

УДК 523.98

ГЛОБАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2013 г. В. Н. Обридко*, Б. Д. Шельтинг

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Троицк Московской обл., Россия*

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.; принята в печать 04.04.2013 г.

Излагается новая концепция глобальных комплексов активности на Солнце, заключающаяся в объединении в рамках единого понятия объектов глобальных и локальных полей. Отмечается, что традиционно в течение многих лет комплексы активности определялись только на основе наблюдений активных областей. Показано, что глобальный комплекс включает в себя корональные дыры и активные области. Для анализа использовался большой набор данных наблюдений магнитного поля разных пространственных масштабов, наблюдения активных областей и магнитных полей аппаратурой SOHO MDI, наблюдения корональных дыр в ультрафиолетовом диапазоне. Показана общность эволюции корональных дыр и активных областей в едином комплексе. Обсуждается проблема связи полей разных масштабов в процессе генерации цикла.

DOI: 10.7868/S0004629913100046

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема комплексов солнечной активности имеет довольно длинную историю. Она восходит скорее всего к работе Гневывшева [1], в которой он убедительно доказал, что в вариации солнечной активности кроме 11-летнего цикла существуют и короткие периоды общего увеличения активности, которые он назвал “импульсами активности”.

Гневывшев в 1938 г. имел крайне ограниченную информацию об основных индексах солнечной активности. Это были данные о числе пятен, их площади, флоккулах и факелах, протуберанцах. Как легко видеть, это все индексы локальных магнитных полей. Он естественно ничего не мог знать о характеристиках глобальных полей — солнечном ветре и корональных дырах. При этом он интуитивно почувствовал и привел, собственно без доказательств, следующее важное утверждение: “физически связанные солнечные процессы необязательно должны происходить одновременно”. С другой стороны, Гневывшев в своем исследовании не уделял особого внимания продолжительности существования этого усиления активности, что и отразилось во введенном им термине. В дальнейшем эти результаты были изложены им в монографии [2].

Следующий важный шаг был сделан, когда появились данные измерений на магнитографе Маунт-Вилсон, покрывающие всю поверхность Солнца. Тогда стало ясно, что более точным

является термин “комплексы солнечной активности”, характеризующий длительное, от нескольких месяцев до нескольких лет увеличение солнечной активности в определенном диапазоне долгот. Х.У. Бэбкок и Х.Д. Бэбкок [3] впервые изучили распределение магнитных полей вне групп солнечных пятен. Их данные соответствовали периоду минимума солнечной активности 1952–1954 гг. Кроме доказательства существования полярного магнитного поля, они показали, что в низких широтах существуют две системы магнитных полей: биполярные магнитные области (БМО), соответствующие активным областям, и униполярные магнитные области (УМО), представляющие собой обширные участки одной и той же полярности магнитного поля.

Работа Бэбкоков была продолжена Бумбой и Ховардом [4, 5]. Они проанализировали данные наблюдений на магнитографе Маунт-Вилсон за 4.5 года с августа 1959 г. до конца 1962 г. и дополнительно с июня 1963 г. по июнь 1964 г. Они показали, что развитие комплекса происходит следующим образом. В течение нескольких оборотов в некотором диапазоне долгот не наблюдается никакой новой активности, только диффузные поля старых областей. Затем в этом месте возникает одна или несколько новых активных областей, и они постепенно расширяются как по широте, так и по долготе. Оказалось, что первая возникшая группа обычно является наибольшей в комплексе. При этом большие комплексы имеют большее время жизни, и им соответствуют группы больших размеров.

*E-mail: obridko@izmiran.ru

Для дальнейшего очень важно, что в этих работах уже было по существу сформулировано утверждение, что в понятие комплекса активности должны включаться не только активные области, но и униполярные магнитные области, что и приводит к необходимости включать сюда и корональные дыры и ввести понятие глобального комплекса активности. Цель настоящей работы восстановить понятие глобального комплекса активности, который объединяет объекты как локальных, так и глобальных полей.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Глобальный комплекс солнечной активности следует изучать по большой совокупности данных, включающих характеристики не только локальных, но и глобальных полей, информацию о фотосферных, хромосферных и корональных процессах и даже гелиосферные и геомагнитные возмущения. Разумеется, это довольно сложное понятие, требующее сбора большой информации за длительный промежуток времени.

Отчасти поэтому понятие комплекса активности несколько девальвировалось, и в последнее время оно часто заменяется понятием “комплекс активных областей” (или даже “комплекс групп пятен”), где уже не требуется иметь весь набор данных и, самое главное, не предполагается его длительное существование. Так, в работах Ишкова и Могилевского [6], Обридко [7], Могилевского и Шиловой [8] авторы определяют “комплекс активных областей” как совокупность двух или более активных областей, связанных совместным (общим) магнитным полем, в эволюции которых выявляется связь и взаимодействие компонентов или отдельных частей комплекса.

Дополнительная сложность в анализе глобальных комплексов активности состоит еще в том, что здесь приходится учитывать сложное взаимодействие полей разных пространственных масштабов, имеющих сильно различающиеся значения напряженности. Крупномасштабные поля несомненно связаны с глобальным магнитным полем [9–12], и, по-видимому, их эволюция определяется процессами глубоко под фотосферой, возможно в основании конвективной зоны. С другой стороны, структура комплекса, несомненно, сильно зависит от эволюции мощных полей активных областей, представляющих собой неглубокие образования (глубина 5–10 Мм).

Неясна также генетическая связь составляющих комплекса. С одной стороны, крупномасштабные поля, по-видимому, являются строительным материалом для полей активных областей и усиливаются подповерхностными течениями. С другой стороны, слабые магнитные поля, остающиеся после распада активных областей, также образуют

протяженные области, сливающиеся с первичным крупномасштабным полем.

Крупномасштабное магнитное поле обычно связано с областями открытого магнитного поля (ОOMP), т.е. поля, силовые линии которого уходят непосредственно в межпланетную среду и связаны с солнечным ветром. Эти области приводят к возникновению корональных дыр. Ванг и др. [13] отождествили корональные дыры с ОOMP. В дальнейшем эти термины употреблялись как два равнозначных понятия для корональных дыр, наблюдаемых в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах на диске и на лимбе. Разумеется, это совпадение только статистическое. Области открытого магнитного поля вычисляются сложным путем с большим количеством дополнительных предположений в рамках концепции потенциального поля с поверхностью источника. В образовании корональных дыр, кроме структуры магнитного поля, играет роль еще и соотношение различных механизмов нагрева короны, которое может быть несколько различным в разных корональных дырах.

