

КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ И КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ НА СОЛНЦЕ: ФЕНОМЕНОЛОГИЯ СВЯЗИ

© 2022 г. С. А. Язев^{1, 2, *}, В. М. Томозов², Е. С. Исаева¹

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Проанализирована связь комплексов активности (КА) и корональных дыр (КД) по данным 24 цикла солнечной активности. Получены следующие выводы. 1. Первые низкоширотные КД проявляются в виде выступов (“хоботов”) полярных КД, вытягивающихся в сторону активной области (АО) в составе комплексов активности. 2. Изолированные (не связанные с полярными КД) низкоширотные КД возникают в результате эволюции “хоботов” полярных КД. 3. Эффект замещения, когда на месте распавшихся АО КА, возникает КД, проявляется не в появлении новой КД вместо АО, а в распространении (расширении или удлинении) уже существующей близлежащей КД на место распавшейся АО. КД рождаются от КД, а не от КА, но КА влияют на их локализацию и форму. 4. Высокоширотные КД подчиняются дифференциальному вращению. Низкоширотные изолированные КД, взаимодействующие с КА, вращаются с кэррингтоновской скоростью. Низкоширотные КД, не связанные с КА, подчиняются дифференциальному вращению. 5. Возникновение “хоботов” полярных КД связано с влиянием АО (прежде всего, АО в составе КА). 6. Подтвержден сделанный ранее предварительный вывод о том, что все КА на определенном этапе своего развития связаны с близлежащими КД. Это проявляется в изменениях формы границ КД и в особенностях скорости вращения КД.

Ключевые слова: корональные дыры, комплексы активности на Солнце

DOI: 10.31857/S0004629922100139

1. ВВЕДЕНИЕ

О существовании корональных дыр на Солнце астрономы догадывались еще в начале XX века, анализируя фотографии короны, сделанные во время полных солнечных затмений. Первые изображения КД в коротковолновом диапазоне были получены в ходе ракетных экспериментов в 1963–1967 гг. [1]. КД стали важной темой гелиофизических исследований, прежде всего, в связи с выдающимися достижениями, полученными в ходе выполнения научной миссии орбитальной станции Skylab в 1973–1975 гг. В этот период на фазе спада 20-го цикла солнечной активности в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах впервые наблюдались впечатляющие примеры огромных трансэкваториальных КД (типа “хобота слона”), существовавших на протяжении нескольких оборотов Солнца. Большое количество работ, выполненных разными авторами, сформировали общепринятую феноменологическую модель КД [2–6]. КД представляет собой область с преимущественно открытой конфигурацией магнитных полей в короне, для которой характерна

пониженная плотность плазмы. Это приводит к уменьшению меры эмиссии в корональных спектральных линиях – при соответствующих наблюдениях КД выглядит как обширная (как правило) область пониженной яркости.

КД являются источниками высокоскоростных потоков быстрого солнечного ветра, которые могут оказывать активное воздействие на магнитосферу Земли, приводя к геомагнитным бурям. В открытом магнитном поле КД обычно преобладает одна полярность, что вызвано непрерывным дисбалансом выхода нового магнитного потока [7–9].

Существует линейная корреляция между величиной магнитного поля (без знака/со знаком) и площадью КД. При этом КД не являются однородными структурами: в КД регистрируются яркие рентгеновские точки, иногда наблюдаются выбросы и изредка даже вспышки. КД демонстрируют ту же самую закономерность с солнечным циклом, что и активные области, но с некоторым запаздыванием [9]. Космический аппарат Паркер обнаружил сложную структуру магнитно-

го поля с большими градиентами в верхней короне на границах КД и стримеров [10].

Многие исследования посвящены изучению особенностей вращения КД, отмечались и случаи как ярко выраженного дифференциального вращения, так и твердотельного (кэррингтоновского) вращения этих структур [11–15].

Связь КД с соседними активными областями (АО) отмечалась уже в период исследований в рамках проекта Skylab [4]. Наличие многочисленных, небольших и быстро эволюционирующих активных областей, расположенных на границе обширной КД, наблюдавшейся со станции Skylab, было отмечено еще в ранних работах, посвященных КД [16]. Существуют аргументы в пользу того, что АО, находящиеся вблизи границы КД, связаны с ней как энергетически, так и динамически [17, 18].

Взаимодействию КД и АО посвящен цикл работ [19–22]. Так, в работе [19] авторы ввели понятие МИКСО – магнитоизолированные комплексы солнечных образований. Согласно описанию авторов цитируемой работы, это структуры, соизмеримые по размеру с радиусом Солнца и включающие в себя АО, примыкающие к ним КД и промежуточные области. Было показано, что эволюция АО и КД является частью единого процесса. Особенности таких комплексов – заметная магнитная связь между элементами внутри комплекса и слабая связь со структурами, окружающими комплекс. Другими словами, магнитный поток, выходящий из этих структур наружу, мал по сравнению с потоком внутри самих структур. Большинство силовых линий магнитного поля, начинающихся в таких структурах, оказываются либо открытыми, либо замкнутыми внутри них.

В работе [23] была показана качественная связь между КА и КД. Было отмечено сходство временных характеристик (продолжительность жизни КА и КД, рост суммарной площади КД после исчезновения КА), особенности взаимного пространственного расположения двух этих типов образований на Солнце. В качестве базовой гипотезы, описывающей физическую связь АО и КД, рассматривалась концепция, в соответствии с которой после распада АО, ее хвостовая магнитная полярность по мере диссипации поля, формирует крупномасштабную (с характерным размером 30–40 гелиографических градусов) униполярную магнитную область, в пределах которой образуется КД [24, 25]. Эта схема была применена к КА, как существенной части популяции АО, где наблюдаются наиболее крупные и долгоживущие группы пятен, возникающие на одном и том же участке солнечной поверхности на протяжении нескольких солнечных оборотов подряд [Yazev, 2015]. Был сформулирован тезис о генетической связи КА и КД: КД рассматривались как резуль-

тат эволюции магнитных полей КА после стадии развития и распада пятен.

В работе [26], дополняющей и развивающей этот подход, на материале наблюдений в 22 цикле были более подробно показаны типы феноменологических проявлений взаимодействия одновременно сосуществующих КА и КД, предварительно отмеченные в [23]. В частности, были описаны:

– *эффект притяжения*, когда длинные (протяженностью 30–60 гелиографических градусов) выступы (“хоботы”) полярных корональных дыр (ПКД) “целенаправленно” протягиваются в сторону низких широт к АО, расположенной в ядре КА;

– *эффект заливов*, когда участок КД полукольцом (дугой) охватывает АО в ядре КА;

– *эффект замещения*, когда КД регистрируется точно на месте исчезнувшей АО в ядре КА.

И хотя статистика показывает, что КА без связанных с ними КД фактически не наблюдаются [26], очевидно, что ситуация является на самом деле гораздо более сложной. Механизм “вытягивания хоботов” ПКД к низкоширотному КА (тем более, по другую сторону от экватора) остается, строго говоря, необъясненным. Наблюдаются случаи, когда одна и та же КД оказывается связанной с несколькими КА, и наоборот. Не только КД появляются на месте распавшихся КА, – отмечены случаи, когда на месте КД (или вплотную к ней) возникает новый КА [26]. В то же время Тавацшерна и Поляков, используя каталог КА в 23 цикле, составленный одним из авторов настоящей статьи, указали, что “только некоторые ядра комплексов активности генетически связаны с корональными дырами” [27]. Древний вопрос о том, что первично – курица или яйцо, естественно трансформируется в аналогичный вопрос о КА и КД.

