

УДК 523.62-726

ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНОГО ОТКРЫТОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ В ЗОНЕ ГЛАВНЫХ АКТИВНЫХ ДОЛГОТ В 2006–2012 гг.

© 2013 г. К. Г. Иванов, А. Ф. Харшиладзе

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, (ИЗМИРАН) г. Троицк, г. Москва
e-mail: kivanov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 22.04.2013 г.

Исследована динамика абсолютных глобальных значений Φ потоков Крупномасштабного Открытого Магнитного Поля Солнца (КОМПС) в 2006–2012 гг. с шагом в один солнечный оборот по данным Wilcox Solar Observatory с помощью оригинального пакета программ моделирования магнитного поля Солнца ISOPAK. Определены опорные точки и продолжительности заключительного квазидвухлетнего интервала 23-го цикла (01.2006–05.2007, 17 месяцев), интервалов фаз минимума (05.2007–11.2009, 30 месяцев), роста (11.2009–05.2012, 30 месяцев) и начала фазы максимума (05.2012–01.2013) 24-го цикла. Показано, что абсолютные значения Φ резко уменьшились в началах фаз минимума, роста и максимума соответственно до значений $\sim (2; 1.25; 0.75) \times 10^{22}$ мкс. В течение всей фазы минимума КОМПС вращалось сверхквazitвердотельно, в западном направлении, по направлению вращения Солнца; с началом фазы роста произошла смена направления вращения на преимущественно восточное. Переплюсовка КОМПС в текущем 24-м цикле началась в мае–июне 2012 г. (CR 2123–2124) с прорыва на север полей южной полярности из южной полусферы Солнца. Подтверждается положение, что солнечный цикл – это непрерывная последовательность квазидвухлетних интервалов КОМПС. В частности, фазы минимума и роста – это интервалы, характеризующиеся противоположными направлениями вращения КОМПС соответственно сверхквazitвердотельным (скручиванием) и раскручиванием с одинаковыми, по крайней мере в 24-м цикле, продолжительностями.

DOI: 10.7868/S0016794013060047

1. ВВЕДЕНИЕ

С XIX века сферический гармонический анализ (СГА) является основным методом аналитического представления магнитного поля Земли [Charman and Bartels, 1940]. Чепмен указал на возможность применения этого метода для изучения магнитного поля Солнца [Charman, 1943], но лишь через много лет СГА был разработан применительно к специфическим данным магнитного поля солнечной фотосферы [Newkirk and Altschuler, 1969]. Для современной солнечно-земной физики особенно важное значение имеет применение СГА для моделирования крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца (КОМПС), полей, уходящих в межпланетную среду. Более 40 лет назад были указаны три перспективные направления в исследовании КОМПС с помощью СГА: 1. Исследование конфигурации КОМПС с помощью построения карт на поверхности источника [Newkirk and Altschuler, 1969]. 2. Исследование фотосферных источников с помощью техники проектирования этих полей с поверхности источника [Levine et al., 1977a]. 3. Исследование корональной и межпланетной суб-

структуры КОМПС, соответствующей ансамблю дискретных фотосферных источников КОМПС [Levine et al., 1977a, b].

Исследования в этих направлениях представляют собой альтернативу традиционному направлению развития физики Солнца на основе динамо-теории непрерывных полей: “From this analysis we begin to suspect that the hydromagnetic processes which control the solar dynamo result in shifts of geometrical field patterns which are more discrete than continuous in nature.” [Levine et al., 1977a].

В нескольких работах Levine et al. [1977a, b; Levine 1978; 1982] исследовали топологию и кинематику фотосферных отображений (источников) КОМПС, их связь с активными областями, корональными дырами и солнечным ветром. Было показано, что фотосферные источники КОМПС: 1) пространственно связаны с активными областями; 2) предшествуют с опережением до одного солнечного оборота появлению ассоциированных с ними корональных дыр; 3) вовлекаются в солнечное вращение, почти твердотельное в годы минимума, в твердотельное и регулярное диффе-

ренициальное — в годы максимума солнечной активности (СА); 4) соответствуют медленному солнечному ветру на орбите Земли.

В работе [Obridko and Shelting, 1999], основанной на большом статистическом материале за 1970–1996 гг., исследованы некоторые коллективные закономерности поведения КОМПС в циклах СА: широтный дрейф к экватору в тесной связи с активными областями и корональными дырами, зависимость вращения КОМПС от фазы СА. Обнаружен феномен одновременного двухмодового вращения со скоростями чуть меньше и больше, чем скорость вращения каррингтоновской системы координат.

Динамика структуры и конфигурации КОМПС от оборота к обороту систематически исследуется в наших работах, начиная с 2001 г., когда было обнаружено, что КОМПС каждого оборота представляет собой ансамбль дискретных взаимодействующих между собой фотосферных источников, порождающих явления солнечной активности в области их взаимодействия [Иванов и др., 2001], как оказалось, вследствие межсекторного дисбаланса магнитных потоков КОМПС [Иванов и Харшиладзе, 2008]. В частности динамика КОМПС в течение 1996–2003 гг. и ее особенности в зоне активных долгот рассмотрены в работе [Иванов и Харшиладзе, 2004 и в ссылках этой работы]. Были выделены семь последовательных интервалов поведения КОМПС и показано, что распределение этих интервалов по фазам цикла приводит к делению на две последовательные субфазы как фазу максимума СА, так и впервые фазы роста и спада активности. Как показано в работе [Кононович и Шефов, 2006], такое структурирование активности КОМПС проясняет физический смысл известной математической модели солнечного цикла как последовательности квазидвухлетних интервалов.

Замечательно, что вскоре после этого был идентифицирован один из заключительных квазидвухлетних интервалов динамики КОМПС на спаде 23-го цикла (2004–2005 гг.) [Иванов и Харшиладзе, 2009] и изучена его тонкая структура.

Суть его в генерации, развитии и диссипации 4-секторной структуры КОМПС, возникшей из двухсекторной из-за блокировки КОМПС в зоне активных долгот.

Замечательным свойством этого квазидвухлетнего интервала было наличие в его тонкой структуре “сингулярности” КОМПС, ассоциированной с чрезвычайно мощной АО, и ее последующий “взрыв” с колоссальным выделением энергии, преимущественно внутрь конвективной зоны, генерацией мощных гидродинамических импульсов: деблокирующего и отраженного от зоны активных долгот [Иванов, 2010а, б].

Указанные выше результаты подтверждают, на наш взгляд, значение альтернативного подхода к исследованиям, пионерами которого были [Levin, 1977, 1978; Levin et al., 1982] и иллюстрируют возможности для конкретизации физической сути в исследованиях по солнечно-земной физике. В рамках такого подхода далее рассматривается динамика КОМПС в 2006–2012 гг.

Далее излагаются по разделам: (2) — исходные данные и методы; (3) — динамика магнитного потока КОМПС в 2006–2012 гг. с шагом в один солнечный оборот; (4) — заключительный квазидвухлетний интервал 23-го цикла активности и определение опорной точки между минимумами 23-го 24-го циклов; (5) — фаза минимума 24-го цикла: структура фазы и динамика КОМПС; (6) — фаза роста 24-го цикла: структура и динамика КОМПС; (7) — обсуждение; (8) — заключение.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Использованы наблюдения фотосферного магнитного поля (<http://quake.Stanford.edu/~WSO>) после внесения всех поправок, указанных в работе Иванова и Харшиладзе [2009]. По этим данным определялись первые 10 коэффициентов ряда сферических гармоник с помощью программы ISOPAK [Харшиладзе и Иванов, 1994] и вычислялись абсолютные значения магнитных потоков КОМПС, рассчитанные по методу, изложенному в работе [Иванов и Харшиладзе, 2007]. По результатам этих вычислений построен график глобальных значений магнитных потоков КОМПС с шагом в один оборот (разд. 3), иллюстрирующий динамику потоков в 2006–2012 гг. Кроме того, потоки в локальных структурах КОМПС для некоторых избранных оборотов сравнивались между собой в разд. 4–7. Структура фаз минимума и роста рассматривались по картам фотосферных источников КОМПС.

3. ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОТОКА В 2006–2012 ГГ. С ШАГОМ В ОДИН СОЛНЕЧНЫЙ ОБОРОТ

На рисунке 1 представлена динамика КОМПС в 2006–2012 гг. с шагом в один солнечный оборот. Она иллюстрирует динамику и структуру: фазы спада 23-го цикла (CR 2038–2056, 5.01.2006 г.–11.05.2007 г.); фазы минимума 24-го цикла (CR 2056–2090, 11.05.2007 г.–23.11.2009 г.); фазы роста (CR 2090–2124, 23.11.2009 г.–6.06.2012 г.) и начало фазы максимума 24-го цикла (CR 2124–2132, 6.06.2012 г.–9.01.13 г.). На графике представлены опорные точки: минимума 24-го цикла CR 2056, май 2007 г.; начала роста CR 2090, ноябрь 2011 г.; начало фазы максимума (обращения знаков КОМПС на полюсах, CR 2124, июнь 2012 г.).

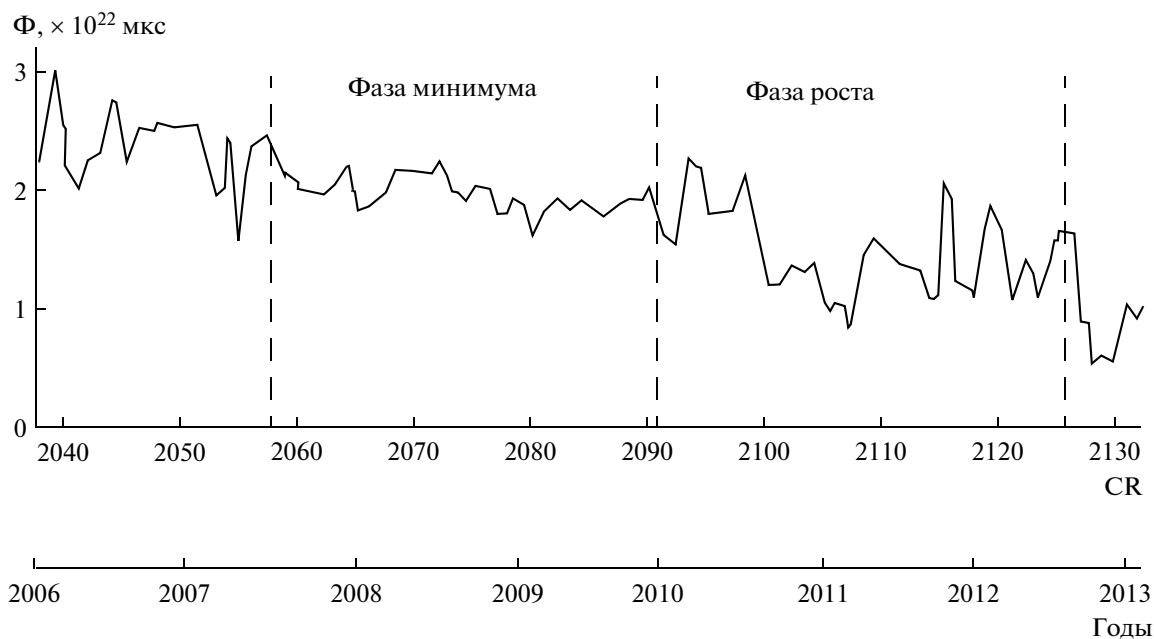


Рис. 1. Вариации абсолютных Φ глобальных значений Крупномасштабного Открытого Магнитного Поля Солнца (КОМПС) с шагом в один солнечный оборот в конце 23-го цикла, в фазу минимума, роста и начала фазы максимума текущего 24-го цикла солнечной активности.

Заметим, что продолжительности и фазы минимума и фазы роста 24-го цикла, равные каждая по 30 месяцев, укладываются в квазидвухлетние интервалы.

Интересно, что опорные точки этого цикла определены независимо от вариации КОМПС, представленной на рис. 1 (см. разд. 5 и 6). Тем не менее, эти точки довольно уверенно идентифицируются и по рис. 1, по среднему уровню и интенсивности флуктуаций последующих вариаций.

Одним из главных выводов из результатов по динамике КОМПС (рис. 1) является констатация абсолютных глобальных значений магнитных потоков КОМПС и их уменьшение от средних значений $\sim 2 \times 10^{22}$ до $\sim 1.25 \times 10^{22}$ мкс от фазы минимума к фазе роста, в тенденции к дальнейшему уменьшению до 0.75×10^{22} мкс в начале фазы максимума.

4. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ КВАЗИДВУХЛЕТНИЙ ИНТЕРВАЛ 23-ГО ЦИКЛА И ОПОРНАЯ ТОЧКА МЕЖДУ МИНИМУМАМИ 23-ГО И 24-ГО ЦИКЛОВ

Заключительный квазидвухлетний интервал 23-го цикла (CR 2038–2056, 5.01.2006 г.–11.05.2007 г., продолжительность 17 месяцев) четко отделяется от предыдущего (CR 2016–2037, 15.05.2004 г.–8.12.2005 г., продолжительность 18 месяцев), детально исследованного в ряде наших работ. В частности, на рис. 7 работы Иванова и Харшиладзе [2009] показана динамика сектор-

ной структуры в этом квазидвухлетнем интервале, демонстрирующая возникновение 4-секторной структуры КОМПС из 2-секторной (CR 2017) и восстановление 2-секторной из 4-секторной к концу этого квазидвухлетнего интервала (CR 2037).

На рисунке 2а, б приведены карты фотосферных источников КОМПС на начало заключительного интервала (CR 2038 и 2039), центрированные на 5.01 и 2.02.2006 г. соответственно.

На рисунке 3а, б карты фотосферных источников соответственно на середину интервала (CR 2047, 7.09.2006 г.) и его конец (CR 2056, 10.05.2007 г.), по достижении точки минимума между 23-м и 24-м циклами.

В самом начале интервала (CR2038) наблюдалась (рис. 2а) двухсекторная структура с некоторой преимущественной концентрацией КОМПС в восточных окрестностях зоны активных долгот ($OR1^-$). Но уже на следующем обороте (CR 2039, рис. 2б) произошла мощная эжекция новых полей КОМПС как в зоне активных долгот и ее восточных окрестностях ($OR1^-$, $OR2^-$), так и в центре ($OR3^-$) и в южном полушарии ($OR1^+$), вблизи восточных границ зоны. Это сопровождалось возникновением новой 4-секторной структуры.

Взаимодействия $OR1^-$, $OR2^-$ и $OR1^+$, $OR2^+$ $OR3^+$ определяли структуру и динамику КОМПС, в частности, существование 4-секторной структуры, медленно дрейфующей на запад в течение всего интервала (пример на рис. 3а). Это взаимо-