Принято также переоценивать степень однополярности корональных дыр на уровне фотосферы. На самом деле, в любой корональной дыре существуют вкрапления разной полярности. Однако при изучении крупномасштабного поля эти неоднородности нивелируются. Недавно Обридко и Шельтинг [14] проанализировали 338 корональных дыр, распределенных по всем фазам 23-го солнечного цикла. Для всех корональных дыр выполнены расчеты индекса униполярности IU, определенно-го как отношение абсолютной величины среднего радиального магнитного поля B_R к его средней абсолютной величине:

$$IU = \langle |B_R| \rangle / \langle |B_R| \rangle.$$

Очевидно, что для строго униполярного поля $IU = 1.0$, в то время как в мультиполярной области эта величина приближается к нулю. Оказалось, что на высоте $1.1R_\odot$ (где R_\odot — радиус Солнца) 281 корональных дыр (т.е. 83%) имели IU в диапазоне 0.9–1.0. Это согласуется с ранее полученным результатом, согласно которому уже на высоте $1.05R_\odot$ корональная дыра становится преимущественно униполярным образованием [15].

В работе Обридко и Шельтинг [14] для 18 корональных дыр, также распределенных по всем фазам 23-го цикла, изучена внутренняя структура корональных дыр в полосе 28.4 нм. Оказалось, что корональная дыра состоит из более темной и менее темной части. Наиболее темная часть имеет яркость меньше 25% средней яркости диска в данном году. Ее окружает менее темная часть, в которой яркость ниже 50% среднегодовой яркости в этой длине волны. Наиболее темная часть корональной

дыры соответствует области максимального магнитного поля, при этом силовые линии образуют слабо расходящийся пучок с наклоном не более 20° . Вне наиболее темной части корональной дыры силовые линии могут более значительно отклоняться от нормали. Эта схема в целом аналогична той, которая была предложена Вангом и др. [16] для объяснения радионаблюдений корональных дыр и подтверждена позднее в работах Могилевского и др. [17] и Обридко [18].

Следует заметить, что если связь ООМП с корональными дырами вполне понятна и употребление этих терминов как равнозначных физически обосновано, то другое сопоставление, которое делается часто, вовсе не так очевидно. Часто большие квазиуниполярные области отождествляют с ООМП и оценивают границы корональных просто как границы квазиуниполярных областей. В таком сопоставлении физической основы нет. Большие квазиуниполярные области могут быть просто остатками активных областей, и поле в них является поверхностным, а силовые линии замыкаются внутри этой же области. Они не образуют ООМП, и индекс униполярности в них значительно отклоняется от единицы. Это отличие следует иметь в виду при дальнейших сопоставлениях.

3. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АКТИВНОСТИ

Крупномасштабное магнитное поле ООМП, корональные дыры и активные области в процессе эволюции образуют единый комплекс со следующими свойствами. Области, внутри которых магнитное поле в хромосфере и нижней короне отклоняется от радиального направления меньше, чем на 20° , приводят к возникновению оптических и рентгеновских корональных дыр. При этом, несмотря на физическую идентичность этих двух объектов, возможно некоторое несовпадение границ и запаздывание появления корональных дыр относительно появления ООМП.

Через 2–3 оборота после появления корональных дыр их форма и размеры начинают меняться под воздействием активных областей, расположенных между сопряженными корональными дырами. В результате в трансверсальном поле на уровне фотосферы вблизи границ корональных дыр возникает конфигурация типа “седла”.

За пределами фотометрической корональной дыры векторы магнитного поля сходятся к сопряженным активным областям, образуя единый комплекс активности. При этом данный эффект особенно хорошо выражен для мощных активных областей. Эту связь мощных активных областей с корональными дырами отмечали Макинтош [19] и Бумба и др. [20]. Она существует несмотря на

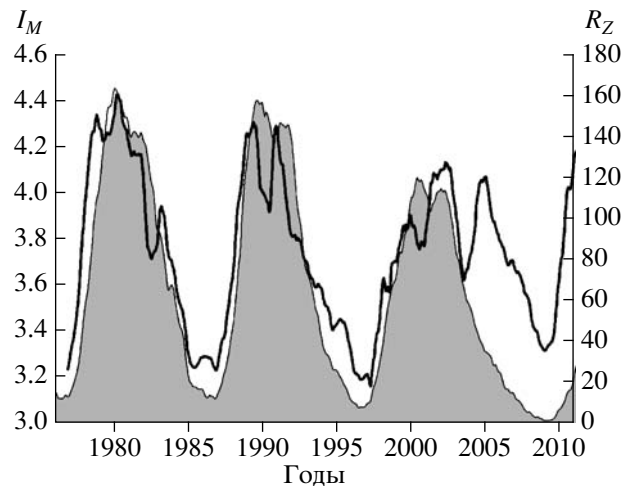


Рис. 1. Индексы R_Z (кривая, ограничивающая затухающую область; шкала на правой оси ординат) и I_M (жирная кривая; шкала на левой оси ординат) в 21–23-м циклах.

то, что источник крупномасштабного магнитного поля располагается глубоко в основании конвективной зоны [21], а пятна в активных областях представляются сегодня гораздо менее глубокими образованиями.

Время жизни корональных дыр, составляющее от 2–3 оборотов до 1.5 лет, превышает время жизни связанных с ними активных областей. При ослаблении или исчезновении активных областей соответственно меняются и корональные дыры.

4. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа были выбраны два характерных периода в 23-м цикле: первый период — с октября 1999 г. по март 2001 г. (кэррингтоновские обороты 1954–1974), второй период — с декабря 2002 г. по декабрь 2003 г. (кэррингтоновские обороты 1997–2010). Эти периоды отобраны по следующим соображениям. Первый период полностью перекрывает календарную дату максимума 23-го цикла (март 2000 г.) и весь период реперолюсовки полярного поля. Второй период характеризуется специфической устойчивой структурой квазиэкваториального диполя, которая часто возникает на фазе спада солнечного цикла.