Данному вопросу посвящен целый раздел емистой книги [6]. Ранее Обридко и Шельтинг ввели понятие “глобальный комплекс активности” [28]. Связь между КА и КД здесь также не подвергается сомнению, но в качестве первичного образования рассматриваются КД. Согласно соответствующей концепции, КД формируются там, где магнитное поле в хромосфере и короне отклоняется менее чем на 20° от радиального направления (локальной отвесной линии). Вблизи границ КД возникают крупные АО, и их магнитное поле может воздействовать на конфигурацию границ КД. После распада АО структура открытых силовых линий восстанавливается – появляется новая КД. “Однако она не возникает из остатков активной области, а связана с глубинным полем”, как было указано в книге Обридко и Наговицына [6, с. 112].

Описанная выше альтернативная концепция даже нашла отражение в названии статьи “Фор-

мирование корональных дыр из пепла активных областей” [25]. Таким образом, вопрос о физической связи КА и КД остается актуальным, и здесь до сих пор, по-видимому, нет окончательных ответов и консенсуса среди исследователей.

Настоящая работа посвящена исследованию связи КА и КД с использованием данных 24 цикла солнечной активности.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В работе были использованы данные о развитии КА и КД в 24 цикле солнечной активности. Вопрос о выборе формата данных о КД важен, поскольку разные методики выделения КД дают разные конфигурации КД. Тем не менее все они сходны в том, что центры КД примерно соответствуют друг другу во всех каталогах, несмотря на (порой заметные) различия в форме границ КД. Однако, с точки зрения авторов, в данном случае конкретные конфигурации упомянутых границ не столь важны, поскольку речь идет о синоптических картах, когда каждому кэррингтоновскому обороту приписывается условная конфигурация КД, как правило, соответствующая их нахождению вблизи центрального меридиана. Форма границ КД заметно меняется с характерным временем меньше, чем один оборот, — уже за несколько дней. Это означает, что при выбранной скважности отбора данных (один оборот) тонкие детали в конфигурации границ долгоживущих КД не имеют значения, поэтому для анализа можно было взять любой каталог. Те морфологические закономерности, которые были обнаружены в ходе исследования, отражают наиболее общие свойства динамики формы и эволюции КД, а детали конфигурации границ (на которые может влиять методика, примененная в том или ином каталоге) в работе не рассматриваются. В результате для изучения динамики КД был выбран набор расчетных синоптических карт GONG (<https://gong.nso.edu/data/magmap/QR/mqf/>), описание методики построения этих карт можно найти на сайте: <https://gong.nso.edu/data/magmap/>. Плюсом данного каталога является указание магнитных полярностей всех КД. Выборочные проверки показали, что расчетные положения КД хорошо совпадают с реальными изображениями, полученными обсерваторией SDO.

В свою очередь, КА идентифицировались в соответствии с методикой, описанной в работе [29]. Был составлен каталог КА в 24 цикле солнечной активности, доступный по ссылке http://ru.iszf.irk.ru/images/f/ff/КОМПЛЕКСЫ_АКТИВНОСТИ_В_24_ЦИКЛЕ_СОЛНЕЧНОЙ_АКТИВНОСТИ.doc.

На синоптические карты с контурами КД были нанесены ядра КА в виде квадратов размерами

20 на 20 гелиографических градусов, согласно данным из указанного каталога. В случае необходимости более детального анализа использовались оригинальные изображения Солнца, полученные обсерваторией SDO и доступные по ссылке: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>.

3. КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ И КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ В 24 ЦИКЛЕ

В следующих разделах настоящей работы показаны типичные примеры взаимодействия КА и КД в 24 цикле.

3.1. Одноядерные комплексы активности и корональные дыры

Одноядерным КА называется, как следует из его названия, КА, включающий в себя одно ядро КА (область постоянного образования пятен, с характерным размером 20 на 20 градусов, существующая не менее трех солнечных оборотов подряд [29]). Окружающие пятна факельные площадки на уровне фотосферы, зона возмущенной тонкой структуры на уровне хромосферы, а также зона поярчения на уровне нижней короны, как правило, имеют характерные размеры 30–40 градусов вдоль параллели и 20–25 градусов вдоль меридиана.

Пример связи ядра КА и КД на фазе начала развития 24 цикла показан на рис. 1. Ядра КА обозначены серыми квадратами размером 20 на 20 градусов.

На рис. 1 видно, что вслед за появлением пятен в 2091 обороте (первое ядро КА в цикле — 24N01) в следующем 2092 обороте наблюдается длинный выступ со сложной структурой (“хобот”) полярной КД, протягивающийся к головным пятнам ядра КА 24N01. Это типичный пример эффекта притяжения, который наблюдается с запада (справа по рисунку, магнитные полярности выступа полярной КД и головного пятна АО в ядре КА совпадают), как отмечено в работе [26].

В 2093 обороте картина выглядит сходной: КД охватывает полукругом головные пятна АО в ядре КА (эффект залива). В 2094 обороте пятен в ядре 24N01 уже нет. К юго-востоку от этого места возникло ядро нового КА — 24N02, обозначено серым квадратом с номером 02. КД, начиная с 2095 оборота, вытянулась к югу, находясь на том месте, где ранее были пятна КА 24N01 (эффект замещения). Таким образом, к ядру 24N01 сначала протянулся “хобот” полярной КД, примыкая к головной части АО, а после исчезновения пятен КД распространилась на место, где ранее были пятна. Важно отметить, что в 2091 обороте, когда появились пятна первого КА 24 цикла, “хобот” ПКД отсутствовал: он появился только после возникновения КА.

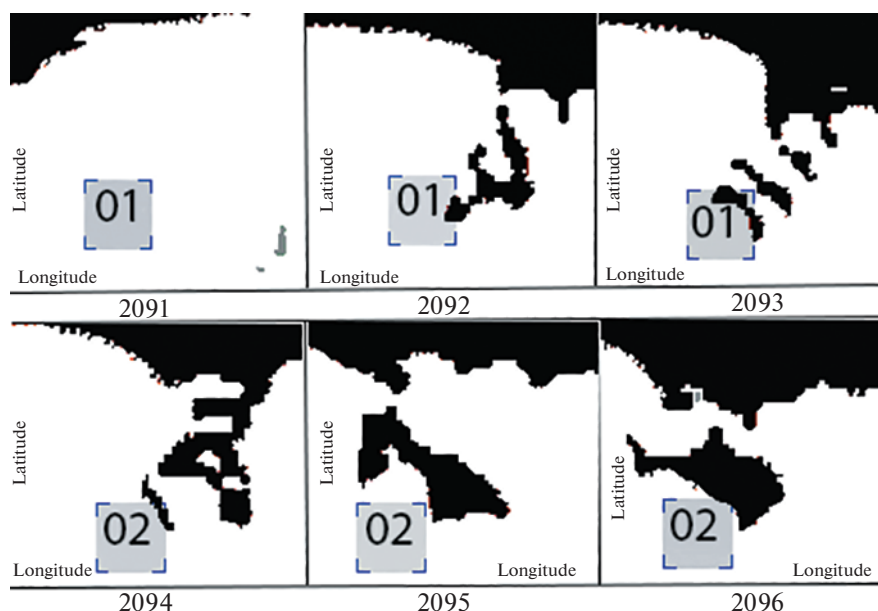


Рис. 1. Развитие КА и КД в 2091–2096 кэррингтоновских оборотах показано на фрагментах синоптических карт (северное полушарие, диапазон долгот 210–300 градусов). Серым квадратом с номером 01 отмечено место развития КА 24N01 в течение трех оборотов. Вплотную возник новый одноядерный КА 24N02, который обозначен серым квадратом с номером 02. На каждом фрагменте синоптической карты по вертикальной оси отложена гелиографическая широта, по горизонтальной оси – гелиографическая долгота, на других последующих рисунках – аналогично.