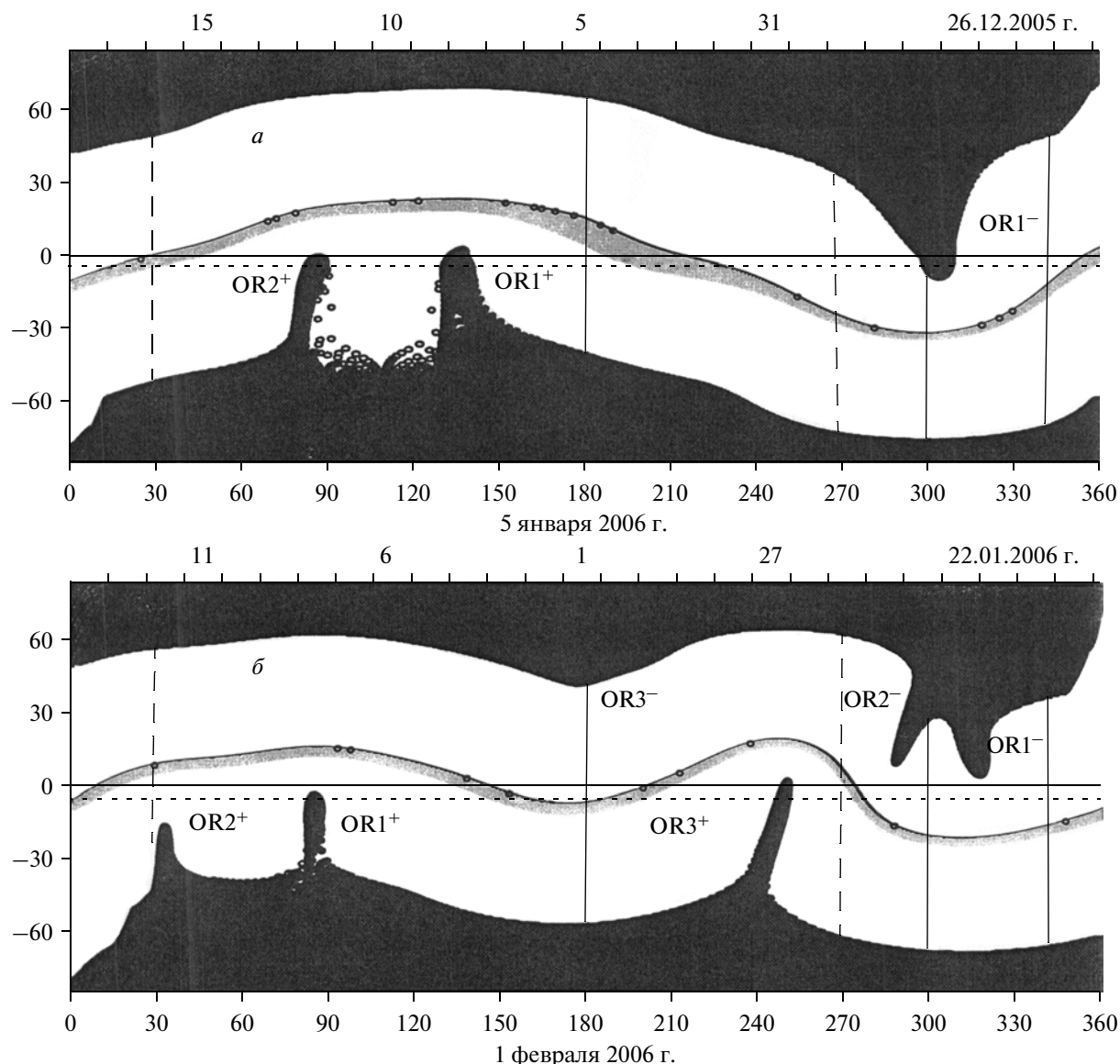


Рис. 2. Карты фотосферных источников КОМПС (зачернение), совмещенные с Гелиосферным Токовым Слоем (кривые) на поверхности источника ($2.5R_{\odot}$ от центра Солнца) (OR – Open Region); вертикальные линии: сплошные – границы зоны активных долгот, прерывистые – границы восточных и западных окрестностей зоны на начало заключительного квазидвухлетнего интервала 23-го цикла. *a* – CR 2038; *b* – CR 2039.

действие привело к вытеснению $OR1^-$ и $OR2^-$ в западные окрестности зоны активных долгот и их диссипации к концу интервала. В итоге возникла относительно стабильная ситуация (рис. 3б), послужившая основанием для определения опорной точки минимума на обороте CR 2056.

Выбор этой точки минимума подтверждается динамикой КОМПС на рис. 1: именно после этого оборота наступила существенная стабилизация как абсолютных значений магнитных потоков КОМПС, так и уменьшения амплитуды их флуктуаций, что и наблюдалось вплоть до перехода к фазе роста (CR 2090, 23.11.2009 г.).

5. ФАЗА МИНИМУМА 24-ГО ЦИКЛА: СТРУКТУРА ФАЗЫ И ДИНАМИКА КОМПС

Фаза минимума 24-го цикла: CR 2056–2090, 05.2007 г.–11.2009 г., квазидвухлетний интервал продолжительностью 30 месяцев. В динамике глобальных потоков КОМПС эта фаза выделяется относительно стабильным средним уровнем абсолютных значений, небольшим трендом в сторону уменьшения и относительно низким значением амплитуды их флуктуаций (рис. 1).

Мы обращаем внимание на следующие свойства структуры и динамики этой фазы:

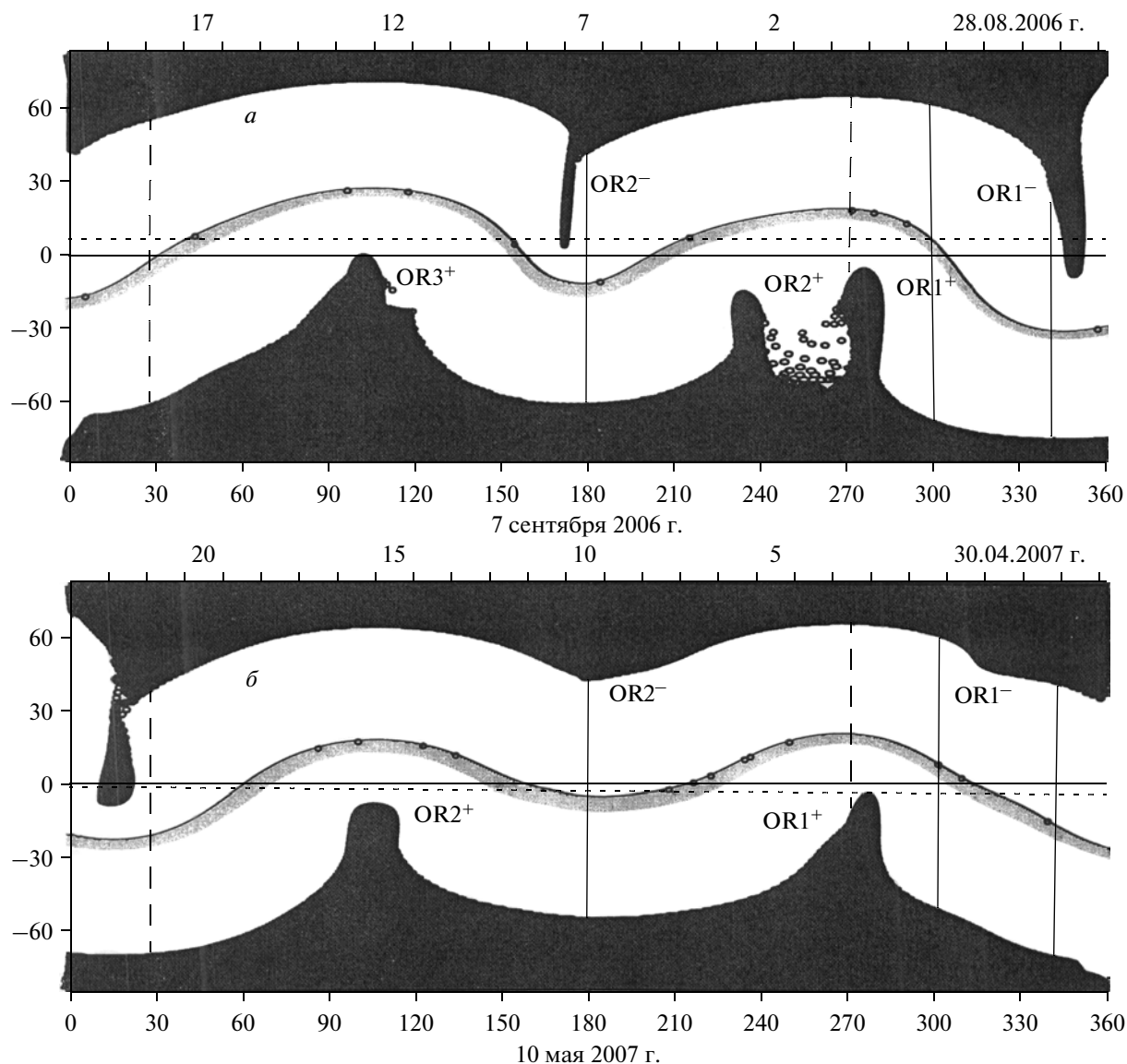


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но: *a* – типичный пример 4-х секторной структуры, дрейфующей на запад в течение всего заключительного интервала 23-го цикла; *б* – опорная точка (CR 2056) фазы минимума 24-го цикла.

1. Общий дрейф всех фотосферных источников КОМПС (открытых областей – OR) на запад, в направлении вращения Солнца, в течение всей фазы:

2. Двухсекторная структура КОМПС, за исключением 4-секторной и мультисекторной соответственно (CR 2057–2060 и 2083–2088), в течение всей фазы.