На рис. 1 показан график числа солнечных пятен R_Z и индекса эффективного солнечного мультиполя I_M . Этот индекс был введен нами в работе [22] и позднее подробно описан в [23]. Заметим, что в последней работе для него использовалось другое обозначение (ESMI). Этот индекс характеризует собой соотношение крупномасштабных и мелкомасштабных полей. Когда на

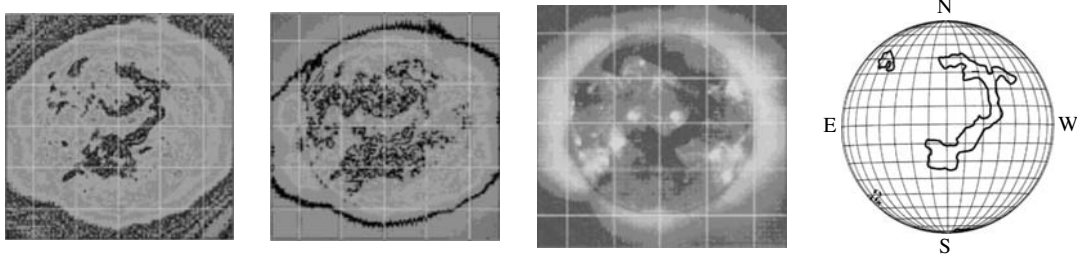


Рис. 2. Изображения одной и той же корональной дыры, наблюдавшейся в центре диска Солнца 29–30 мая 2000 г., в длинах волн 171, 195, 284 и 1083 нм (последовательно слева направо).

Солнце преобладают глобальные поля с характерными пространственными масштабами, сравнимыми с радиусом Солнца, индекс I_M приближается к дипольному значению 3, когда преобладают поля более мелкого масштаба — в максимумах циклов — он приближается к 5.

Изученные периоды сильно различаются с точки зрения структуры крупномасштабного поля. Первый период соответствует максимуму цикла и времени вскоре после переполюсовки полярного поля. Структура поля в это время все еще не совсем устойчива, и характерное время ее изменения составляет порядка 2–3 оборотов. Индекс I_M достигает максимума, что свидетельствует об относительно низких характерных пространственных масштабах поля на уровне фотосферы. Во втором периоде мы видим совершенно другую структуру. Двухсекторная структура сохраняется на протяжении всего периода в течение 14 оборотов. Такую структуру можно описать экваториальным диполем, ось которого располагается вблизи экватора. По синоптическим картам можно заметить слабое смещение всей структуры на 30° – 40° к западу, что указывает на то, что экваториальный диполь вращается быстрее, чем поверхностные слои. Период этого вращения близок к значению 27 дней, соответствующему твердотельному вращению, и он меньше, чем классический кэррингтоновский период 27.2753 дня. Это приводит к повышенной рекуррентности солнечных и солнечнообусловленных геофизических событий, что часто происходит в первой половине фазы спада.

Проблема сопоставления положения корональных дыр с положением на диске активных областей имеет определенные трудности. Дело в том, что априори не ясно, что считать границей корональной дыры даже при наблюдении в одной и той же длине волны. Этот вопрос подробно изучался в ряде работ [14, 24, 25] для характеристики корональных дыр, наблюдаемых в длине волны 284 нм. Ситуация еще более усложняется при сопоставлении наблюдений в различных длинах волн.

На рис. 2 показаны 4 изображения одной и той же корональной дыры, наблюдавшейся

в центре диска Солнца 29–30 мая 2000 г., последовательно слева направо в длинах волн 171, 195, 284 и 1083 нм. Первые 3 изображения получены по данным SOHO EIT и взяты с сайта <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>. Изображение в 1083 нм взято из бюллетеня “Solar Geophysical Data”. Видно, что, несмотря на общее сходство, в деталях эти изображения резко различаются. Это и понятно, поскольку излучение в данных длинах волн определяется совершенно различными температурами. В связи с этим в качестве основы были взяты расчеты ООМП. Для нахождения положения и структуры ООМП была использована стандартная методика, описанная ранее Обридко и Шельтинг [26, 27]. Использовались данные наблюдений фотосферного магнитного поля на обсерватории Джона Вилкокса (<http://wso.stanford.edu/>). По этим данным методом наименьших квадратов в предположении потенциальности вычислялись сначала коэффициенты разложения по полиномам Лежандра, а затем и все компоненты магнитного поля в сферическом слое от фотосферы до поверхности источника. Расчеты велись для поверхности источника на расстоянии $2.5R_\odot$ от центра Солнца. Учитывались первые 10 гармоник разложения. Затем из узлов равномерной сетки на поверхности источника, где по определению все силовые линии открыты, они отслеживались вниз, и фиксировалось их прохождение через избранную сферическую поверхность. В настоящей работе в интересах сопоставления с активными областями в качестве такой поверхности была избрана поверхность фотосферы. Такая методика обрисовывает ООМП и, как показано в ряде работ (см., например, [14]), в целом довольно хорошо согласуется с наблюдениями корональных дыр в линии $\lambda 284$ нм.

Вычисленные таким образом положение и форма ООМП далее сравнивались с данными о фотосферных активных областях и магнитном поле по наблюдениям SOHO MDI (<http://soi.stanford.edu/>