Отмечены и несколько случаев “хоботов” КД, которые протягивались к КА через экватор (рис. 2).

Еще один пример, иллюстрирующий взаимодействие КА и КД на фазе роста цикла, приведен на рис. 3.



Рис. 2. Развитие КА и КД в 2188 обороте, КД в южном ядре КА 24N61 – в северном полушарии, диапазон долгот 90–150, 2017 г. (фаза спада цикла). Горизонтальная зеленая линия в верхней части рисунка – гелиографический экватор.

Рисунок 3 демонстрирует, как близости от исчезнувшего в 2128 обороте ядра КА 24N21 в обороте 2129 возникло новое ядро 24N24. Существовавшая ранее небольшая изолированная КД развивается вплотную к КА. На протяжении 2128–2131 оборотов северная полярная КД не наблюдается. Начиная с 2132 оборота, полярная КД с прежней полярностью восстанавливается, в 2132–2134 оборотах формируется “хобот”, соединяющий полярную КД с изолированной КД возле КА. В 2135 обороте КА уже не наблюдается, КД снова становится изолированной (не связанной с полярной КД), продолжая эволюционировать.

Это еще один пример сосуществования КА и КД на протяжении нескольких оборотов. Видно, что КА оказывает воздействие на форму границ КД и ее общую конфигурацию, примыкание, как и прежде, наблюдается к западной части АО в ядре КА (правило полярностей соблюдается и в этом случае).

3.2. Многоядерные КА

В работе [30] дано описание развития гигантских КА, включавших в себя множество связанных друг с другом АО, объединенных в непрерывный широтный пояс, охватывающий всю параллель. Согласно данным авторов настоящей работы, подобные структуры в 24 цикле не наблюдались. Однако были отмечены цепочки из нескольких (2–4) ядер КА, расположенных по-

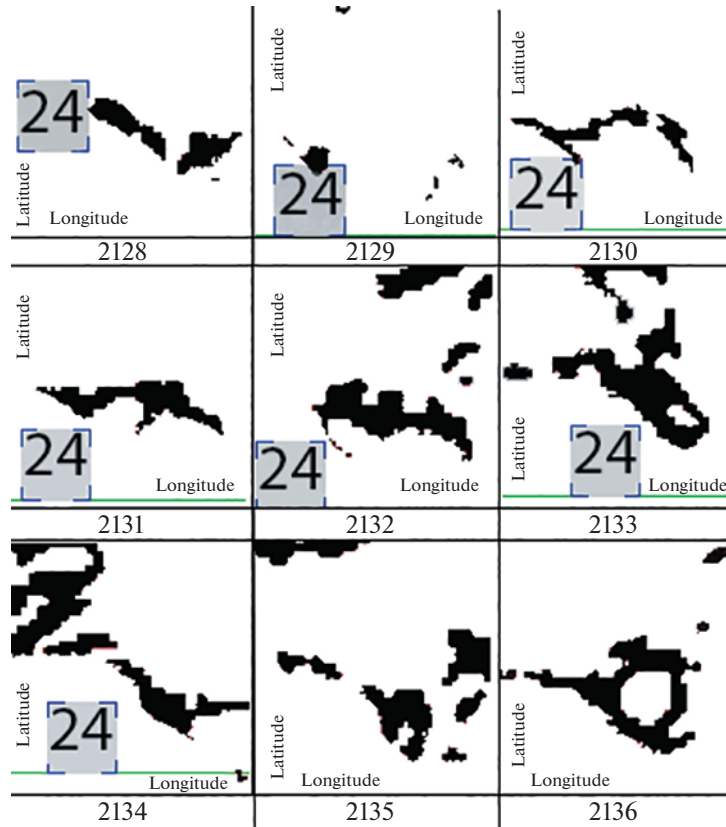


Рис. 3. Развитие КА и КД в 2128–2136 оборотах, северное полушарие, диапазон долгот 210–300.

близости (не более чем в 40 градусах) друг от друга, соединенных высокими корональными петлями и находящихся в пределах общей флоккулярной площадки. Такие случаи, когда несколько (2–4) ядер КА явно объединены в единую физическую систему, рассматривались как многоядерные КА. Разные ядра (области постоянного пятнообразования) в одном КА могут существовать на протяжении разных интервалов времени.

В монографии [31] отмечено, что возникновение новых ядер КА поблизости (в 30–40 градусах) от уже существующих ядер КА со скоростью примерно одно новое ядро в оборот трудно считать случайностью. На примере 23 цикла показано, что появление новых ядер КА, последовательно выстраивающихся в широтную цепочку, насчитывало до 15 событий! [31, с. 318]. Это означает, с точки зрения авторов, что вероятность возникновения нового ядра КА около уже существующего ядра превышает вероятность случайного появления на “свободном месте”, вдали от уже существующего КА. С этой точки зрения возникновение многоядерного КА можно считать неслучайным событием, каждое очередное появление соседнего ядра КА, по-видимому, либо порождено, либо облегчено существованием уже существующего ядра КА.

Пример формирования сложного многоядерного КА показан на схеме (рис. 4).

Обратимся к рис. 4. В 2107 обороте возникла АО 11161 (долгота 336, широта +13). Так сформировалось ядро нового КА (24N07 по каталогу). В том же обороте в 34 градусах к западу от него наблюдалась АО 11174, с нее началась эволюция еще одного ядра КА 24N08 (долгота 10, широта 10). Эти ядра составили основу многоядерного КА.

В следующем обороте в указанных ядрах продолжалось пятнообразование, а в 20 градусах западнее от 24N08 возникло еще одно ядро 24N09. Ситуация повторилась в следующем, 2109 обороте: в 30 градусах к западу от 24N09 появилась активная область, с этого момента начало развиваться ядро 24N10. Таким образом, в 2109 обороте наблюдался четырехъядерный КА, включавший в себя ядра КА 24N07-08-09-10.

В 2111 обороте прекратило существование ядро 24N08, в 2113 обороте – ядро КА 24N09. Активность пятен в ядрах 24N07 и 24N10 продолжалась. В 2113 обороте к востоку от ядра КА 24N07 появились пятна нового ядра КА 24N12, которое существовало до 2119 оборота включительно. Ядро 24N07 наблюдалось до 2116 оборота.

В 2113 обороте возникло ядро КА 24N13, далеко к западу от ядра КА 24N10. На этом этапе мы

2106						
2107		N07	N08			
2108		N07	N08	N09		
2109		N07	N08	N09	N10	
2110		N07	N08	N09	N10	
2111		N07		N09	N10	
2112		N07		N09	N10	
2113	N12	N07			N10	N13
2114	N12	N07			N10	N14 N13
2115	N12	N07			N10	N14 N13
2116	N12	N07			N10	N14 N13
2117	N12		N16		N10	N14 N13
2118	N12		N16		N10	
2119	N12		N16		N10	
2120					N10	
2121					N10	
2122					N10	
2123					N10	

Рис. 4. Схема развития многоядерного КА. Слева показаны номера кэррингтоновских оборотов, ход времени — сверху вниз. Расстояние между соседними ядрами КА — в пределах от 20 до 40 градусов, восток слева, запад — справа. Пояснения в тексте.

должны формально его рассматривать как одноядерный КА. Однако в следующем обороте в 30 градусах к востоку от него сформировалось новое ядро КА 24N14, которое оказалось в 40 градусах к западу от ядра КА 24N10. Так сформировался новый многоядерный КА, включающий в себя три ядра 24N10-14-13. Достаточно далеко к востоку от этого КА в оборотах 2114–2116 существовал описанный выше КА 24N12-07. Важно, что оба этих КА оказались “генетически” связаны, поскольку оба развивались как “потомки” начального двухядерного КА 24N07-08.