3. Наличие в структуре и конфигурации КОМПС 3-х последовательных по времени, но неравных по продолжительности периодов:

a. Начиная от опорной точки минимума (CR 2056, 10.05.2007 г., рис. 3б), со следующего оборота (CR 2057) до CR 2063 (06.11.2007 г.), возникновение новых, дрейфующих на запад OR в север-

ном полушарии – в зоне активных долгот (300–340 CL) и в центральной каррингтоновской зоне (вблизи 180 CL), и их соответственно ослабление (до полной диссипации) и усиление в южном полушарии – на границе восточных окрестностей зоны активных долгот и к востоку от центрального меридиана (60–150 CL) соответственно с ослаблением и усилением. Типичный пример ситуации в этот период представлен на рис. 4а (CR 2060, 28.08.2007 г.)

б. Начиная от CR 2063 (11.2007 г.) до CR 2082 (04.2009 г.) простая конфигурация из двух взаимодействующих OR: северной и южной (пример CR 2074, 09.2009 г., рис. 4б) с их полной диссипацией, вначале южной (CR 2079, 01.2009 г.), а затем и северной (CR 2083, 05.2009 г.).

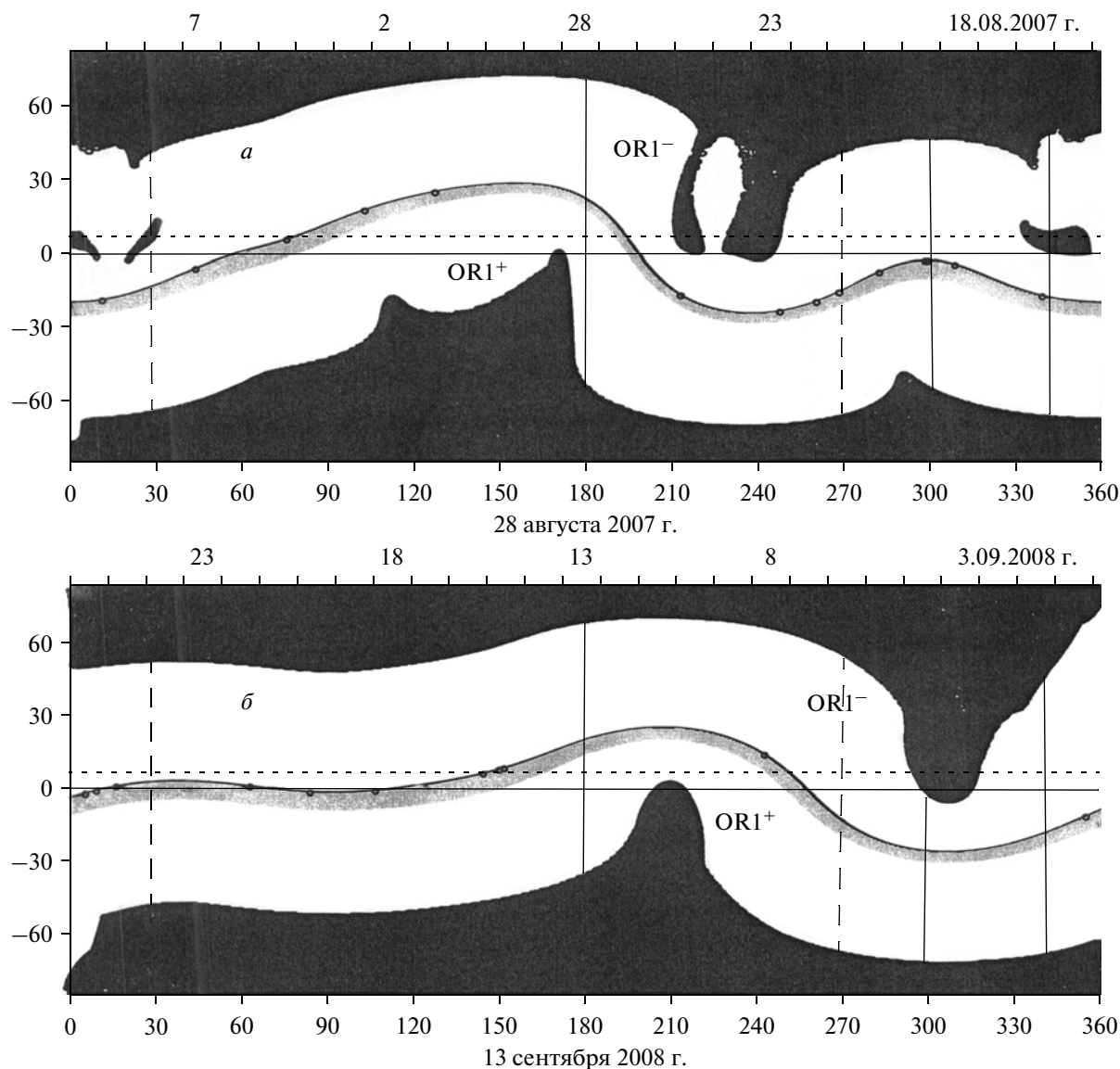


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но: *а* – типичная ситуация 1-го периода фазы минимума (CR 2060) с возникновением сложных структур КОМПС, дрейфующих на запад; *б* – типичный пример (CR 2074) простой, дрейфующей на запад, структуры 2-го периода фазы минимума.

в. Почти полная концентрация фотосферных источников КОМПС на полюсах Солнца (CR 2083–2088, 05.–09.2009 г.); пример – рис. 5*а* (CR 2088), которая вскоре прерывается с началом фазы роста (опорная точка – CR 2090, 23.11.2009 г.)

6. ФАЗА РОСТА 24-ГО ЦИКЛА: СТРУКТУРА ФАЗЫ И ДИНАМИКА КОМПС

Фаза роста 24-го цикла, между опорными точками перехода от фазы минимума к фазе роста (11.2009 г., CR 2090) и от фазы роста к фазе минимума (06.2012 г., CR 2124) – квазидвухлетний интервал продолжительностью 29 месяцев.

Опорные точки идентифицируются соответственно по резкому возрастанию флуктуаций аб-

солютных значений глобальных магнитных потоков КОМПС и по резкому уменьшению абсолютных значений Φ (рис. 1).

Фазу роста можно разделить на три последовательных почти равных периода по различию сочетаний средних за период значений этих потоков Φ и отклонений от среднего $\Delta\Phi$ (рис. 1):

1. 11.2009 г.–08.2010 г., CR 2090–2100, $\Phi \approx (1.85 \pm 0.5) \times 10^{22}$ мкс, 9 месяцев
2. 09.2010 г.–08.2011 г., CR 2101–2113, $\Phi \approx (1.3 \pm 0.2) \times 10^{22}$ мкс, 11 месяцев
3. 09.2011 г.–05.2012 г., CR 2113–2123, $\Phi \approx (1.4 \pm 0.4) \times 10^{22}$ мкс, 8 месяцев.