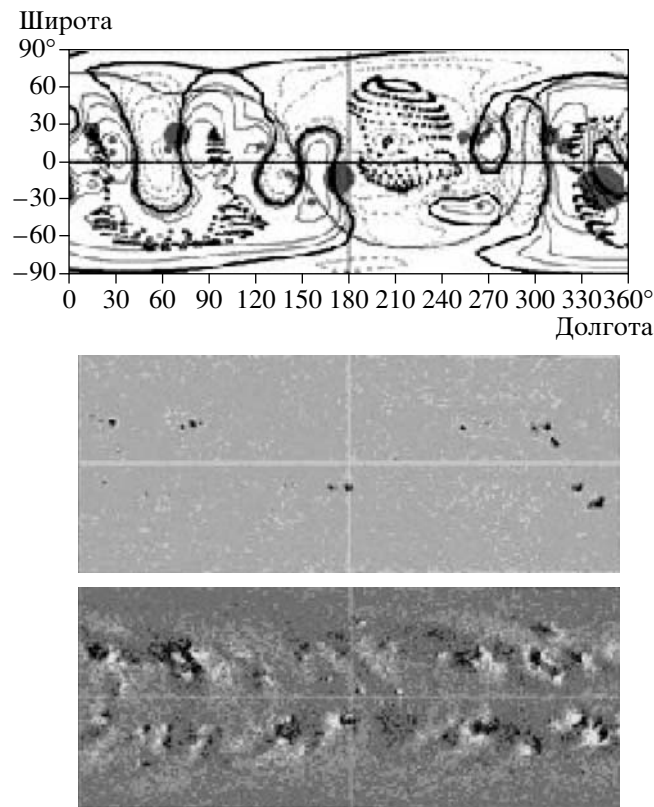


Рис. 3. Пример данных для кэррингтоновского оборота 1963 (2000.05.16–2000.06.13). На верхней карте показана расчетная структура магнитного поля на уровне фотосферы. Штриховыми линиями показаны изолинии отрицательного радиального магнитного поля, тонкими сплошными линиями — положительного, жирные линии показывают нейтральные линии радиального магнитного поля на уровне фотосферы и поверхности источника, большими кружками показаны положения групп пятен согласно “Solar Geophysical Data”, размер кружка приблизительно пропорционален площади группы. На средней и нижней картах показаны активные области и магнитные поля по данным SOHO MDI.

magnetic/index5.html и <http://soi.stanford.edu/magnetic/index6.html>).

Пример такого сравнения дан на рис. 3 для кэррингтоновского оборота 1963 (2000.05.16–2000.06.13). На верхней карте показана расчетная структура магнитного поля на уровне фотосферы. Штриховыми линиями показаны изолинии отрицательного радиального магнитного поля, тонкими сплошными линиями — положительного радиального магнитного поля, жирные линии показывают нейтральные линии радиального магнитного поля на уровне фотосферы и поверхности источника, большими кружками показаны положения групп пятен по “Solar Geophysical Data” (размер кружка приблизительно пропорционален площади группы). Учитывались активные области с площадью более 100 м.д.п.

На второй и третьей картах показаны активные области и магнитные поля по данным SOHO MDI.

Следует заметить, что на верхней карте ось ординат соответствует гелиографической широте, а на двух нижних — синусу широты.

В течение большей части первого периода крупномасштабная структура была устойчивой и в целом соответствовала структуре поля в период переполусовки. На минимуме и на фазе роста 23-го цикла поле на северном полюсе было положительное. В рассматриваемый период области одинакового знака поля охватывают весь диск. Это особенно сильно выражено в оборотах 1958–1959 (январь–февраль 2000 г.). Затем постепенно положительное поле начинает преобладать на южном полюсе, а отрицательное — на северном. Этот процесс занимает около года, и только в оборотах 1973–1974 разделение полей устанавливается и в экваториальной области. Это означает, что так называемый “тилт” (tilt, искривление гелиосферного токового слоя) опускается до величин около 20° . В целом же структура достаточно простая и устойчивая, и в большинстве периодов она соответствует простой двухсекторной структуре. Второй период полностью соответствует устойчивой двухсекторной структуре.

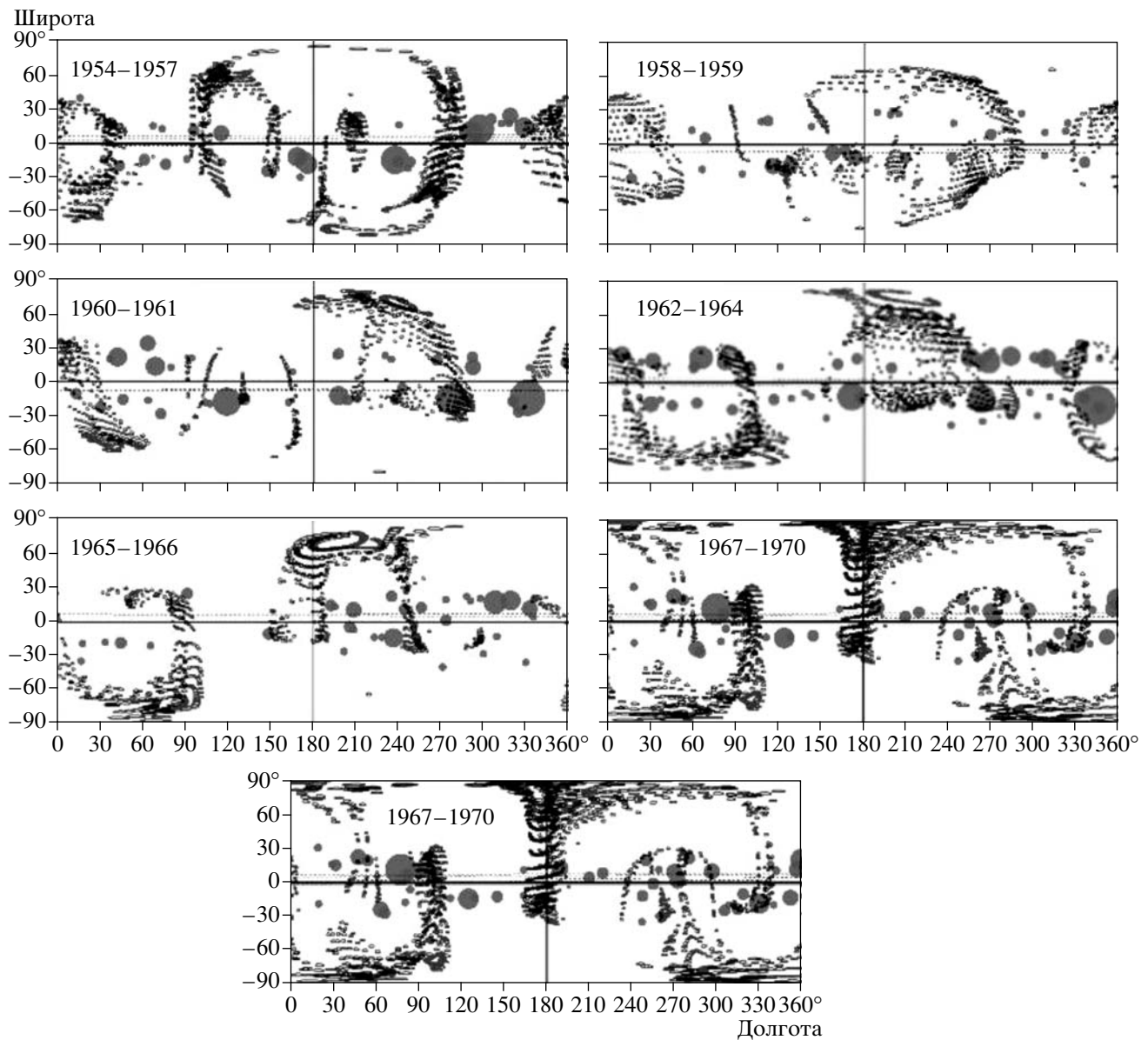


Рис. 4. Синоптические карты ООМП в кэррингтоновских оборотах 1954–1974 (первый интервал анализа). Меленькими кружками показаны основания открытых силовых линий, большими кружками — группы пятен. Размер кружков примерно пропорционален площади группы.

