связывают с феноменом солнечных пятен, впервые описанных в ходе первых телескопических наблюдений 400 лет назад [3].

Современные представления используют термин «группа пятен» нечасто, как правило, применяется более широкое понятие «активная область» (далее АО, [15]). АО включает в себя не только пятна, но и целый комплекс активных образований, с ними связанных – факелы на уровне фотосферы и флоккулы в хромосфере, пояс возмущенной тонкой структуры хромосферы, охватывающей зону группы пятен, а также корональные структуры (системы магнитных петель), поднимающиеся высоко в корону. Известно, что именно в АО (за редкими исключениями – см. [7]), происходят солнечные вспышки. Физической основой АО является ее магнитное поле (далее 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 (далее АД). Суть эффекта состоит в том, что при суммирова-

нии в кэррингтоновской системе координат долготного распределения какого-либо индекса, связанного с АО (например, площади групп пятен) в течение длительных промежутков времени (несколько 11-летних циклов), можно выделить интервалы долгот, отличающиеся достоверным превышением значений данного индекса [4] по сравнению с соседними интервалами. АД известны давно, но факт их существования по-прежнему вызывает некоторое недоумение. Строго говоря, причина их образования окончательно не известна, несмотря на то, что по этому поводу выдвинут ряд гипотез (например, [9]).

Таким образом, традиционно выделяются два основных уровня организации солнечной активности: АО, как основной «кирпичик» СА, и АД, как долгоживущие долготные зоны преимущественного образования АО. К ним следует добавить третий, промежуточный уровень организации солнечной активности. Упомянутый уровень был обнаружен исследователями в 1960-е гг., но долгое время данные о нем не были систематизированы. Суть феномена состоит в том, что на одном и том же участке солнечной поверхности в кэррингтоновой системе координат длительное время (несколько солнечных оборотов) наблюдается непрерывное пятнообразование. Такой участок может быть назван ядром комплекса активности (далее КА). Речь идет не об эволюции одной АО, существующей долгое время. В ядре КА одни АО исчезают, другие возникают, но в целом общая для них система долгоживущего магнитного поля (далее МП) существует значительно дольше типичного времени жизни отдельной АО. Надо заметить, что масштабы МП КА существенно превышают габариты ядра КА. 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 поля – МП КА.

Такие образования (первоначально выделенные по картам распределения крупномасштабного МП Солнца, а не АО) получили название комплексов активности [19]. На уровне хромосферы (в свете линии Н-альфа) хорошо видна их внешняя граница, представляющая собой кольцевой пояс из фибрилл, охватывающий зону ядра КА. КА хорошо просматриваются на изображениях, полученных в свете линии кальция Са II, двумерных изображениях Солнца в радиодиапазоне.

Основной парадигмой на протяжении многих десятилетий являлась концепция, связывающая именно активные области на Солнце с источниками геоэффективных агентов – прежде всего потоками энергичных протонов и всплесками коротковолнового излучения. Оба типа указанных агентов порождаются солнечными вспышками, которые в подавляющем большинстве действительно происходят именно в АО. Редкие исключения беспятенных вспышек, тем не менее, позволяют связать их с магнитными полями разрушающихся активных областей на стадии исчезновения пятен, и таким образом, снова связать с АО [7].

В то же время ход дальнейших исследований показал, что геоэффективные факторы не обязательно могут быть связаны с активными областями. В частности, влияющие на земные оболочки высокоскоростные по-

токи солнечного ветра истекают из корональных дыр – крупномасштабных образований с открытой магнитной конфигурацией (для активных областей характерны замкнутые магнитные структуры). Обнаруженные с помощью внеатмосферных коронографов корональные транзиенты, или выбросы коронального вещества (ВКВ), оказались лишь отчасти связанными с активными областями и мощными вспышками в них. Есть множество примеров, когда ВКВ наблюдаются и в отсутствие АО, и локализация мест их генерации на поверхности Солнца оказывается неоднозначной. Указанные обстоятельства указывают на то, что фактор активных областей не является единственным при генерации геоэффективных агентов на Солнце.

Более обоснованной представляется концепция, в соответствии с которой не АО, а КА могут рассматриваться в качестве основных источников геоэффективных возмущений.