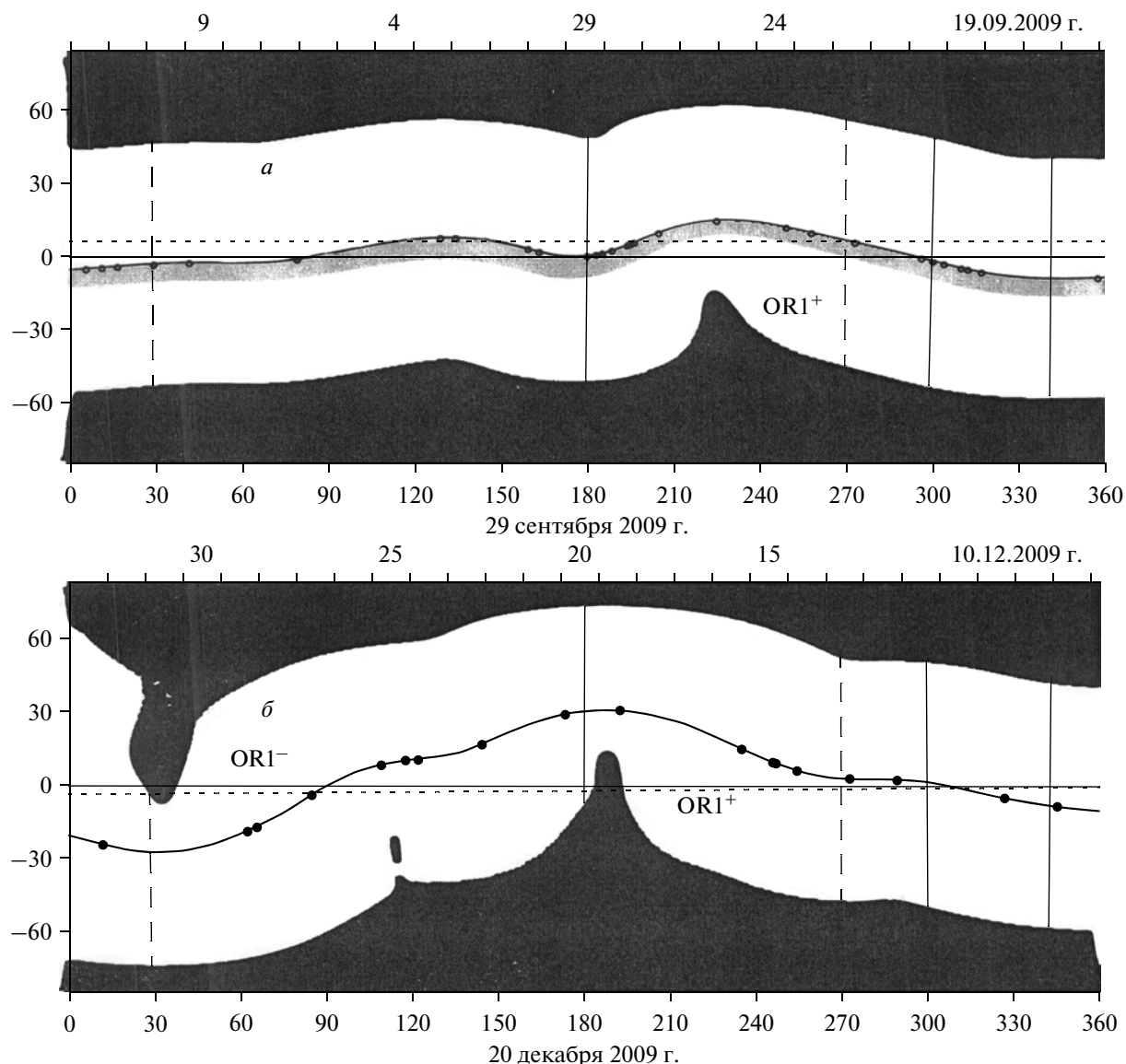


Рис. 5. То же, что и на рис. 2, но: *a* – почти полная концентрация на полюсах фотосферных источников КОМПС (CR 2088) перед концом фазы минимума, *б* – возникновение в начале фазы роста (CR 2091) мощных, протяженных от полюсов до экватора, структурных элементов КОМПС: $OR1^-$ и $OR1^+$.

6.1. Первый период фазы роста

Обращают на себя внимание следующие свойства КОМПС этого периода:

6.1.1. Возникновение (рис. 5*б*) в самом начале периода мощных протяженных от полюсов до экватора структурных элементов КОМПС: в северном полушарии – в восточных и западных окрестностях зоны активных долгот $OR1^-$, $OR2^-$; в южном полушарии – вблизи центрального меридиана $OR1^+$, $OR2^+$.

6.1.2. Обращение сверхтвёрдотельного вращения КОМПС (на запад), наблюдавшегося в течение всей фазы минимума (разд. 5), через три оборота после опорной точки роста, на устойчивое вращение в восточном направлении, начиная с марта 2010 г. (CR 2104).

6.1.3. Усложнение конфигурации КОМПС после смены направления вращения: возникновение вместо 2-секторной сначала 4-х, а затем и мультисекторной структуры.

6.1.4. К концу периода сильная концентрация КОМПС в южной части зоны активных долгот и ее окрестностях.

6.2. Второй период фазы роста

Обращают на себя внимание следующие свойства КОМПС этого периода:

6.2.1. В самом начале периода в структуре КОМПС в зоне активных долгот и ее восточных окрестностях возникли две новые протяженные от полюсов до экватора и дрейфующие на восток

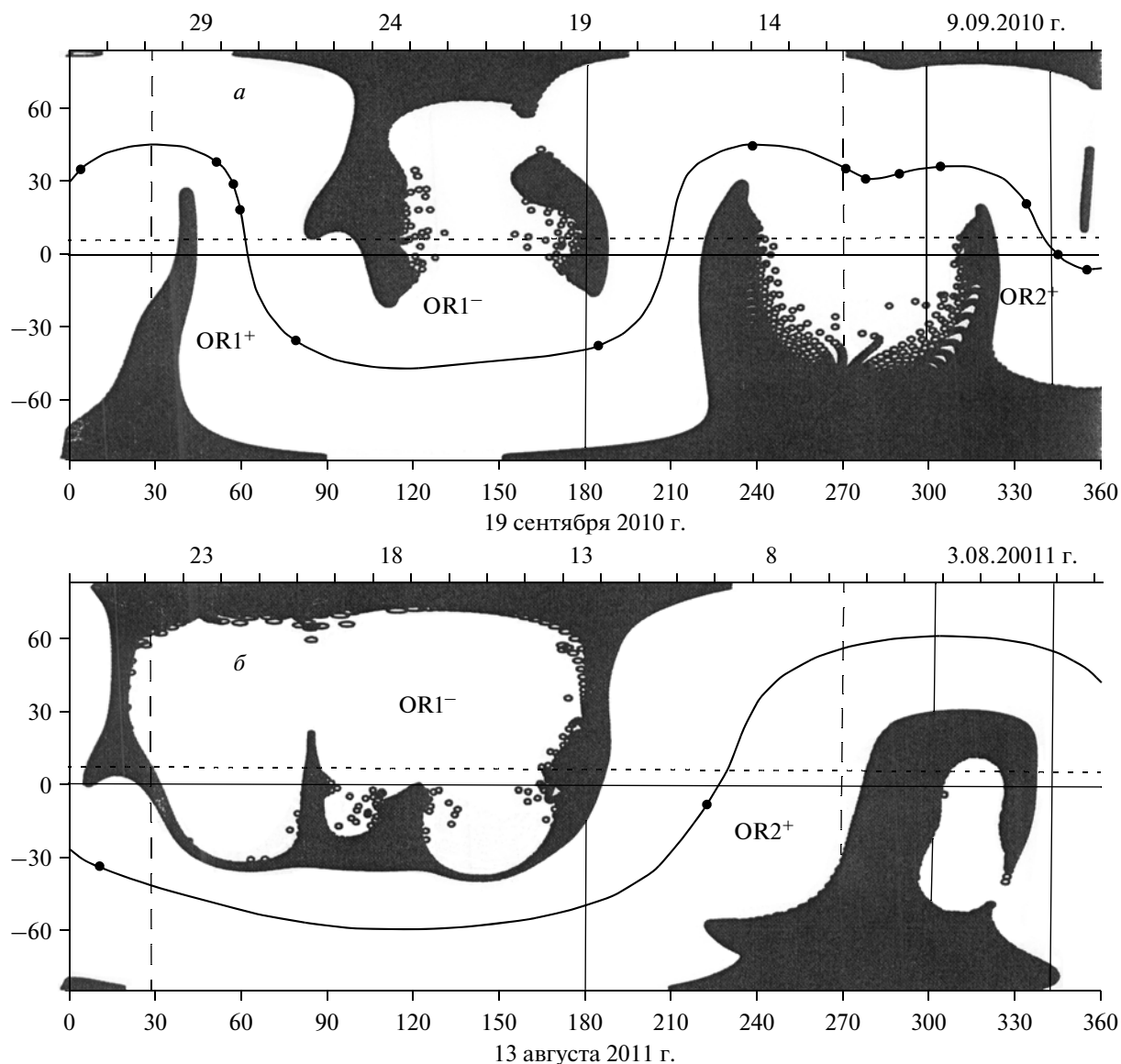


Рис. 6. То же, что и на рис. 2, но: возникновение, начиная со 2-го периода фазы роста сложных. *a* – полузамкнутых (CR 2101) и *б* – замкнутых (CR 2123) конфигураций КОМПС.