5. ЭВОЛЮЦИЯ КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ

Опишем теперь несколько подробнее вариацию открытых силовых линий в каждый из этих двух периодов.

Несмотря на относительную простоту поля на поверхности источника в первом периоде, структура оснований открытых силовых линий была довольно непростой и испытывала значительные изменения. На рис. 4 показаны синоптические карты ООМП, причем для сокращения изложения они

сгруппированы в 7 периодов, в течение которых структура была относительно устойчивой и подобной. В начальном периоде (обороты 1954–1957) наблюдается шесть ООМП, которые объединены в два гигантских комплекса. В центре карты на долготах 120° – 270° (комплекс 1, К1) наблюдаются довольно мощные компактные области, связанные между собой и с полярными зонами. На долготах 330° – 30° наблюдается еще одна ООМП, менее протяженная и более рыхлая (комплекс 2, К2). Вблизи ООМП наблюдаются активные области,

причем наиболее крупные из них лежат непосредственно на границе центральной ООМП.

В оборотах 1958–1960 ООМП становятся значительно более рыхлыми, и они выражены довольно слабо. С полярной зоной связь полностью исчезает. Одновременно с этим понижается и уровень солнечной активности. Несмотря на то, что активных областей довольно много, сильных среди них нет.

В следующем периоде (обороты 1960–1961) конфигурация начинает меняться. Первый комплекс становится более узким и концентрированным. Его центр тяжести смещается к диапазону долгот 210° – 270° . Кроме того, в диапазоне 60° – 120° наблюдаются мелкие струи ООМП. Они представляют собой остатки первого комплекса, но в то же время являются зародышами нового усиления ООМП и К2. Они смещаются на запад, что хорошо видно в следующей группе оборотов. Большинство крупных активных областей располагается вблизи ООМП.

При этом второй комплекс остается на прежнем месте, но его центр тяжести смещается к долготам 30° – 60° . Особенно расширяется и усиливается К2 с 1960-го оборота, в нем сразу появляется много активных областей. В дальнейшем К2 сохраняется, почти не меняясь, до конца рассматриваемого нами интервала. Увеличение количества активных областей, резко произошедшее в 1960-м обороте, разделило огромный К2 на две одинаковые части, а между ними вклинилась униполярная область другого (отрицательного) знака. При этом корональная дыра в этом месте не возникла.

В К1 восточная часть с течением времени ослабляется и почти исчезает, а правая (западная) сильно расширяется с 1958-го оборота и остается такой в течение 8 кэррингтоновских оборотов (1958–1964), достигая размеров по долготе 150° . Возникающие на периферии активные области, особенно сильные, уменьшают на время их существования размеры ООМП. Очень большое количество активных областей на всей территории К1 (особенно в его западной части) в 1965-м обороте привело к полному изменению этого комплекса, при этом осталась только его левая (восточная) часть (1967–1970), но зато она, очень плотная на большом интервале по широте (-40° – $+90^{\circ}$; она соединилась с полярной корональной дырой), долго существовала (до 1970-го оборота).

В течение последних 4 оборотов (1971–1974) ООМП становятся изолированными, маленькими по площади, они то всплывают, то исчезают, и их связь с активными областями менее заметна.

Далее ООМП в приэкваториальной зоне постепенно ослабляются, и к концу периода в экваториальной зоне их почти нет.

В течение второго периода (обороты 1997–2010) уровень активности был значительно ниже как в отношении числа корональных дыр, так и по числам Вольфа. Структура крупномасштабного поля была чрезвычайно устойчивой и мало менялась в течение всего периода. Поэтому этот период мы опишем более кратко.

В это время наблюдались два больших комплекса (комплекс 3 (К3) и комплекс 4 (К4)), соответствующих элементам секторной структуры. Эти комплексы почти не менялись в течение всех 14 кэррингтоновских оборотов.

К3 соответствует отрицательному сектору глобального поля. В нем наблюдаются две ООМП, соединяющиеся с полюсом. Общая площадь, занятая открытыми силовыми линиями, несколько возрастает в середине периода. Активных областей немного, они небольшие, и их появление и исчезновение не сказываются на характере комплекса. Большие активные области появились в двух последних оборотах (2009, 2010), но на общую структуру комплекса они почти не повлияли.

К4 соответствует положительному сектору глобального поля. Он состоит из 2–3 небольших ООМП, окруженных на уровне фотосферы униполярной областью сложной формы, в основном, положительного знака, в которой наблюдаются иногда малые отрицательные вкрапления. Мощные активные области в 2003-м, 2004-м оборотах также не повлияли значительно на структуру комплекса. В конце интервала кэррингтоновских оборотов 2007–2010 в К4 практически нет активных областей.

6. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОБЩЕЙ ПЛОЩАДИ ООМП И ЧИСЛА ГРУПП ПЯТЕН В КОМПЛЕКСЕ

Для анализа совместной эволюции активных областей и ООМП внутри комплекса активности проведем анализ эволюции площади ООМП и числа групп пятен.

Для оценки площади ООМП из узлов равномерной сетки на поверхности источника, где по определению все силовые линии открыты, силовые линии отслеживались вниз, и фиксировалось их основание на уровне фотосферы. Такая методика обрисовывает ООМП и, как показано в ряде работ (см., например, [14]), в целом довольно хорошо согласуется с наблюдениями корональных дыр. Число силовых линий, вышедших из сетки с равномерным распределением узлов (72×30) на поверхности источника и сконцентрировавшихся в данной ООМП, может служить мерой площади данной ООМП.