Привлекает внимание то обстоятельство, что подавляющее большинство наиболее мощных протонных вспышек происходит именно в КА [19]. При этом основные элементы вспышки, естественно, наблюдаются в одной из АО, входящих в состав КА. В то же время в ходе крупных вспышек вспышечные явления отмечаются на больших расстояниях от вспышечной АО, – возмущения тонкой структуры хромосферы, уярчения узлов хромосферной сетки и т. д. наблюдаются в пределах всего КА и даже за его пределами, иногда в другом полушарии (через экватор). В этом смысле можно рассматривать вспышку как продукт всего КА, охваченного вспышечными активизациями. Может быть выдвинута гипотеза, что система магнитных полей КА оказывает воздействие на локальные поля индивидуальных АО, входящих в КА, определяя в конечном итоге и локализацию, и конкретные свойства происходящих здесь вспышек. Возможно, именно этот фактор приводит к относительному росту характерной мощности вспышек в АО, входящих в состав КА по сравнению с индивидуальными АО, развивающимися независимо. Есть основания полагать, что без учета удаленных вспышечных активизаций не удастся построить адекватную модель вспышки [22]. Выдвинутая около 35 лет назад классическая гипотеза о том, что возмущения и пересоединения в сложной крупномасштабной системе разноуровневых корональных петель над КА (см., например, [8]) определяют высокую мощность вспышек в КА, подтверждается многочисленными фактами наблюдений. Кроме того, удастся показать, что, по крайней мере, некоторые типы выбросов коронального вещества также связаны с активными процессами в КА [14].

На поздней стадии эволюции КА, когда магнитные поля входивших в него активных областей начинают деградировать, формируя простые по структуре крупномасштабные униполярные магнитные ячейки, на их основе могут возникнуть низкоширотные корональные дыры [10]. Физическая (генетическая) связь КА и корональных дыр показана в работе [1]. С этой точки зрения, истекающие из корональных дыр высокоскоростные потоки солнечного ветра также можно связывать с КА, находящимися на завершающей стадии эволюции.

Таким образом, идентификация и мониторинг комплексов активности, а также их комплексное изучение представляется важной задачей, имеющей как фундаментальное (в контексте исследования феномена солнечной активности в широком смысле), так и прикладное (в контексте изучения параметров и последствий геоэффективных явлений и процессов на Солнце, а также их прогноза).

Идентификация комплексов активности, в смысле установления их отличий от индивидуальных активных областей, сопряжена с рядом трудностей. На фазе 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 [20]. Соответствующий термин был введен в [13].

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

Методика ПДА для описания ядер комплексов активности

В работах [2; 16; 17] был использован следующий подход. Зоны постоянного пятнообразования внутри КА, для которых предложен термин ядра КА, обладают важным свойством: они не смещаются в эррингтоновой системе координат. Тогда, благодаря выделению на поверхности Солнца в этой системе координат областей, где пятна наблюдаются как минимум три оборота подряд, ядра КА отождествляются однозначно. Такой подход, названный методом площадок длительной активности (далее ПДА), позволяет уверенно идентифицировать ядра КА, элиминируя стохастическую компоненту (многочисленные короткоживущие АО). В упомянутых выше работах показано, что ПДА идентичны ядрам КА.

Поскольку более 99 % всех групп пятен существует меньше трех солнечных оборотов [5], долгоживущая структура, включающая в себя зону постоянного пятнообразования, должна гарантированно включать в себя несколько, а не одну долгоживущую АО. В тех немногочисленных случаях, когда индивидуальная АО все-таки существует три и более солнечных оборотов (в 23-м цикле отмечен один такой случай [21]), неизбежно наблюдаются вторичные выходы новых потоков магнитного поля (новых АО) рядом с долгоживущей АО, либо даже внутри нее. Это позволяет формально идентифицировать подобные структуры как КА. Размер квадратных участков для изучения исследуемого признака был избран 20×20 гелиографических градусов: это типичный размер ядра небольшого (элементарного, или одноядерного) КА.