Описанный пример демонстрирует сложную структуру многоядерных КА, состоящих из нескольких долгоживущих ядер разного возраста на фазе роста и максимума цикла солнечной активности. Очевидно, что здесь взаимодействие КА с КД рассматривать непросто, поскольку магнитные поля АО в ядрах КА не оставляют места для формирования обширных униполярных магнитных областей. Тем не менее основные закономерности взаимодействия КА и КД наблюдаются и в подобных сложных случаях. На фазе максимума и спада 24 цикла неоднократно отмечались случаи, когда взаимодействие осуществлялось между вытянутой вдоль параллели КД и сразу несколькими ядрами в составе многоядерного КА (рис. 5).

В обороте 2152 серыми квадратами показаны ядра КА 24N34, 36, 37 и 38. Выступы (“хоботы”) южной полярной КД протягиваются к хвостовым полярностям (слева) ядер 24N34 и 24N36 (эффект притяжения). В обороте 2153 появляется ядро КА

24N38. В обороте 2154 формируется еще одно ядро КА 24N39. В результате наблюдается четырехядерный КА, включающий в себя ядра 24N37, 39, 38, 34. С этим КА взаимодействует протяженная КД, демонстрирующая эффекты притяжения и залива (рис. 4). К западу наблюдается одноядерный КА 24N36, взаимодействующий с КД (эффект притяжения).

3.3. Статистика КА и КД в 24 цикле

В 24 цикле наблюдалось 118 КА — в том числе 68 в северном полушарии и 50 в южном.

После распада КА в 39 случаях из 118 (33%) на месте исчезнувшей АО отмечены КД. Речь идет о распространении уже существующей КД, расположенной рядом с ядром КА, на место исчезнувшей АО в ядре КА. Следует особо выделить это обстоятельство: не обнаружено ни одного случая “превращения” области пятнообразования в область КД. Речь идет о распространении (расширении) уже существующей КД на “освободившееся” место ранее существовавшей и распавшейся АО. Именно так проявляется эффект “замещения” или формирования КД “из пепла активных областей” [25].

В 44 случаях из 118 (37%) ядра КА возникали на “спокойном месте” — т.е. там, где ранее на протяжении, как минимум, трех оборотов не было предшествующих КА. Такие “новые” ядра наблюдались преимущественно на фазах начала и окончания цикла, когда на Солнце наблюдалось

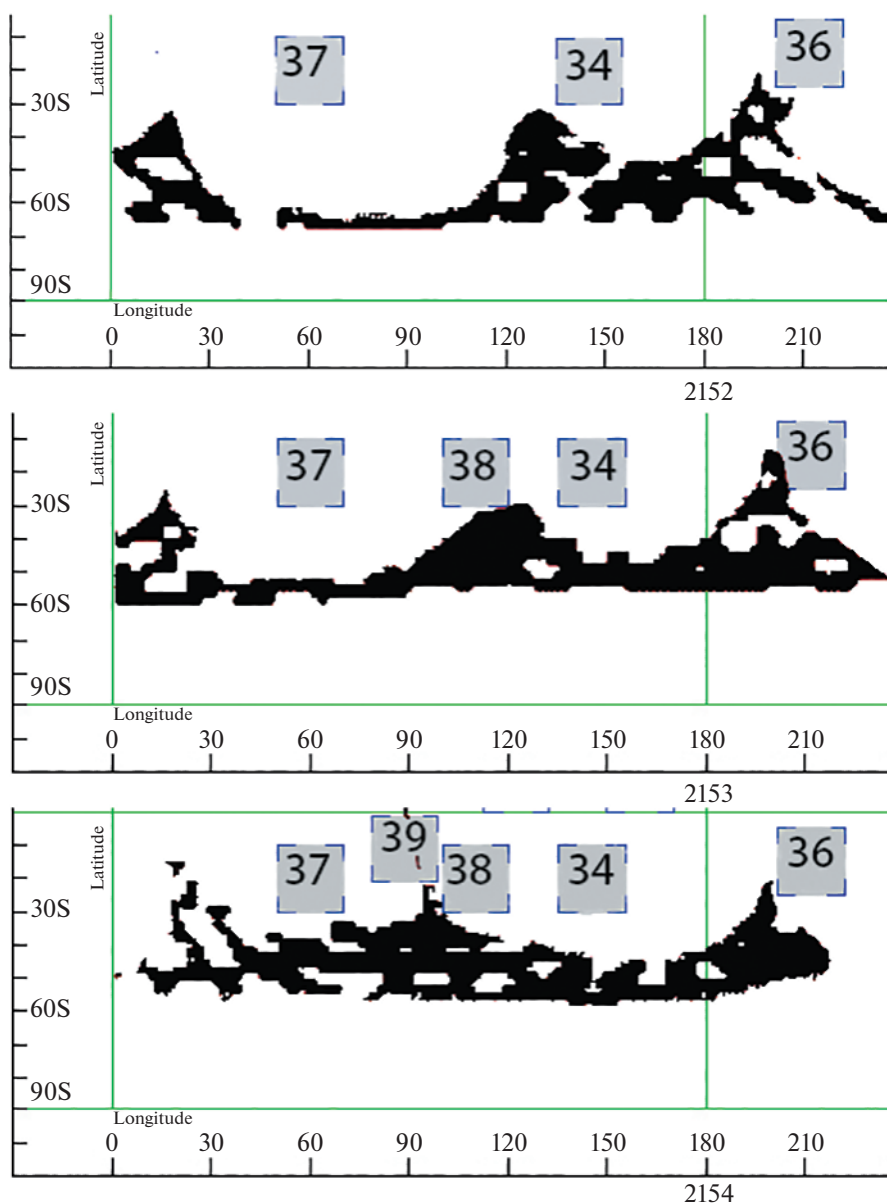


Рис. 5. Развитие многоядерного КА и взаимодействующей с ним КД в оборотах 2152–2154. Пояснения в тексте.

мало АО. В большинстве своем ядра КА (63%) формировались поблизости (менее чем в 40 градусах) от уже существующих ядер КА (33% к востоку, 30% к западу). Этот факт можно расценивать как повышенную вероятность возникновения нового ядра КА вблизи уже существующего. Так формировались многоядерные КА.

В 36 случаях (30% от общего числа) новые ядра КА возникали на месте существовавшей ранее (в предыдущем или текущем обороте) КД. В этих случаях конфигурация КД менялась — граница КД отодвигалась от границы вновь появившейся АО. В 70% КД перед возникновением АО на том же месте отсутствовали.

Тем не менее КД отмечены вблизи всех КА — нет ни одного КА без находящейся поблизости (менее чем в 10 градусах) КД. КД не всегда соседствовали рядом с КА на протяжении всего времени их существования, иногда хобот полярной КД, либо изолированная низкоширотная КД демонстрировала взаимодействие с КА лишь в некоторых оборотах существования ядра КА, но этот эффект обязательно наблюдался у всех КА. У всех ядер КА на одном из этапов их жизни (иногда на протяжении всей жизни) наблюдались КД, демонстрировавшие эффекты притяжения и залива (иногда — эффект замещения).