На рис. 5 показан временной ход площади обоих комплексов первого периода (слева) и второго

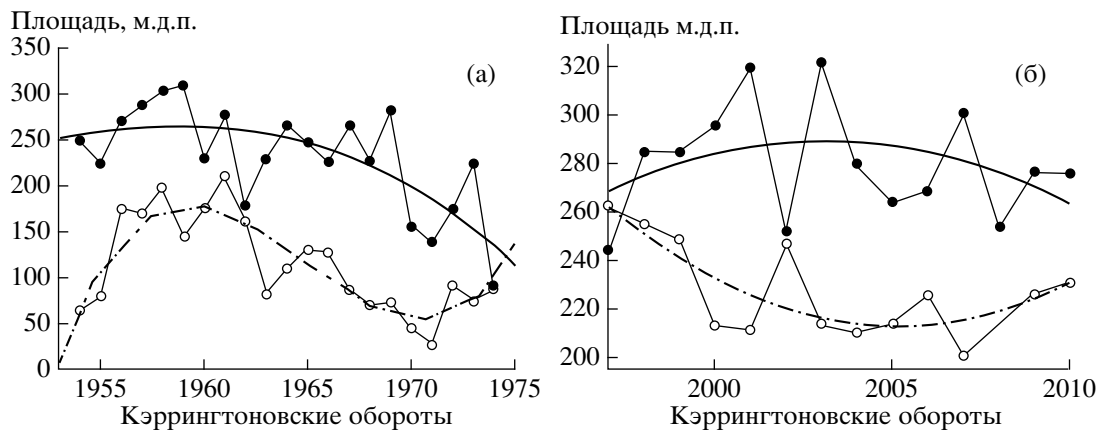


Рис. 5. Временной ход площади обоих комплексов первого (а) и второго (б) периодов.

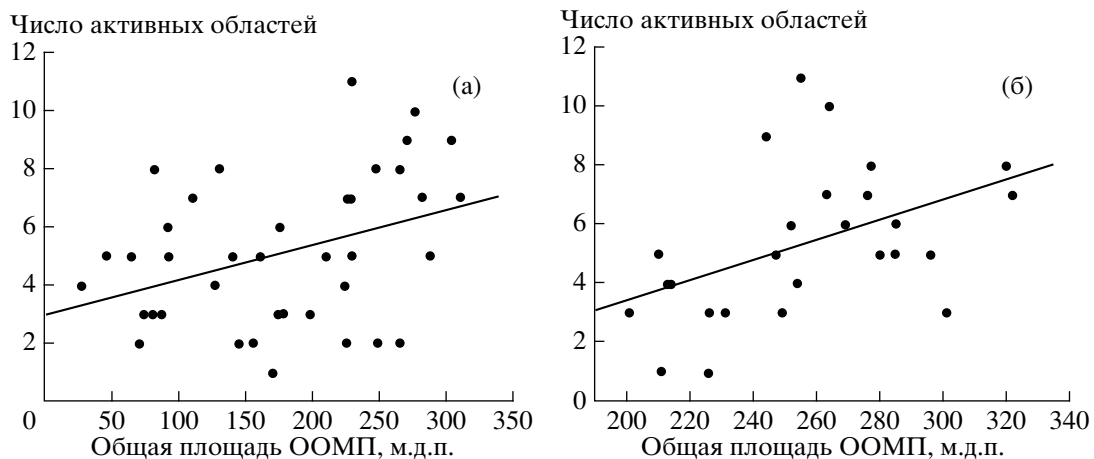


Рис. 6. Связь между площадью ООМП и числом групп пятен в комплексах первого (а) и второго (б) периодов.

периода (справа). В первом периоде площади комплексов ООМП развиваются в целом синхронно, во втором периоде — в противофазе.

На рис. 6 показана связь между площадью ООМП и числом групп пятен в комплексах первого (слева) и второго (справа) периодов. С ростом площади ООМП (или связанной с ними площади корональной дыры) растет и число активных областей в комплексе. Коэффициент корреляции, правда, невелик: он равен 0.39 ± 0.13 в первом случае и 0.47 ± 0.15 — во втором, но положительная тенденция несомненна. Эта положительная корреляция подчеркивает генетическую связь ООМП и групп солнечных пятен на ранней стадии их развития. После появления ООМП над ней возникает корональная дыра (через 1–2 оборота), и несколько позднее на ее периферии возникает группа пятен.

7. ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ООМП И АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

На рис. 7 показана карта крупномасштабного поля 18 мая 2000 г. На карте кружками показаны основания открытых силовых линий. На эту же карту нанесена структура локальных магнитных полей по наблюдениям SOHO MDI. Видно, что наиболее сильная активная область в центре диска располагается на периферии (или даже внутри) ООМП. На периферии ООМП располагаются и многие другие менее мощные активные области. Еще несколько активных областей располагаются на нейтральной линии крупномасштабного поля в северо-восточном квадранте.

В работе Обридко и Шельтинг [14] было показано, что в области ООМП, там, где силовые линии преимущественно радиальны, возникает корональная дыра. С удалением от области строго ради-

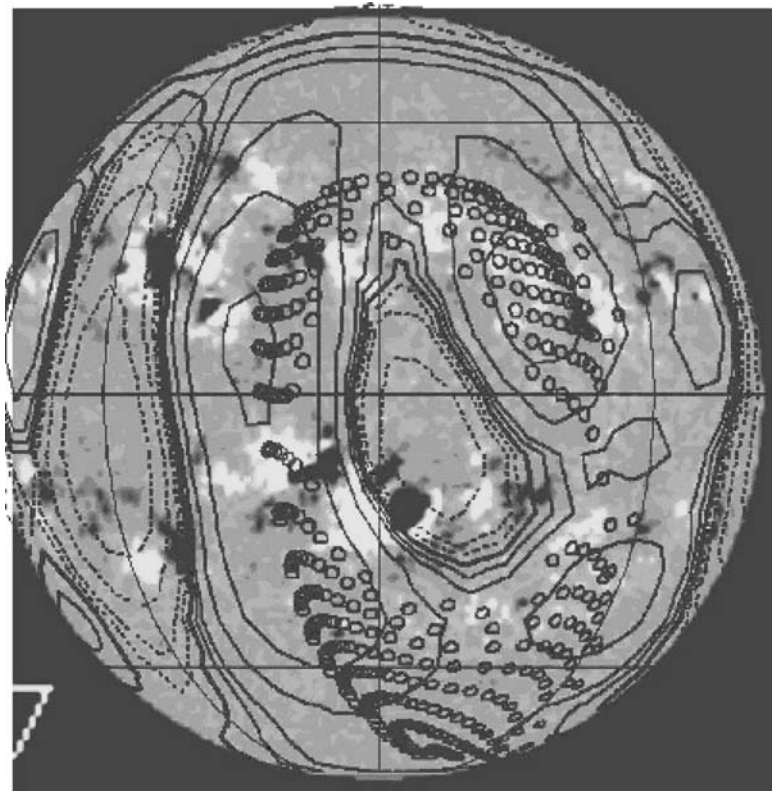


Рис. 7. Карта крупномасштабного поля 18 мая 2000 г. Кружками показаны основания открытых силовых линий, светлые и темные области соответствуют полярности локальных магнитных полей по наблюдениям SOHO MDI.