Каталог ядер комплексов активности

Описанная методика применена для анализа последовательности синоптических карт пятенной активности Солнца за период с 1980 по 2008 г. (кэррингтоновские обороты, начиная с 1690 по 2091). Эти карты (общим числом 400 штук) были построены на базе анализа наблюдений солнечных пятен в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и зарисовок солнечных пятен, выполнявшихся в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН. На рубеже веков, в связи с прекращением этих наблюдений, основа для карт изменилась: карты периода 1999–2008 гг., строились на базе выставлявшихся в сети «интернет» изображений солнечных пятен, полученных космическим аппаратом SOHO. Начиная с 2008 г., по инициативе автора развернуты штатные наблюдения фотосферы Солнца на астрономической обсерватории ИГУ [11], которые были использованы (и будут использоваться) для продолжения многолетнего мониторинга комплексов активности.

В результате проанализированы 21-й цикл солнечной активности, начиная со стадии его максимума, а также 22-й и 23-й циклы полностью. Одним из итогов этой работы стал каталог ядер КА за указанный период. Следует особо подчеркнуть, что речь идет о каталоге именно ядер КА, а не самих КА: помимо одноядерных, существуют и многоядерные комплексы активности [2; 16; 17], где в топологически односвязной возмущенной структуре развиваются два, три, или четыре ядра КА, связанных в единую магнитную систему [17].

Наблюдения показали, что ядра КА существенно различаются между собой, при этом они изменяются со временем. Отмечены, например, противоположные примеры. В отдельных случаях пятенная активность в ядре КА была выражена в виде одной-двух невыразительных групп малых пятен без полутеней (пор) общей площадью в несколько десятков миллионов долей полусферы (далее м. д. п.). С другой стороны, имеются примеры, когда в ядрах КА развивались гигантские группы пятен, не вмещавшиеся в стандартный размер 20×20 градусов (общая площадь пятен в группе достигала 2600 м. д. п.). В связи с этим встала необходимость введения специального индекса, описывающего различия в степени «запятненности» ядра КА и позволяющего быстро оценивать основные параметры КА.

Такой индекс (мощность ПДА) был введен Баниным и Язевым [2]. Первоначально была предложена трехуровневая классификация ядер КА: балл 1 – малая, балл 2 – средняя (умеренная) и балл 3 – высокая запятненность. Баллы определялись визуально по изображениям групп пятен на синоптической карте либо на оригинальных снимках фотосферы Солнца. Однако практика показала, что классификация может быть более подробной. Были введены промежуточные баллы (0,5; 1,5; 2,5 [19]) Окончательная классификация ядер КА с помощью индекса мощности ПДА приведена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация степени запятненности (мощности) площадок длительной активности (ядер КА)

Баллы	Описание пятен в ядре КА	Аналог цюрихской классификации групп пятен
0,5	Группа пор либо две малые группы пор без биполярной структуры	A, B либо A + A
1	Одна группа пятен, в которой есть пятно с полутенью, либо три группы пор	C либо A + A + A либо B + B
1,5	Группа пятен с двумя и более пятнами с полутеньями, либо с одним крупным пятном, или две небольшие группы	C + (A или B) или E или C + C или J или H
2	Крупная группа пятен с большим числом пятен и пор, в том числе с большими пятнами, либо две группы пятен	E + (B или C) или G + (B или C)
2,5	Большая группа пятен (площадь > 1000 м. д. п.), протяженность больше 20 градусов, либо две крупные группы пятен	F с размерами > 20 градусов или E + D
3	Экстремально крупная группа (площадь > 2000 м. д. п.) либо крупная группа с сателлитными группами пятен рядом с ней	F > 20 градусов

Подход при оценке мощности ядра КА отличается от оценок класса групп пятен, выполненных в соответствии с цюрихской классификацией. Во-первых, шкала мощности ядер КА не носит эволюционного характера. Ее функция – грубо оценить, какими пятнами (по числу и площади) заполнен на данном обороте рассматриваемый участок 20 на 20 гелиографических градусов (площадка длительной активности, или ПДА). Здесь могут оказаться одновременно до четырех групп пятен различных цюрихских классов. При этом крупные группы пятен на том или ином обороте могут не помещаться в пределах формально заданного квадрата, ограничивающего положение ядра КА. Тем не менее, согласно принятому алгоритму, они приписываются данной ПДА.