открытые области, вначале на юге (10.2010 г., CR 2102), а затем – на севере (12.2010 г., CR 2104). Их блокировка на существовавшей ранее OR восточнее ЦМ предопределила всю последующую структуру, динамику и конфигурацию КОМПС этого периода.

6.2.2. Впервые с начала 24-го цикла вращения КОМПС стало нестационарным – трижды за период изменялось направление.

6.2.3. Почти синхронно с изменением направления вращения изменялась и структура КОМПС, пока не превратилась из сложной мультисекторной, как в предыдущем периоде, в простую 2-секторную в конце периода (05.–08. 2011г., CR 2110–2113).

6.2.4. В этом периоде стали возникать OR очень сложных конфигураций, вначале полузамкнутые (рис. 6*a*, CR 2101), а затем и замкнутые (рис. 6*б*, CR 2123).

6.3. Третий период фазы роста

6.3.1. С самого начала 3-го периода возникает и существует в течение всего периода 4-секторная структура КОМПС.

6.2.2. Вращение КОМПС имеет восточное направление в течение всего периода.

6.3.3. Наблюдалось усиление открытых областей при прохождении ими зоны активных дол-

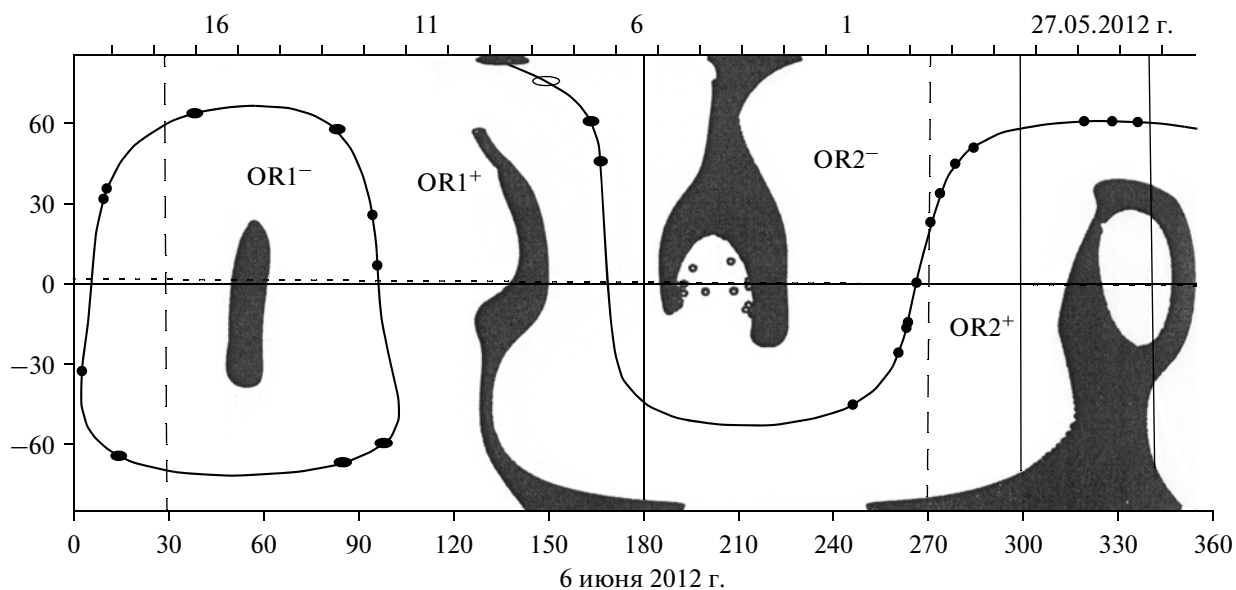


Рис. 7. То же, что и на рис. 2, на начало переплюсовки КОМПС в фазу максимума 24-го цикла (CR 2124) прорывом на Северный полюс полей южной полярности из южной полусферы.

гот: сначала северной OR^- (02.2012 г., CR 2120), затем южной OR^+ (04.2012 г., CR 2122).

6.3.4. Опорная точка между фазами роста и максимума идентифицирована по прорыву OR^+ (06.2012 г., CR 2124) к Северному полюсу Солнца (рис. 7а): в динамике глобальных магнитных потоков – по резкому спаду (рис. 1) Φ от $\sim 1.40 \times 10^{22}$ до $\sim 0.5 \times 10^{22}$ мкс.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

1. В этой статье впервые детально, с шагом в один солнечный оборот, прослежена динамика абсолютных значений крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца (КОМПС) за столь длительный период в 95 оборотов (CR 2038–2133). Этот период (01.2006 г.–02.2013 г.) охватывает заключительный квазидвухлетний интервал 23-го, фазы минимума, роста и начало фазы максимума текущего 24-го цикла соответственно: 01.2006 г.–05.2007 г., CR 2038–2056, 17 месяцев; 05.2007 г.–11.2009 г., CR 2056–2090, 30 месяцев; 11.2009 г.–05.2012 г., CR 2090–2123, 30 месяцев; 05.2012 г.–02.2013 г., CR 2014–2033, 8 месяцев.

2. Впервые опорные точки фаз минимума и роста, на примере текущего 24-го цикла, определены по абсолютным значениям глобального Φ магнитного потока КОМПС и с высокой точностью в один оборот.

3. Введено уточняющее представление о начальной опорной точке минимума, отделяющей заключительный интервал спада предыдущего цикла от начала фазы минимума следующего цикла, и основанное на динамике Φ . Эта точка уверенно идентифицируется

по резкому уменьшению флуктуации Φ , наблюдавшемуся в течение всей фазы минимума до опорной точки перехода от фазы минимума к фазе роста (рис. 1).

4. Показано, что абсолютное значение Φ резко уменьшилось на опорных точках на фазах минимума, роста и далее при переходе к фазе максимума соответственно до значений $\sim (2; 1.25; 0.75) \times 10^{22}$ мкс.

5. Подтверждается математическая модель солнечного цикла как последовательности квазидвухлетних интервалов и предположение, что эта последовательность обусловлена динамикой КОМПС [Кононович и Шефов, 2006]. Действительно, за рассмотренный период выявляются три квазидвухлетних периода (см. пункт 1), продолжительностью в 17, 30 и 30 месяцев, и что замечательно, соответствующих заключительному интервалу 23-го цикла, фазам минимума и роста 24-го.

6. В течение всей фазы минимума 24-го цикла (30 месяцев) фотосферные источники КОМПС и его секторная структура на поверхности источника вращались в западном направлении.

7. Через три оборота после начала фазы роста произошла смена направления дрейфа КОМПС с западного на восточный (CR 2093), и это направление удерживалось, включая (CR 2105), т.е. часть 2-го периода. Затем до конца этого периода произошло четыре смены направления, и в третьем периоде (CR 2114–2123) окончательно, до начала фазы максимума, установилось вновь восточное направление.

8. Заметим, что продолжительность фазы минимума 24-го цикла (30 месяцев) почти в точно-

Циклический ход открытых полей в 21–22-ом [Obridko and Shelting, 1999], 23-м [Иванов и Харшиладзе, 2004] и 24-м (эта статья)

№№ циклов	Фазы, CR			
	Минимум $t_{\min}-t_{mA}$	Роста $t_{mA}-t_{AM}$	Максимум $t_{AM}-t_{MD}$	Спад $t_{MD}-t_{Dmin}$
21	1642–1660	1660–1680	1680–1714	1714–1750
22	1778–1800	1800–1813	1813–1840	1840–1875
23	1904–1919	1919–1943	1943–1963	1963–2038
24	2056–2090	2090–2124	2124–2132	

сти совпадает с продолжительностью (3 года) 1-й стадии 19-го цикла (1952 г.–1955 г.) до возникновения 2-ой стадии – появления солнечных пятен [Babcock, 1961].

Указанные выше результаты, на наш взгляд, имеют значение, прежде всего, для уточнения фундаментальных представлений о фазе минимума любого 11-летнего цикла. Следует принять за фазу минимума по классической работе Babcock [1961] 1-ую стадию закручивания магнитного поля Солнца, его усиления до способности генерировать солнечные пятна. В современных терминах это фаза минимума, в течение которой происходит усиление КОМПС из-за воздействия на него дифференциального вращения плазмы конвективной зоны.