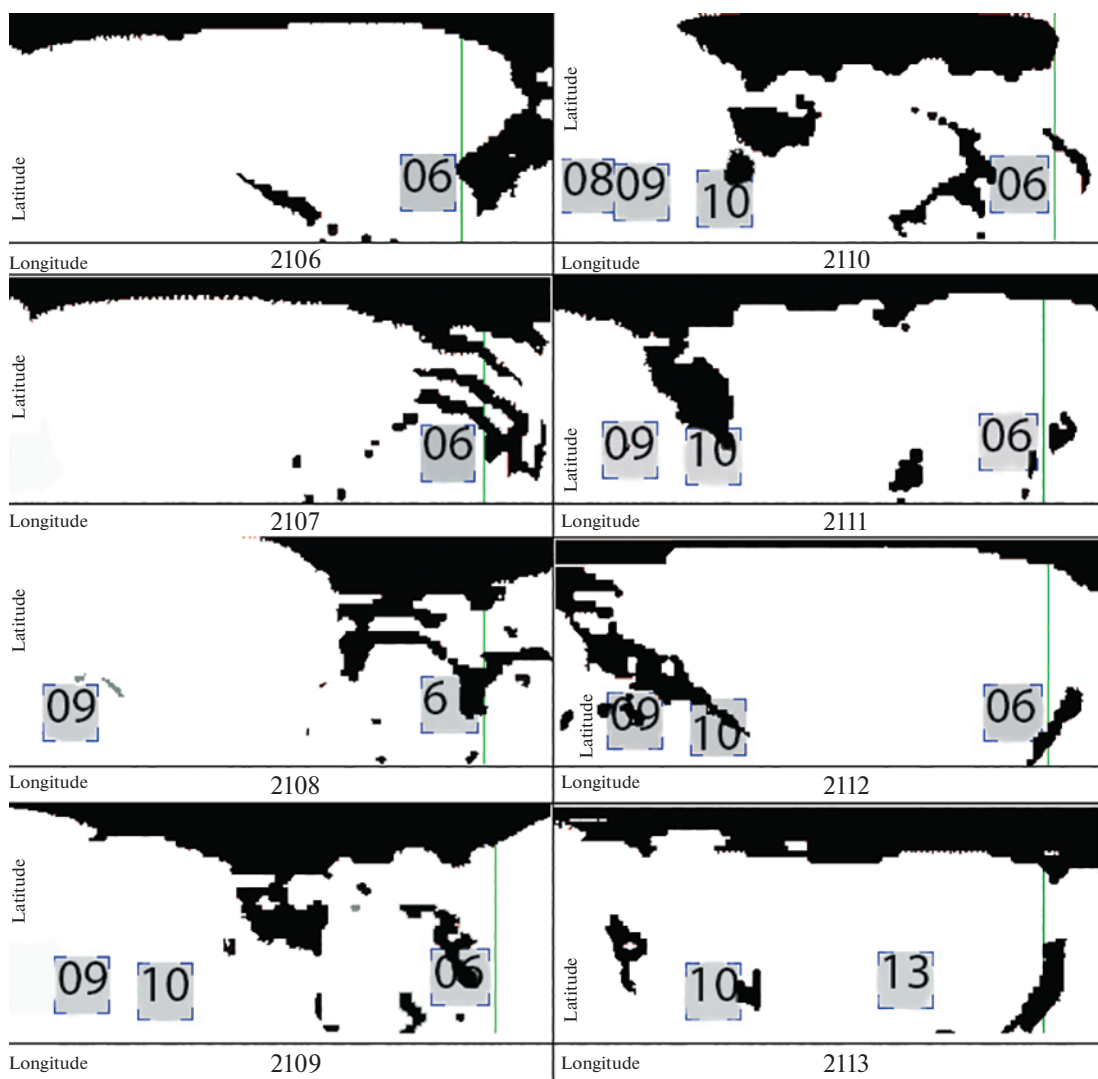


Рис. 6. Смещение КД в виде “хобота” (черный выступ полярной КД, протягивающийся на фрагментах карт сверху вниз) к востоку в кэррингтоновской системе координат в 2106–2113 оборотах. Зеленая линия – меридиан, соответствующий долготе 180°.

3.4. Вращение КА и КД

Особенностям вращения КД посвящено множество работ. Авторы отмечали и случаи жесткого (недифференциального вращения) КД, и наоборот, проявления дифференциальности, характерные для разных фаз цикла (см., например, [11–15, 31]).

Анализ закономерностей вращения КД приводит к следующим выводам.

1. Выступы полярных КД, протягивающихся от границы КД к низким широтам (“хоботы”), подвержены дифференциальному вращению. Это хорошо видно по изменению конфигурации рекуррентных “хоботов” от оборота к обороту: низкоширотная часть “хобота” КД вращается быстрее, высокоширотная – медленнее, поэтому смещается к востоку. Измерения показали, что на

широтах ± 45 градусов скорость смещения середины “хобота” (определенная по всем “хоботам” в 24 цикла) составляет в среднем 11 градусов за оборот для северного полушария, 10 градусов за оборот – для южного полушария. Для каждого оборота определялась долгота середины хобота на указанной широте, скорость смещения определялась по величине изменения этой долготы от оборота к обороту, и затем вычислялась средняя величина за все время существования хобота. Пример такого смещения показан на рис. 6.

На рис. 6 видно, как эволюционирует выступ полярной КД (“хобот”). В 2106 обороте он примыкает к ядру КА 24N06. Дифференциальное вращение смещает КД к востоку (налево по рисунку), “хобот” распадается на два: западная часть остается связанной с ядром КА (обороты

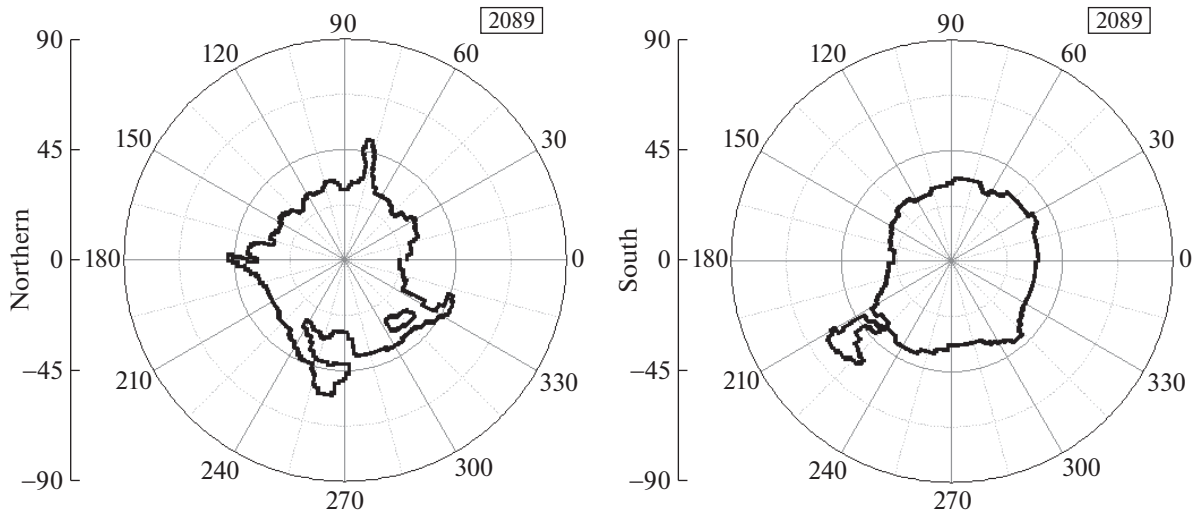


Рис. 7. Конфигурации полярных КД в 2089 обороте, слева – северное полушарие, справа – южное.

2107–2109). В обороте 2110 восточный “хобот” взаимодействует с новым ядром КА 24N10. В 2211 и 2112 оборотах смещение основания “хобота” к востоку продолжается, угол наклона оси “хобота” к меридиану увеличивается. В процессе смещения “хобот” КД разрушается (оборот 2113), но фрагмент КД остается к западу от ядра КА 24N10. Сходные процессы видны на рис. 1 и 3.