Оценка балла ядра КА производится по изображениям пятен на синоптических картах. Следует заметить, что это достаточно грубая оценка. На протяжении одного солнечного оборота (точнее, времени нахождения ядра КА на видимом полушарии Солнца) параметры пятен в ядре КА могут существенно измениться вплоть до исчезновения пятен, оценка же мощности ядра КА (степени запятненности соответствующей площадки длительной активности) делается только один раз, отражая уровень максимального развития на данном обороте. Тем не менее, в ядрах КА преобладают крупные и долгоживущие группы пятен, относительно медленно эволюционирующие. Поэтому оценка класса мощности ядра КА оказывается достаточно адекватной. Во всяком случае, различия между соседними классами выделяются уверенно, и оценка мощности ядра КА – например, наблюдается там на данном обороте крупная группа с большими пятнами, либо две группы мелких пятен – дается вполне адекватно. Подчеркнем

еще раз, что оценка балла мощности ядра КА, согласно описываемой методике, присваивается указанному ядру один раз на каждом кэррингтоновском обороте и имеет смысл некой усредненной характеристики ПДА (ядра КА) для данного оборота.

Каталог содержит следующие данные. Здесь указан порядковый номер ядра КА (нумерация ведется отдельно для каждого цикла и для каждого полушария, северного и южного). Поскольку ядро КА условно представлено в виде площадки 20×20 гелиографических градусов, положение которой на синоптических картах определяется, исходя из критерия максимальной «заполненности» пятнами на протяжении всего периода существования данного ядра КА (по сути, критерий близок методу наименьших квадратов), в качестве координат ядра в каталоге указаны кэррингтоновы долгота и широта центра такой квадратной площадки.

Для каждого кэррингтоновского оборота в каталоге указано значение индекса мощности рассматриваемого ядра КА по описанной выше шестибальной шкале. При быстрых изменениях пятен в пределах ядра выбиралось значение индекса, соответствующее максимальному уровню развития пятен на данном обороте.

Отдельный столбец указывает, сколько кэррингтоновых оборотов существовало данное ядро КА. Следует также отметить, что продолжительность жизни ядра КА оценивается только по продолжительности существования здесь пятен. В большинстве случаев, на следующем кэррингтоновом обороте на месте бывшего ядра КА остается факельное поле, а на магнитограммах видны старые, постепенно упрощающиеся магнитные поля. Напряженности МП здесь уже недостаточно, чтобы формировались пятна, но активность в виде факелов может существовать еще достаточно долго (1–4 оборотов). Есть основания полагать, что на внепятенной стадии эволюции КА, здесь может некоторое время сохраняться общая топология МП КА, происходить вспышки [7] и возможно, генерироваться выбросы коронального вещества. При формировании на базе расширяющихся магнитных полей униполярных магнитных ячеек, эволюция может привести к образованию корональной дыры. Таким образом, общая продолжительность жизни КА может существенно превышать продолжительность стадии развития пятен в КА, отмеченную (с точностью до одного кэррингтонова оборота) в каталоге.

Предусмотрен отдельный столбец для комментариев (здесь, например, указаны наиболее крупные вспышки, происходившие на данном обороте в ядре КА, особенности структуры ядра КА и т. д.). Каталог ядер КА в 1980–2008 гг. приведен на сайте http://ru.iszf.irk.ru/Каталог_ядер_комплексов_активности.

Общее количество ядер КА, описанных в каталоге, указано в табл. 2.

Заключение

Каталог ядер КА может использоваться для сопоставления с другими типами проявлений солнечной активности, геоэффективными событиями, происходившими на Солнце. Использование индексов ПДА для описания ядер КА позволяет применять методы статистики для выделения свойств КА, их зависимости от фазы цикла активности и долговременных трендов.

Таблица 2

Ядра КА в циклах солнечной активности

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

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках проекта РНП.2.2.3.1/198, гранта РФФИ 09-02-90204 Монг_а, Программы Президиума РАН № 4 и Госконтракта 02.740.11.0576.