Замечательно, что продолжительность этой фазы по всей видимости универсальна – равна одному квазидвухлетнему интервалу, что в 19-м цикле (3 года), что в 24-м (30 месяцев).

На первый взгляд это тривиальный вывод. Однако известно, что опорные точки минимума в различных явлениях солнечной активности наблюдаются, как правило, в различные моменты времени [Витинский и др., 1986]. Например, это было так как в различных излучениях, индексах активности, динамике старых и новых активных областей, конфигурации КОМПС в минимуме между 22-м и 23-м циклами [Ogawa et al., 1998; Warden et al., 1998; Harvey and White, 1999; Altrock et al., 1999; Vumba et al., 2000; Иванов и Харшиладзе, 2004]. Однако, поскольку первопричиной большинства разнообразных проявлений солнечной активности является динамика КОМПС, то было бы естественно определять минимум активности по какой-либо характеристике КОМПС, придавая этому минимуму более фундаментальное значение, чем частным минимумам в разнообразных излучениях и индексах, являющихся следствием динамики КОМПС. Первая попытка определить опорную точку минимума между 23-м и 24-м циклами была предпринята в работе [Иванов и Харшиладзе, 2008]. Однако, в этой работе мы располагали ограниченными определениями абсолютных значений Φ в КОМПС, кроме того,

исходили из ошибочных представлений о циклической динамике КОМПС. Тем не менее, эта опорная точка была идентифицирована на обороте CR 2054 (04.2007 г.), что близко определению данной работы (CR 2056, 05.2007 г.).

То обстоятельство, что вопрос о фундаментальном и частных определениях фазы минимума и их продолжительностях заслуживает специального внимания следует также из предыдущего опыта качественного, без учета абсолютных значений, рассмотрения динамики КОМПС в 21–23-м циклах, в работах [Obridko and Shelting, 1999; Иванов и Харшиладзе, 2004].

В таблице указаны продолжительности фаз в CR минимума $t_{\min}-t_{mA}$, роста $t_{mA}-t_{AM}$, максимума $t_{AM}-t_{MD}$, и спада $t_{MD}-t_{Dmin}$ в 21-м и 22-м циклах по работе [Obridko and Shelting, 1999] и 23-м цикле КОМПС по работе [Иванов и Харшиладзе, 2004]. t_{mA} , t_{AM} , t_{MD} , t_{Dmin} – обозначения точек, между которыми расположены эти фазы.

Продолжительности фаз минимума соответственно 18, 22 и 15 CR, что слишком мало для продолжительности минимума в указанном выше фундаментальном смысле по работе [Babcock, 1961] и по рис. 1. Это значит, что необходимо исследование динамики абсолютных значений Φ , подобной рис. 1, не только для 24-го, но и предыдущих циклов, чтобы прийти к единому представлению о продолжительности фазы минимума порядка 30 CR, необходимых для усиления КОМПС дифференциальным вращением, причем, заметим, модифицированным дифференциальным вращением, согласно пунктам 6 и 7 приведенных выше результатов.

Дело в том, что еще Levine [1982] отметил, что в минимуме 21-го цикла КОМПС вовлекалось не в дифференциальное, а в квазитвердотельное вращение Солнца. В текущем 24-м цикле, как следует из результатов данной работы, КОМПС в течение фазы минимума вращалось в западном направлении (сверхквазитвердотельно), а в фазе роста – по преимуществу – в восточном. Поскольку несомненный физический смысл фазы минимума – усиление КОМПС из-за закручивания силовых линий нерегулярным дифференци-

альным вращением, как это предполагалось Вабсока [1961], и назовем его модифицированным дифференциальным вращением.

Поле скоростей этого вращения должно быть столь же разнообразно, как карты КОМПС (рисунки 2–7), и его моделирование необходимо для разработки теории усиления поля путем его закручивания в фазу минимума. Кроме того, можно сделать предположение, что поскольку в 24-м цикле в фазу минимума КОМПС вращалось сверхтвердительно, то разность скоростей в модифицированном вращении была уменьшенной по сравнению с регулярным вращением, поэтому меньше закручивание поля, запасенная энергия и величина максимума активности этого цикла.

Основание для этого предположения возникает из оценок, аналогичных оценкам, сделанными Вабсока [1961] в его модели 1-й и 2-й стадии солнечного цикла.

По Вабсоку 2-я стадия – это закручивание и усиление регулярным дифференциальным вращением на широтах $\pm 55^\circ$ подфотосферного магнитного поля, имеющего модельную аппроксимацию.

$$H_\varphi = H_0 \sec \varphi (-30^\circ < \varphi < 30^\circ), \quad (1)$$

где $H_0 = 5$ Гс – поле на экваторе.

Регулярное дифференциальное вращение вида

$$\omega = 14.38^\circ - 2.77^\circ \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

согласно этой модели позволяет силовым линиям на экваторе закрутиться больше, чем на широтных кругах $\varphi = |55^\circ|$ на величину, равную в радианах

$$\Theta = 17.6(n + 3) \sin^2 \varphi, \quad (3)$$

или в градусах

$$\Theta = 1010^\circ (n + 3) \sin^2 \varphi. \quad (4)$$

В скобках стоит время закручивания в годах: от начала цикла до появления первых высокоширотных пятен, равное 3-м в модели Вабсока, и n – время закручивания после появления этих пятен.

Вабсока разрабатывал свою модель применительно к 19-му циклу, с началом в 1952 г. и появлением первых пятен в 1954 г., поэтому принял 3 года закручивания первых пятен и n – после появления.

В принятых нами представлениях и терминах 3 года закручивания – это время минимума между соответствующими опорными точками, которое равнялась в 24-ом цикле квазидвухлетнему интервалу продолжительностью 30 месяцев (05.2007 г. – 11.2009 г.). Поэтому 3 первых года 19-го цикла у Вабсока это – фаза минимума 19-го цикла, и при $n = 0$ имеем согласно (3–4)

$$\Theta = 17.6 \cdot 3 \sin^2 \varphi, \quad \Theta = 1010^\circ \cdot 3 \sin^2 \varphi. \quad (5)$$

Далее по Вабсоку, но только для фазы минимума ($n = 0$), угол ψ спиральной силовой линии с меридианом

$$\tan \varphi = \frac{d\theta}{d\gamma} = 35 \times 2(3) \sin \varphi \cos \varphi. \quad (6)$$

Поскольку поле в спирали

$$H = H_0 \sec \varphi \sec \psi, \quad (7)$$

а угол ψ достаточно большой, то

$$H = H_0 \sec \varphi \tan \psi = 10.56 H_0 \sin \varphi, \quad (8)$$

и при $H_0 = 5$ Гс

$$H = 528 \sin \varphi (2^\circ < \varphi < 30^\circ). \quad (9)$$

Следовательно, после трех лет фазы минимума (в нашей терминологии) магнитное поле на $\varphi = 30^\circ$ достигнет величины $H = 264$ Гс, появляются первые, пока очень слабые, пятна.

Вабсока определяет эту величину поля как критическую, необходимую для возникновения слабых пятен. Чтобы такие пятна возникли и на меньших широтах он допускает продолжение закручивания поля вне трехлетнего интервала ($n \neq 0$) в выражениях (3–9), и тогда следует ожидать возникновение критических полей $H = 264$ Гаусс последовательно на все меньших широтах в соответствии с формулой

$$\sin \varphi = \pm \frac{1}{n + 3}. \quad (10)$$

В модели Вабсока 19-го цикла закручивание допускается в конечном итоге в течение 6-ти лет (1952–1957 гг.), т.е. по нашей терминологии не только в фазу минимума, но и в фазу роста (Вабсока, 1961, рис. 4). Максимальное усиление при этом достигается к концу периода и только на $\varphi = 30^\circ$, при $n = 3$ в (3–4) величина $H_{\max} = 528$ Гс, и этого оказывается недостаточно, чтобы объяснить без дополнительной гипотезы сильные поля ~ 1000 – 2000 Гс, наблюдающиеся в это время. Такой гипотезой у Вабсока становится гипотеза о локальных неоднородностях дифференциального вращения, генерирующих ввиду неустойчивости магнитные жгуты, всплывающие на поверхность конвективной зоны Солнца.