2. Изолированные низкоширотные КД, оказавшиеся на сходной широте к западу от ядер КА, не смещающихся в кэррингтоновской системе координат, также прекращают смещение по долготе, связанное с дифференциальным вращением. Пример показан на рис. 6: в обороте 2110 небольшая низкоширотная КД к западу от ядра КА 24N06 (в правой части рисунка) не смещается по долготе на протяжении всего периода существования указанного ядра КА, образуя с ним единую систему. Когда КА исчезает, после этого может начаться дрейф КД к востоку.

3.5. Магнитные полярности КД

В начале 24 цикла наблюдались две ярко выраженные квазисимметричные полярные КД, центрированные на гелиографические полюсы (рис. 7): северное полушарие – отрицательная полярность, южное – положительная полярность.

Анализ всего набора синоптических карт за 24 цикл солнечной активности показал, что полярности выступов (“хоботов”), возникавших у обеих полярных КД, начиная с 2091 оборота (декабрь 2009), соответствовали полярностям породивших их полярных КД. Эти хоботы, дробясь и взаимодействуя с новыми возникающими АО

КА, образовали позднее множественные изолированные КД на низких широтах.

К 2136–2137 оборотам (май-июнь 2013 г.) полярные КД исчезли. Перераспределение изолированных КД на низких широтах привело к тому, что отрицательная полярность, ранее характерная для северной полярной КД, отмечена во всех КД к западу от 180 меридиана. Наоборот, к востоку от 180 меридиана все КД, находившиеся в северном и в южном полушарии, имели положительную полярность. Эта ситуация может быть условно описана наклоном оси глобального магнитного диполя Солнца на 90 градусов, в плоскости солнечного экватора. Так началась переполюсовка глобального магнитного поля в 24 цикле.

В 2145 обороте (январь 2014) наблюдался транс-экваториальный меридиональный “хобот” отрицательной полярности длиной 140 градусов, при этом полярные КД на Солнце не наблюдались.

В 2147–2148 оборотах (февраль–март 2014) отмечены полярные КД отрицательной полярности на обоих полюсах. В 2153 обороте наблюдалось начало формирования КД положительной полярности на северном полюсе Солнца. В 2158 обороте произошел “рецидив” старой отрицательной полярности на северном полюсе. В 2181 обороте (сентябрь 2016) зафиксировано восстановление новой положительной полярности на северном полюсе. При этом в западном полушарии Солнца все КД обладали этой полярностью вплоть до экватора, в восточном полушарии, наоборот, присутствовали КД с отрицательной полярностью, только в южном полушарии – до экватора. Таким образом, сложный процесс переполюсовки в 24 цикле к этому моменту завершился. На фазе спада цикла и в фазе минимума наблюдались ярко выраженные полярные КД (северная – с поло-

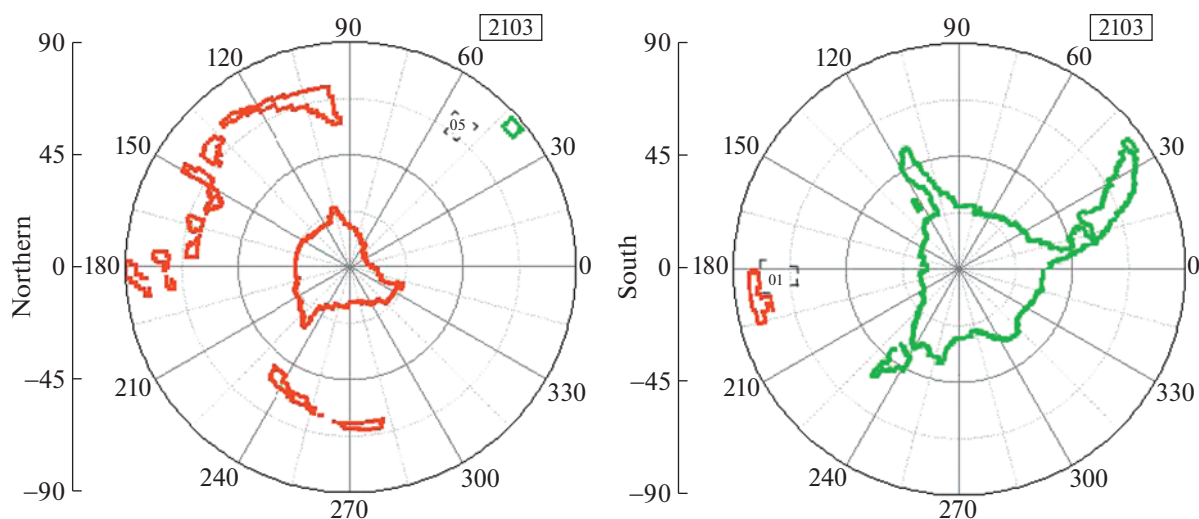


Рис. 8. Конфигурации полярных КД в 2009 обороте (вверху) и в 2103 обороте (внизу), слева – северное полушарие, справа – южное, красным цветом обозначена отрицательная магнитная полярность, зеленым – положительная, черными контурами – положения ядер КА.

жительной полярностью, южная – с отрицательной полярностью), а возникающие квази-меридиональные “хоботы” сохраняли полярности “своих” полярных КД.

При взаимодействии с КА наблюдалось сохранение правила полярностей: КД всегда примыкали к АО в КА с той стороны, где совпадали полярности КД и солнечных пятен в АО. Это правило описано в [26] на примерах 22 цикла, его исключения в 24 цикле также не обнаружены.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ взаимного расположения КА и КД на синоптических картах в 24 цикле позволяет подтвердить известный вывод о физической связи этих двух типов активных образований на Солнце. КД взаимодействуют с КА, соблюдая правило полярностей – знак магнитной полярности КД соответствует ближайшему знаку полярности АО, находящейся в ядре КА.

Анализ взаимного расположения КА и КД по синоптическим картам за 24 цикл позволяет сделать следующие выводы.

Все наблюдавшиеся КД в цикле генетически связаны с полярными КД, и в этом смысле порождены глобальным магнитным полем Солнца. Однако создается впечатление, что в начале цикла, когда АО КА возникают на сравнительно высоких широтах, полярные КД трансформируются: у них возникают выступы (“хоботы”), которые протягиваются в сторону КА (эффект притяжения). Низкоширотные части “хоботов” КД взаимодействуют с КА, образуя с ними единые системы (феноменологически это проявляется в виде эффектов заливов и единого характера враще-

ния). Альтернативное описание этого феномена с помощью понятия “магнитоизолированные комплексы солнечных образований” можно найти в работах [19, 22].

Связь “хобота” КД с полярной КД со временем теряется: хобот “отрывается”, превращаясь в изолированную низкоширотную КД. Ее дальнейшая эволюция во многом зависит от КА, с которыми она взаимодействует. КД может изменять конфигурацию, делиться на отдельные фрагменты, протягиваться к новым КА и в конечном итоге исчезает, в подавляющем большинстве случаев после исчезновения КА, с которыми она была связана.

Пример такого развития показан на рис. 8.

Крупный выступ северной полярной КД, сопоставимый по площади с полярной КД, направлен в сторону ядра КА 24N02, к этому моменту уже исчезнувшему (рис. 7, вверху слева). Дальнейшая эволюция этого “хобота” привела к формированию длинной изолированной КД (не связанной с полярной КД, которая к 2013 обороту пересекла экватор) и продемонстрировала притяжение к ядру КА 24S02 в южном полушарии (рис. 8, внизу).

Таким образом, первые “затравочные” низкоширотные КД в цикле – это выступы полярных дыр, которые вытягиваются в сторону первых появившихся КА. В дальнейшем они эволюционируют под влиянием магнитных полей КА, с которыми они взаимодействуют. Определяющую роль полярных КА демонстрируют обороты 2136–2137, когда КД отсутствовали на обоих полюсах Солнца, после чего началась временная деградация КД на Солнце (их минимум наблюдался в 2143 оборо-

те). Новый рост активности изолированных низкоширотных КД начался с формирования новых полярных КД на высоких широтах.