Список литературы

1. Банин В. Г. Комплексы активности и корональные дыры / В. Г. Банин, С. А. Язев // Солнечные данные. – 1991. – № 1. – С. 78–83.
2. Банин В. Г. Некоторые характеристики пространственно-временного распределения площадок долгоживущей активности на ветви спада 21 цикла / В. Г. Банин, С. А. Язев // Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – М. : Наука, 1989. – Вып. 87. – С. 100–113.
3. Брей Р. Солнечные пятна / Р. Брей, Р. Лоухед. – М. : Мир, 1967. – 383 с.
4. Витинский Ю. И. Солнечная активность / Ю. И. Витинский. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 192 с.
5. Витинский Ю. И. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца / Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин. – М. : Наука. Гл. изд. физ.-мат. лит., 1986. – 296 с.
6. Владимирский Б. М. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. Гелиобиология от А. Л. Чижевского до наших дней / Б. М. Владимирский, Н. А. Темуриянц. – М. : Изд-во МНЭПУ, 2000. – 374 с.
7. Жукова О. В. Вспышки вне пятен в 22 цикле солнечной активности / О. В. Жукова, С. А. Язев // Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 2001. – Вып. 113. – С. 136–140.
8. Ишков В. Н. Эволюция и вспышечная активность активной области ММ 15403-1978 / В. Н. Ишков, З. Б. Коробова, Э. И. Могилевский // Физика солнечной активности. – М. : Наука, 1980. – С. 48–55.
9. Кичатинов Л. Л. Активные долготы и северо-южная асимметрия активности Солнца как проявления реликтового магнитного поля / Л. Л. Кичатинов, А. В. Мордвинов // Астроном. журн. – 2004. – Т. 81, № 3. – С. 281–288.
10. Коваленко В. А. Солнечный ветер / В. А. Коваленко. – М. : Наука, 1983. – 272 с.
11. Наблюдения фотосферы на солнечном телескопе астрономической обсерватории ИГУ / В. В. Капленко, С. И. Расчетин, С. А. Язев, Д. В. Ерофеев // Солнечно-земная физика. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – Вып. 12 (125), т. 1. – С. 76.
12. Плазменная гелиодинамика : в 2 т. / под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. – М. : Физматлит, 2008. – 672 с.
13. Саттаров И. С. О развитии комплексов активности на Солнце // Солнечные данные. – 1989. – № 5. – С. 93–100.
14. Сидоров В. И. Топологическая модель солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 года / В. И. Сидоров, С. А. Язев // Косм. исследования. – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 1–7.

15. *Степанян Н. Н.* Рождение активных областей // Возникновение и эволюция активных областей на Солнце. – М. : Наука, 1976. – С. 3–14.
16. *Язев С. А.* К вопросу о ранней идентификации комплексов активности на Солнце / С. А. Язев, А. И. Рожина // Труды IV съезда астрономического общества. – М. : Современ. писатель, 1998. – С. 287–291.
17. *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.
18. *Язев С. А.* Феномен комплексов активности на Солнце / С. А. Язев, В. И. Сидоров // Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы : тр. X конф. мол. уч. – Иркутск : ИО ИСЗФ СО РАН, 2007. – С. 65–71.
19. *Bumba V.* A study of development of active regions on the Sun / V. Bumba, R. Howard // *Astrophys. J.* – 1965. – Vol. 141, N 4. – P. 1493–1501.
20. Large-scale patterns formed by active solar regions during the ascending phase of cycle 21 / V. Gaizauskas, K. L. Harvey, J. W. Harvey, C. Zwaan // *Ap. J.* – 1983. – Vol. 265. – P. 1056–1065.
21. *Savinkin M. Yu.* Unique complex of Activity between 2006 and 2007 / M. Yu. Savinkin, V. I. Sidorov, S. A. Yazev // *Geomagnetism and aeronomy.* – 2009. – Vol. 49, N 8. – P. 1072–1075.
22. *Sidorov V. I.* Large Solar Flares and Coronal Mass Ejections: Their Manifestations in Chromosphere / V. I. Sidorov, S. A. Yazev // *Geomagnetism and aeronomy.* – 2009. – Vol. 49, N 8. – P. 1076–1079.

The complexes of activity on the Sun in 1980–2008. Comments to data catalog

S. A. Yazev

Abstract. The catalog of cores of complexes of activity on the Sun (zones of constant sunspot formation) observed in 1980–2008 in Baikal and Sayan Observatories of ISTF SD RAS is presented. Complexes of activity on the Sun should be considered as the main type of structures generating geoeffective disturbances influencing the earth's shells. The description of presented data types and ground of indexes used are given.

Key words: complexes of activity, solar activity, indexes.

Язев Сергей Артурович
кандидат физико-математических наук
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
директор астрономической обсерватории
доцент
Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
старший научный сотрудник
тел.: (3952) 27-12-94