Разумеется модель Вабсока по существу полученных им результатов представляет скорее исторический интерес, но на наш взгляд, остается вполне актуальной по поставленным в ней проблемам, на которые до сих пор нет вполне ясных и окончательных ответов.

Непреодолимое значение имеют следующие общие положения: 1. Об усилении магнитного поля путем его закручивания полем скоростей конвективной зоны. 2. О существовании трехлетнего интервала от начала цикла до появления первых солнечных пятен. 3. Тенденция зарождения пятен на средних широтах и их миграция к экватору. 4.

Уменьшение величины магнитного поля перед сменой его полярности.

На наш взгляд, разработка полной количественной МГД-теории солнечного цикла требует полного и детального рассмотрения динамики КОМПС и соответствующего поля скоростей конвективной зоны, а также порождаемых этой динамикой комплексов явлений солнечной активности (пятна, волокна, СМЕ).

Наконец, нельзя не допускать управляющего влияния на динамику КОМПС планет солнечной системы, ее бароцентра, делающую эту динамику квазидетерминированной.

Что касается результатов, полученных нами в данной статье по разработке численной модели динамики КОМПС в первой половине 24-го цикла, то хотелось бы обратить внимание на следующее:

1. Подтверждается существование в начале цикла КОМПС 3-х летнего интервала до появления новых пятен (фазы минимума). Однако в эту фазу исходное поле имеет относительно сложную структуру и конфигурацию, вращается сверхквazitвердотельно в западном направлении по направлению вращения Солнца.

2. По завершении фазы минимума наблюдался следующий квазидвухлетний интервал — фаза роста, и не просто слабые пятна, а в том числе и достаточно мощные комплексы активности. Это является следствием миграции КОМПС к экватору (рис. 6а, б) его дальнейшей дискретизации, возникновения межсекторного взаимодействия, в том числе блокировок модифицированного дифференциального вращения. В эту фазу вращения КОМПС становится по преимуществу в направлении, противоположном вращению Солнца.

3. Абсолютное значение Φ почти синхронно скачкообразно уменьшается с точностью в несколько оборотов с началом фаз минимума, роста и максимума (рис. 1).

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Исследована динамика абсолютных значений Φ глобального потока крупномасштабного магнитного поля Солнца (КОМПС) в 2006–2012 гг., с шагом в один оборот.

2. Определены опорные точки и продолжительности квазидвухлетних интервалов: заключительного интервала 23-го цикла, фаз минимума, роста и начала фазы максимума 24-го.

3. Показано, что абсолютные значения Φ резко уменьшались в началах фаз минимума, роста и максимума соответственно до значений $\sim (2; 1.25; 0.75) \times 10^{22}$ мкс.

4. В течение всей фазы минимума КОМПС вращалось сверхквazitвердотельно, в западном

направлении; в фазе роста произошла смена направления на преимущественно восточное.

5. Переполюсовка КОМПС в текущем 24-м цикле началась в мае–июне 2012 г. (CR 2123–2124), прорывом полей южной полярности из южной полусферы Солнца.

6. Подтверждается положение, что солнечный цикл — это непрерывная последовательность квазидвухлетних интервалов КОМПС, в частности, фазы минимума и роста — это интервалы, характеризующиеся противоположными направлениями вращения КОМПС соответственно сверхквazitвердотельным (скручиванием) и раскручиванием, с одинаковыми, по крайней мере в 24-м цикле, продолжительностями.

Благодарим сотрудников Wilcox Solar Observatory за данные о магнитном поле Солнца, А.И. Завойкину — за помощь в подготовке статьи.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН VI.15 “Плазменные процессы в солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Витинский Ю.И., Куклин Г.В., Обридко В.Н.* Об основных фазах солнечного цикла // Солнечные данные. № 3. С. 53–60. 1986.
- *Иванов К.Г.* Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3–10 ноября 2004 г. 1. Динамика поля и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 3. С. 298–310. 2010а.
- *Иванов К.Г.* Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3–10 ноября 2004 г. 2. “Взрыв” “сингулярности”, динамика пятнообразования и энерговыделения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 6. С. 723–738. 2010б.
- *Иванов К.Г.* Первые солнечно-земные бури 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 3. С. 308–314. 2013.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* Динамика открытого магнитного поля Солнца в 1996–2003 гг. и ее особенности в зоне главных активных долгот // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 6. С. 723–733. 2004.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* Солнечно-земные бури 2003 г. 2. Пятифазная динамика бури 28–30 октября // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 831–847. 2007.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* Межсекторный дисбаланс потоков крупномасштабного открытого поля Солнца, активные и пассивные границы и солнечно-земные экстрабури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 605–622. 2008.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* МГД-природа возникновения, динамики, геоэффективности и исчезновения четырехсекторной структуры магнитного поля Солнца на фазе спада 23-го цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 291–307. 2009.

- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* Динамика солнечной активности и аномальной погоды лета 2010 г. 1. Секторные границы: становление и разрушение антициклона // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 450–455. 2011.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф.* Динамика солнечной активности и аномальной погоды лета 2010 г. 2. Связь с зоной активных долгот, эффекты на западе и востоке Европы // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 52. № 1. С. 3–17. 2012.
- *Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф., Мельник А.Н.* Медленная динамика открытых силовых линий как индикатор подфотосферных взаимодействий, ее связь с явлениями солнечной активности и околоземными возмущениями: 1. События июля–октября 1999 г. // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 41. № 6. С. 723–733. 2001.
- *Кононович Э.Ф., Шефов Н.Н.* Некоторые закономерности вариаций солнечной активности в течение 11-летнего цикла // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 46. № 6. С. 723–727. 2006.
- *Харшиладзе А.Ф., Иванов К.Г.* Сферический гармонический анализ магнитного поля Солнца // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 22–27. 1994.
- *Altrock R.C., Rubanek M., Rušin V., Minarovjech M.* Determination of the solar minimum period between cycles 22 and 23 from the coronal index of solar activity // Solar Phys. V. 184. № 2. P. 317–322. 1999.
- *Babcock H. W.* The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. V. 133. № 2. P. 572–586. 1961.
- *Bumba V., Garcia A., Klyana M.* Longitudinal distribution of solar magnetic fields and activity during ending and starting periods of activity cycles // Solar Phys. V. 196. № 2. P. 402–419. 2000.
- *Chapman S., Bartels J.* Geomagnetism. Oxford: Oxford University Press. 542 p. 1940.
- *Harvey K.L., White O.R.* What is solar cycle minimum? // J. Geophys. Res. V. 104. NA9. P. 19759–19764. 1999.
- *Levine R.H.* The relation of open magnetic structures to solar wind // J. Geophys. Res. V. 83. № A9. P. 4193–4202. 1978.
- *Levine R.H.* Open magnetic field and the solar cycle. 1. Photosphere sources of open magnetic flux // Solar Phys. V. 79. № 9. P. 203–212. 1982.
- *Levine R.H., Altschuler M.D., Harvey J.W., Jackson B.V.* Open magnetic structures on the Sun // Astrophys. J. V. 215. № 2. P. 636–651. 1977a.
- *Levine R.H., Altschuler M.D., Harvey J.W.* Solar sources of interplanetary magnetic field and solar wind // J. Geophys. Res. V. 82. P. 1061–1065. 1977b.
- *Newkirk K.G., Altschuler M.D.* Magnetic fields and structure of solar corona // Solar Phys. V. 9. №. P. 131–149. 1969.
- *Obridko V.N., Shelting B.D.* Structure and cycle variations open magnetic field in the Sun // Solar Phys. V. 187. № 1. P. 185–205. 1999.
- *Ogawa H.C., Judge D.L., McMillin D.R., Gangopadhyay P., Galvin A.V.* First year continuous solar EUV irradiance from SOHO by the CELIAS/SEM during 1996 solar minimum // J. Geophys. Res. V. 103. № 1. P. 1–6. 1998.
- *Wardon J.R., White O.R., Woods T.N.* Evolution of chromospheric structures derived from CaIIk spectrograms: effects on solar ultraviolet irradiance variability // Astrophys. J. V. 496. № 2. Pt. 1. P. 998–1014. 1998.