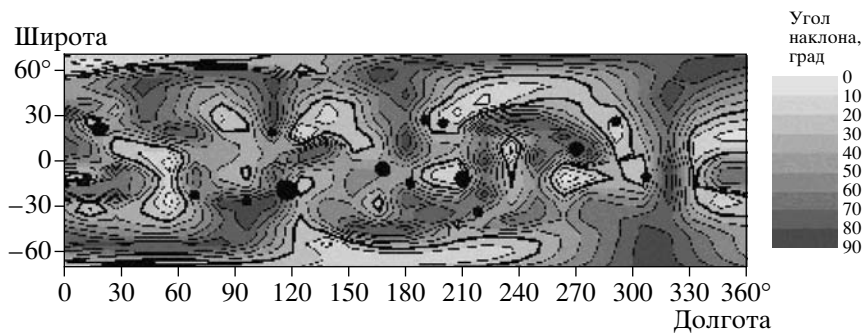


Рис. 8. Синоптическая карта углов наклона силовых линий для оборота 1959 (см. текст).

ального поля силовые линии, связанные с окружающей фотосферой, имеют все более сильный наклон. Вплоть до наклона 20° корональная дыра продолжает существовать, хотя ее контраст постепенно ослабевает. Возникает то, что можно условно называть полутенью корональной дыры. Затем, начиная с наклона 50° , яркость окружающей среды приходит на уровень невозмущенной хромосферы. Именно в этой области, где наклон больше 20° , но меньше 50° , и располагаются сопряженные с корональной дырой активные области.

На рис. 8 в качестве примера показана синоптическая карта углов наклона силовых линий для оборота 1959. Градацией серого показаны углы наклона от 0 до 90° в соответствии с приведенной справа от карты калибровкой. Изоклина 30° показана жирной линией. Кружками изображены группы пятен, причем размер кружков примерно соответствует площади группы. Видно, что большинство кружков располагается внутри изоклины 50° и преимущественно на изоклине 30° .

Для количественной оценки близости групп пя-

Характеристики активных областей для первого и второго наблюдательных периодов

Параметр	Все активные области	Активные области вблизи корональных дыр	Активные области вдали от корональных дыр
Кэррингтоновские бороты 1954–1974			
Сумма всех площадей активных областей	139342	$105752/139342 = 0.759$	$33590/139342 = 0.241$
Сумма площадей активных областей больше 600 м.д.п.	$68841/139342 = 0.494$	$55754/68841 = 0.810$	$13087/68841 = 0.190$
Сумма площадей активных областей меньше 600 м.д.п.	$70501/139342 = 0.506$	$49998/70501 = 0.709$	$20503/70501 = 0.291$
Количество всех активных областей	318	$228/318 = 0.717$	$90/318 = 0.283$
Количество активных областей с площадями больше 600 м.д.п.	66	$54/66 = 0.818$	$12/66 = 0.182$
Количество активных областей с площадями меньше 600 м.д.п.	252	$174/252 = 0.690$	$78/252 = 0.310$
Кэррингтоновские бороты 1997–2010			
Сумма всех площадей активных областей	58992	$41981/58992 = 0.71$	$17011/58992 = 0.29$
Сумма площадей активных областей больше 600 м.д.п.	$24255/58992 = 0.41$	$21002/24255 = 0.86$	$3253/24255 = 0.14$
Сумма площадей активных областей меньше 600 м.д.п.	$34737/58992 = 0.59$	$20979/34737 = 0.60$	$13758/34737 = 0.40$
Количество всех активных областей	152	$96/152 = 0.72$	$56/152 = 0.28$
Количество активных областей с площадями больше 600 м.д.п.	23	$19/23 = 0.82$	$4/23 = 0.18$
Количество активных областей с площадями меньше 600 м.д.п.	129	$77/129 = 0.60$	$52/129 = 0.40$

тен к ООМП мы проанализировали весь набор данных. При этом под близкими к корональной дыре (в данном случае мы отождествляли их с ООМП) понимались группы, центр которых удален менее чем на 10 гелиографических градусов от границы корональной дыры.

Из табл. 1 и 2 видно, что как большие, так и малые группы пятен располагаются вблизи корональных дыр. Их суммарная площадь выше. При этом для больших групп этот эффект выражен сильнее.

8. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время не остается сомнений в том, что комплексы активности не есть случайное объединение нескольких активных областей в единое целое с общим положением на диске и сходной эволюцией в течение нескольких оборотов

Солнца. Складывается впечатление, что комплексы активности есть необходимая часть в общей схеме крупномасштабной организации солнечной активности как в пространственном, так и в долгосрочном временном масштабе. В их образовании и эволюции участвуют не только поверхностные локальные поля, но и глобальные процессы.

Механизмами, объединяющими солнечную активность в глобальном масштабе, являются крупномасштабное солнечное динамо и меридиональные течения.

Сегодня ясно, что, кроме открытой конфигурации глобального магнитного поля, вторым условием для существования корональных дыр в средних широтах является присутствие в их окрестностях активных областей с сильным локальным полем. Связь между корональными дырами и активными областями была установлена в ранних работах,

опирающихся на данные Skylab [16, 28, 29]. Появление открытого поля корональных дыр обычно сопровождается образованием двух замкнутых систем силовых линий. Позднее было показано [30, 31], что иногда изменение границ и баланса энергии в корональных дырах определяется в значительной степени спорадическими и импульсными потоками горячей плазмы (“X-ray jets”) и регулярными потоками энергии из окружающих активных областей. Активные области вблизи корональных дыр могут соединяться с ними динамически или энергетически [17, 18].