Описанная многими авторами схема превращения магнитных полей распадающейся АО в магнитные поля КД (например, [24]) на материале 24 цикла прямого подтверждения не находит. Этот факт не противоречит выводам, сделанным, например, Тавастшерна и Поляковым [27] по результатам анализа развития КА и КД в 23 цикле (“только некоторые ядра КА генетически связаны с КД”). В то же время, несмотря на отсутствие генетической связи, взаимодействие одновременно сосуществующих КА и КД постоянно наблюдается. Во многих случаях (хотя далеко не всегда), КД, находящаяся возле КА, после распада пятен КА расширяется (протягивается), распространяясь на ту область, где пятна были ранее. В подавляющем большинстве случаев низкоширотные КД представляли собой вытянутые, длинные, сравнительно тонкие образования (шириной 10–20 градусов). Этот тезис не противоречит классической картине, в соответствии с которой хвостовые полярности АО, распадаясь, расширяются. Благодаря закону Джоя, они, находясь ближе к полярной зоне, переносятся меридиональным течением к полюсу, постепенно формируя полярную КД противоположного знака и обеспечивая переполусовку [32]. Однако, согласно результатам нашего анализа, этот процесс не имеет отношения к эволюции низкоширотных КД.

Изучение взаимного расположения КА и КД показывает, что эти типы солнечных активных образований взаимодействуют между собой. Как указано выше, присутствие КА явно влияет на форму, локализацию и параметры вращения КД. С другой стороны, присутствие возле КА близко расположенных КД, вероятно, влияет на рост всплывающего потенциала КА [33], а также на возможности ускоренных во время вспышки протонов выходить в гелиосферу [34].

Обратимся к вопросу о механизме генерации длинных “хоботов” – выступов полярных КД, явно не случайно протягивающихся в сторону КА, удаленных иногда на гигантские расстояния от границы полярной КД – от 40 до 100 гелиографических градусов (в редких случаях трансэкваториальных “хоботов”, рис. 2 и рис. 8). Авторы работ [35, 36] пришли к заключению, что граница между открытыми и замкнутыми областями поля на Солнце может быть сложной, с узкими коридорами открытого потока, связывающего, по-видимому, разьединенные КД, и эти коридоры могут быть источниками медленного солнечного ветра. Для объяснения происхождения таких коридоров авторами указанных работ была исследована топология магнитных конфигураций на основе аналитической модели поверхности

источника, показавшая возможность возникновения при определенных условиях особенностей структуры магнитного поля в виде обсуждаемых коридоров [37].

В пределах полярных КД в эпоху минимума цикла магнитное поле обладает открытой конфигурацией, силовые линии поля расположены квазирадiallyно вблизи полюса и обладают сверхрадиальным расположением ближе к границам КД. Это хорошо видно по полярным перьям (“щеточкам”) на снимках белой короны во время полных солнечных затмений [32]. На более низких широтах на солнечном лимбе видны корональные лучи, вытягивающиеся в гелиосферу параллельно экватору. Даже если полярные КД замкнуты друг на друга, вблизи поверхности Солнца их конфигурацию можно считать открытой, поскольку петли магнитного поля уходят высоко в корону и в этом смысле мало отличаются от действительно “открытых” конфигураций, в которых силовые линии уносятся солнечным ветром. Похожая ситуация наблюдается и в изолированных низкоширотных КД. Выполненные расчеты показывают, что силовые линии, выходящие из таких КД, замкнуты на поверхность Солнца, но на больших расстояниях порядка радиуса Солнца они могут быть названы открытыми именно в этом смысле [25, 38].

Как известно, спокойные области солнечной поверхности на уровне фотосферы и хромосферы покрыты “ковром” из квазигоризонтальных магнитных полей. Появление КД означает, что силовые линии становятся квази-вертикальными и уходят высоко в корону, что позволяет плазме вытекать в этих местах в гелиосферу. В результате плотность плазмы здесь падает, уменьшается мера эмиссии, и соответствующая область в коротковолновом диапазоне становится темнее, чем окружающий фон. Таким образом, появление выступа КД (“хобота”) означает, что в горизонтальном магнитном “ковре” возникает “дыра”: здесь силовые линии оказываются квази-радиальными, уходя в корону. При этом дыра приобретает форму длинного узкого коридора, связывающего полярную КД с АО в составе КА. Вдоль этого коридора магнитное поле “открывается”, силовые линии, расположенные, в основном, горизонтально, приобретают вертикальный характер, и поднимаются высоко в корону.

Процесс возникновения направленных вдоль меридиана “хоботов”, возможно, связан со следующими процессами.

В начале цикла, в отсутствие АО, подфотосферное поле имеет преимущественно полюидальный характер: меридионально направленные линии глобального поля на высоких широтах уходят глубоко в конвективную зону. В районе полюса линии поля выходят из-под фотосферы в виде

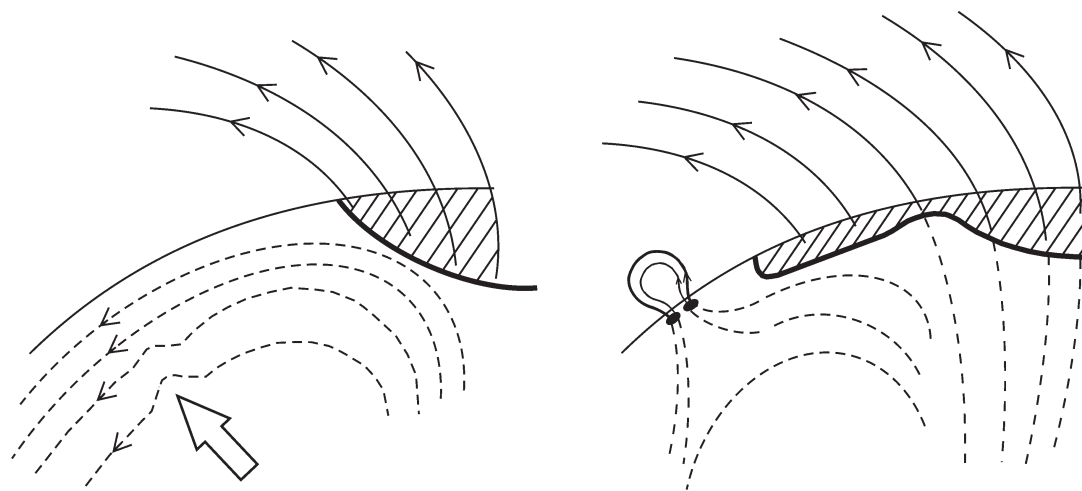


Рис. 9. Магнитное поле полярной КД и КА.

осесимметричного расходящегося пучка. Здесь они проявляются в виде “перьев” или “корональных щеточек” — оснований линий, уходящих высоко в корону. Ситуация схематично показана на рис. 9.

Слева показана полярная КД (ее граница обозначена жирной черной линией). Силовые линии над фотосферой показаны сплошными, под фотосферой — штриховыми линиями. Активная область (будущий КА) всплывает из глубин конвективной зоны, но на поверхности это никак не проявляется.

Справа на рис. 9 показаны КД и сформировавшийся КА. Форма границы полярной КД изменилась: всплытие магнитного потока АО привело к выходу вышележащих линий, которые, как и линии в пределах полярной КД, теперь также уходят высоко в корону. Граница КД теперь включает и область, где из-под фотосферы выходят эти линии. Область открытого поля КД заштрихована. Может быть выдвинута гипотеза о том, что всплытие потока, связанного с АО КА, могло изменить конфигурацию линий полоидального поля, проходящих через область АО, и привести к их “открытию” — вытягиванию вверх, в корону, в результате чего мог сформироваться “хобот” вдоль меридиана. Такова первая гипотеза.

Вторая гипотеза связана с процессами в короне. КА является областью, где повышена вероятность генерации вспышек и корональных выбросов массы (КВМ). КВМ, поднимаясь над АО КА, неизбежно сталкивается со сверхрадиально направленными силовыми линиями полярной КД, покрываемыми своеобразным куполом высокие широты. Взаимодействие магнитного поля выходящего скоростного КВМ и полей “полярных перьев” полярной КД может привести к пересоединению полей КД и КА, что в конечном итоге при-

водит к возникновению структуры “хобота” в окрестностях КА.

Правомерность изложенных гипотез требует детальных наблюдений и анализа процесса формирования первых КД цикла (“хоботов” полярных КД).

5. ВЫВОДЫ

Анализ взаимного расположения КА и КД в 24 цикле приводит к следующим заключениям:

1. Первые низкоширотные КД в цикле возникают в виде выступов (“хоботов”) полярных КД, протягивающихся в сторону АО в составе комплексов активности.

2. Изолированные (не связанные с полярными КД) низкоширотные КД возникают как результат эволюции “хоботов” полярных КД. Низкоширотные КД, как и “хоботы”, взаимодействуют с АО КА, что и определяет их конфигурацию.

3. Эффект замещения, когда на месте распавшихся АО КА возникает КД, проявляется не в появлении новой КД вместо АО, а в распространении (расширении или удлинении) уже существующей близлежащей КД на место распавшейся АО. КД рождаются от КД, а не от КА, но КА оказывают влияние на их локализацию и форму.

4. Высокоширотные КД (как правило, “хоботы” полярных КД) подчиняются дифференциальному вращению, околополярное основание “хобота” смещается к востоку с характерной скоростью около 10 градусов за оборот. Низкоширотные изолированные КД, взаимодействующие с КА, вращаются с кэррингтоновской скоростью. Низкоширотные КД, не связанные с КА, подчиняются дифференциальному вращению.

5. Возникновение “хоботов” полярных КД связано с влиянием АО (прежде всего, АО в со-

стае КА). Механизм формирования “хоботов” требует дальнейших исследований.

6. Подтвержден сделанный ранее предварительный вывод о том, что все КА на определенном этапе своего развития связаны с близлежащими КД. Это проявляется в изменениях формы границ КД и в особенностях скорости вращения КД.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам, сделавшим ряд полезных замечаний.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (госзадание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024, а также субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *S. R. Cranmer*, *Solar Phys.* **6**, 3 (2009).
2. *A. F. Timothy, A. S. Krieger, and G. S. Vaiana*, *Solar Phys.* **42**, 135 (1975).
3. *J. Zirker* *Coronal Holes and High-Speed Wind Streams* (Boulder, Colo.: Colorado Associated University Press, 1977).
4. *R. H. Levine*, *Astrophys. J.* **218**, 291 (1977).
5. *Б. П. Филиппов* *Эруптивные процессы на Солнце* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007).
6. *В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын*, *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб.: Изд-во ВВМ, 2017).
7. *Н. Н. Степанян*, *Солнечный цикл* (С.-Пб, ФТИ, 36, 1993).
8. *Н. Н. Степанян, Е. В. Маланушенко*, *Изв. КрАО* **97**, 76 (2001).
9. *S. G. Heinemann, S. J. Hofmeister, A. M. Veronig, and M. Temmer*, *Astrophys. J.* **863**, 29 (2018).
10. *R. F. Pinto, N. Poirier, A. P. Rouillard, and A. Kouloumvakos*, *Astron. and Astrophys.* **653**, 92 (2021).
11. *J. D. Bohlin and N. R. Sheeley*, *Solar Phys.* **56**, 125 (1978).
12. *В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг*, *Солнечные данные* **1**, 89 (1988).
13. *J. E. Insley*, *Solar Phys.* **160**, 1 (1995).
14. *В. Г. Иванов, Р. Н. Ихсанов* *Современные проблемы солнечной цикличности. Труды конференции, посвященной памяти М.В. Гневывшева и А.И. Оля* (С.-Пб, ГАО РАН, 76–80, 1997).
15. *В. Г. Иванов, Р. Н. Ихсанов*, *Современные проблемы солнечной цикличности. Труды конференции, посвященной памяти М.В. Гневывшева и А.И. Оля* (С.-Пб, ГАО РАН, 81–85, 1997).
16. *В. В. Касинский, В. М. Томозов*, *Астрон. циркуляр* **806**, 1 (1974).
17. *D. Bravo*, *Solar Phys.* **173**, 193 (1997).
18. *E. I. Mogilevsky, V. N. Obridko, N. S. Shilova*, *Solar Phys.* **176**, 107 (1997).
19. *V. M. Malashchuk, V. G. Fainshtein, N. N. Stepanyan, G. V. Rudenko, and Ya. I. Egorov*. *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* **108**, 70 (2012).
20. *В. М. Малащук, Н. Н. Степанян*, *Изв. КрАО* **109**, 148 (2013).
21. *В. Г. Файнштейн, В. М. Малащук, Н. Н. Степанян, Г. В. Руденко, Я. И. Егоров*, *Изв. КрАО* **109**, 156 (2013).
22. *В. М. Малащук, В. Г. Файнштейн, Н. Н. Степанян, Г. В. Руденко*, *Изв. КрАО* **112**, 58 (2016).
23. *В. Г. Банин, С. А. Язев*, *Солнечные данные* **1**, 78 (1991).
24. *В. А. Коваленко*, *Солнечный ветер* (М.: Наука, 1983).
25. *N. V. Karachik, A. A. Pevtsov, V. I. Abramenko*, *Astrophys. J.* **714**, 1672 (2010).
26. *С. А. Язев*, *Известия ИГУ, серия Науки о Земле* **3**, 2, 226 (2010).
27. *K. S. Tavastsherna and E. V. Polyakow*, *Geomagn. Aeron.* **54**, 953 (2014).
28. *В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг*, *Солнечные данные* **1**, 89 (1988).
29. *S. A. Yazev*, *Astron. Rep.* **59**, 228 (2015).
30. *V. Gaizauskas, K. L. Harvey, J. W. Harvey, and C. Zwaan*, *Astrophys. J.* **141**, 1502 (1983).
31. *С. А. Язев*, *Феномен комплексов активности на Солнце* (Иркутск.: Изд-во ИГУ, 2014).
32. *А. В. Мордвинов, С. А. Язев, Е. Г. Рыкова, А. А. Дворкина-Самарская*, *Солнечно-земная физика* **18**, 69 (2011).
33. *E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, and S. A. Yazev*, *Astron. Rep.* **62**, 243 (2018).
34. *В. М. Томозов, С. А. Язев, and Е. С. Исаева*, *Астрон. журн.* **97**, 722 (2020).
35. *S. K. Antiochos, C. R. DeVore, J. T. Karpen, and Z. Mikiš*, *Astrophys. J.* **671**, 946 (2007).
36. *S. K. Antiochos, Z. Mikiš, V. S. Titov, R. Lionello, and J. A. Linker*, *Astrophys. J.* **711**, 112 (2011).
37. *V. S. Titov, Z. Mikiš, J. A. Linker, R. Lionello, and S. K. Antiochos*, *Astrophys. J.* **731**, 111 (2011).
38. *В. Г. Файнштейн, Н. Н. Степанян, Г. В. Руденко, В. М. Малащук, Л. К. Кашапова*, *Изв. КрАО* **106**, 7 (2010).