Магнитное поле генерируется в основании конвективной зоны как следствие взаимодействия торoidalного магнитного поля и дифференциального вращения (Ω -динамо). Это поле всплывает от тахоклины, в основном, в приэкваториальной зоне, возможно преимущественно в виде отдельных трубок, и проявляется в виде активных областей. При этом возникает бегущая от средних широт к экватору волна, которую можно отождествить с бабочками Маундера. Эта простая и убедительная схема в деталях все же подвергалась критике. Упомянем только некоторые моменты этой критики.

Во-первых, поле, генерируемое в основании конвективной зоны, все-таки несколько слабавато — получить типичные для солнечных пятен значения в 3 тыс. Гс и более довольно трудно. Во-вторых, всплывающая трубка в этой схеме имеет преимущественно радиальное направление магнитного поля. Однако биполярная активная область в большей своей части имеет трансверсальное поле. За пределами активной области поле тоже преимущественно поперечное. Всплытие такой системы сквозь плотную плазму фотосферы и подфотосферных слоев затруднено. Поэтому более вероятно, что квадрупольная структура (или структура биполей) возникает уже в непосредственной зоне околоповерхностных слоев. Однако центральная часть трубки остается радиальной и сохраняет свою связь с глубинными слоями. Таким образом, центральная часть комплекса представляет собой область открытых силовых линий. При этом в вертикальном поле часто может возникнуть более темное в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах образование, т.е. корональная дыра. На периферии этого образования, там, где силовые линии отклоняются от радиального направления, возникают активные области. Они в свою очередь влияют на область открытой конфигурации, искажая ее. При этом их вращение несколько отличается от периода вращения глубинного поля. Поверхностные поля вращаются с кэррингтоновской скоростью. Период вращения глубинного поля ближе к соответствующему твердотельному вращению 27-дневному значению.

Через несколько оборотов активные области распадаются. Их влияние на трубку глубинного поля постепенно исчезает, и восстанавливается структура открытых силовых линий. Возникает новая корональная дыра. Однако она не возникает из остатков активной области, а связана с глубинным полем.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 11-02-00259 и частично программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-22. Авторы выражают благодарность коллективам SOHO и WSO за возможность получения данных через интернет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. Н. Гневывшев, Изв. Главн. астрон. обсерв. в Пулковке **16**, 36 (1938).
2. М. С. Эйгенсон, М. Н. Гневывшев, А. И. Оль, Б. М. Рубашев, *Солнечная активность и ее земные проявления* (М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1948).
3. H. W. Babcock and H. D. Babcock, *Astrophys. J.* **121**, 349 (1955).
4. V. Vumba and R. Howard, *Astrophys. J.* **141**, 1492 (1965).
5. V. Vumba and R. Howard, *Astrophys. J.* **141**, 1502 (1965).
6. В. Н. Ишков, Э. И. Могилевский, *Эволюция комплексов вспышечноактивных областей на Солнце. Солнечная активность* (Алма-Ата: Изд-во КазССР, 1983), с. 3.
7. В.Н. Обридко, *Солнечные пятна и комплексы активности* (М: Наука, 1985), с. 255.
8. Э. И. Могилевский, Н. С. Шилова, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. **94**, 60 (1998).
9. В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, *Астрон. журн.* **77**, 124 (2000).
10. В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, *Астрон. журн.* **80**, 364 (2003).
11. E. V. Ivanov and V. N. Obridko, *Solar Phys.* **206**, 1 (2002).
12. М. Л. Демидов, В. М. Григорьев, *Солн.-земн. физ.* **6**, 10 (2004).
13. Y.-M. Wang, S. H. Hawley, and N. R. Sheeley, *Science* **271**, 464 (1996).
14. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* **270**, 297 (2011).
15. О. И. Бугаенко, И. А. Житник, А. П. Игнатъев и др. Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. **100**, 123 (2004).
16. Z. Wang, M. R. Kundu, and H. Yoshimura, in: *Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics*, Proc. Ninth Sacramento Peak Summer Symp., Sunspot, NM, USA, August 17–21, 1987, ed. R. C. Altroc (Sunspot, NM, USA.: Nat. Solar Observ., 1988), p. 458.
17. E. I. Mogilevsky, V. N. Obridko, and N. S. Shilova, *Solar Phys.* **28**, 247 (1997).

18. V. N. Obridko, in: *Advances in Solar Connection with Transient Interplanetary Phenomena*, Proc. Third SOLTIP Symp., eds X. H. Feng, F. S. We, M. Dryer (Beijing: Internat. Acad. Publs., 1998), p. 41.
19. P. S. McIntosh, in: *The solar cycle*, ed. K. L. Harvey, ASP Conf. Ser. **27**, 14 (1992).
20. V. Bumba, Klvana, and J. Sykora, *Astron. and Astrophys.* **298**, 923 (1995).
21. E. E. DeLuca and P. A. Gilman, in: *Solar interior and atmosphere*, eds A. N. Cox, W. C. Livingstone, M. S. Matthews (Tucson, AZ, USA: Univ. Arizona Press, 1991), p. 275.
22. E. V. Ivanov, V. N. Obridko, E. V. Nepomnyashchaya, and N. V. Kutilina, *Solar Phys.* **184**, 369 (1999).
23. V. N. Obridko, E. V. Ivanov, A. Ozguc, *et al.*, *Solar Phys.* **281**, 779 (2012).
24. V. N. Obridko, B. D. Shelting, I. M. Livshits, and Asgarov A. B., *Solar Phys.* **260**, 191 (2009).
25. В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, И. М. Лившиц, А. Б. Аскеров, *Астрон. журн.* **86**, 11, 1125 (2009).
26. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* **184**, 187 (1999).
27. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* **187**, 185 (1999).
28. R. H. Levine, in: *Coronal Holes and High Speed Wind Streams*, ed. J. B. Zirker (Boulder, USA: Colorado Associated Univ. Press, 1977), p. 103.
29. R. H. Levine, M. D. Altschuler, J. W. Harvey, and B. V. Jackson, *Astrophys. J.* **215**, 636 (1977).
30. K. Shibata, T. Yokoyama, and M. Shimojo, In: *Proc. of Kofu Symposium: New Look at the Sun with Emphasis on Advanced Observations of Coronal Dynamics and Flares*, Kofu, Japan, September 6–10, 1993, eds S. Enome, T. Hirayama (Nagano, Japan: Nobeyama Radio Observ., 1994), p. 75.
31. E. I. Mogilevsky, *Geomagn. and Aeron.* **3(6)**, 11 (1995).