

УДК523.98

Высотная стратификация магнитных полей на Солнце в 23 цикле

В.Г. Файнштейн², Н.Н. Степанян¹, З.С. Ахтемов¹, Г.В. Руденко², Е.В. Силакова¹

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
nataly@crao.crimea.ua

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, Россия
vfain@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 15 октября 2010 г.

Аннотация. По измерениям фотосферного магнитного поля старым KPNO и новым (SOLIS, NSO) магнитографами (США) для 23 цикла (1997–2009 гг.) была рассчитана в потенциальном приближении радиальная компонента магнитного поля B_r на расстояниях от поверхности Солнца до поверхности источника и построены синоптические карты B_r на нескольких высотах.

По этим картам были определены характеристики крупномасштабных структур с “+” полярностью и “–” полярностью магнитного поля на семи высотах в атмосфере Солнца от уровня фотосферы ($H = R_o$) до $H = 2.5 R_o$ (R_o – радиус Солнца).

Прослежены процесс реполюсовки полярных полей и изменение секторной структуры поля на средних широтах. Определены характерные времена их жизни и вращение. Определена общая картина изменения крупномасштабного магнитного поля на Солнце в течение 23 цикла активности. Выявлены два типа границ структур магнитного поля на разных высотах.

HEIGHT STRATIFICATION OF SOLAR MAGNETIC FIELDS IN CYCLE 23, *by V.G. Fainshtein, N.N. Stepanian, Z.S. Akhtemov, G.V. Rudenko, E.V. Silakova.* We used observations of the photospheric magnetic field with an old magnetograph of the Kitt-Peak observatory (KPNO) and with a new magnetograph SOLIS of the National Solar Observatory in the USA (NSO) for cycle 23 (1997–2009). The radial component B_r of the magnetic field was determined in the potential approximation and synoptic maps of B_r were constructed for a few heights in the solar atmosphere. Parameters of “+” and “–” of the large-scale structures of the magnetic field were determined at seven heights of H from the photosphere ($H = R_o$) to $H = 2.5 R_o$ (R_o is the solar radius). The process of changing sign of the polar field was traced. The change of sectoral structures in middle latitudes was studied. The general picture of variations of the large-scale solar magnetic field during cycle 23 was described. Two types of boundaries of the large magnetic structures were found.

Ключевые слова: Солнце, магнитное поле, крупномасштабные структуры

1 Введение

Исследованию магнитного поля на Солнце всего 103 года. В 1908 году Дж. Хейл обнаружил и измерил магнитное поле в солнечных пятнах (Хейл, 1908). Изучение распределения магнитного

поля по поверхности Солнца было начато Г.В. и Г.Д. Бэбкоками (Бэбкок, 1955). Авторы показали наличие полярных полей и двух типов областей на низких широтах – биполярных (BMR) и униполярных (UMR). Бэбкок высказал предположение о связи магнитных полей активных областей с общим магнитным полем Солнца (Бэбкок, 1961 а, б). В дальнейшем крупномасштабное солнечное магнитное поле подробно рассматривалось Говардом и Бумбой по наблюдениям с магнитографом обсерватории Маунт-Вилсон (Бумба, Говард, 1965). Крупным этапом в исследовании этого поля было создание Говардом и др. (1967) прекрасного атласа фотосферных магнитных полей на всем диске Солнца по наблюдениям 1959–1966 гг. Подробный обзор результатов, полученных с помощью этого атласа, сделан в работе (Бумба, 1979).

Открытие межпланетного магнитного поля, его секторной структуры и связи с солнечными полями – следующий этап в исследованиях крупномасштабных полей на Солнце (Северный и др., 1970; Шеррер и др., 1977). За последние 50 лет исследовались различные аспекты крупномасштабных полей на Солнце. Назовем монографию “Вариации глобальных характеристик Солнца” (1992). В 2001 г. в ГАО РАН, Пулково, была проведена очень представительная конференция “Солнце в эпоху смены знака магнитного поля”. На ней было представлено много работ, касающихся эволюции крупномасштабных полей. В основном, все эти работы относятся к области фотосферы.

Данная статья начинает серию работ, посвященных выяснению связи эволюции солнечных магнитных образований с характеристиками места их возникновения.

Определимся с принятой нами терминологией. Солнечное магнитное поле обладает тонкой структурой, элементы которой имеют широкий набор напряженностей от 0 до тысяч Гс. Распределение этих элементов по напряженности в разных местах Солнца различно. При пространственном разрешении, доступном для современных телескопов, магнитное поле Солнца состоит из двух компонент: слабого магнитного поля со средней напряженностью 1–10 Гс, занимающего всю поверхность Солнца (фонового поля), и сильного магнитного поля с килогауссовой напряженностью, возникающего с рождением активных образований. Уменьшение пространственного разрешения при наблюдениях магнитного поля приводит к тому, что оба типа магнитного поля все более смешиваются. При этом образуются крупномасштабные структуры, результирующий магнитный поток которых имеет знак “+” или “–”. Такое магнитное поле Солнца назовем крупномасштабным, а области одного знака поля – крупномасштабными структурами магнитного поля Солнца.

Первой встает задача определения характеристик этого поля и их изменения с высотой и временем. Именно это является целью данной работы.

В качестве объектов исследования будут рассмотрены крупномасштабные структуры магнитного поля и границы между ними на высотах H от фотосферы ($H = R_0$) до высоты $H = 2.5 R_0$. Кроме того, анализу подвергнется процесс переполосовки полярных магнитных полей – изменения знака магнитного поля на широтах выше 70° .

Исходным материалом для исследования послужили ежедневные магнитограммы продольного фотосферного поля высокого пространственного разрешения, полученные в период ноябрь 1997 – декабрь 2010 гг. старым магнитографом Китт-Пик обсерватории (KPNO) и новым магнитографом SOLIS Национальной солнечной обсерватории (NSO) США.

На их основе решаются следующие задачи:

1. Расчет радиальной компоненты магнитного поля B_r на расстояниях от фотосферы до поверхности источника.
2. Построение синоптических карт B_r на нескольких высотах в атмосфере Солнца.
3. Определение следующих характеристик крупномасштабного магнитного поля и их изменения с высотой и временем:
 - смена знака полярных магнитных полей;
 - границы широтного распространения крупномасштабных структур “+” и “–” магнитного поля;
 - границы структур крупномасштабного магнитного поля, время их жизни, скорости вращения;
 - характеристики структур крупномасштабного магнитного поля.

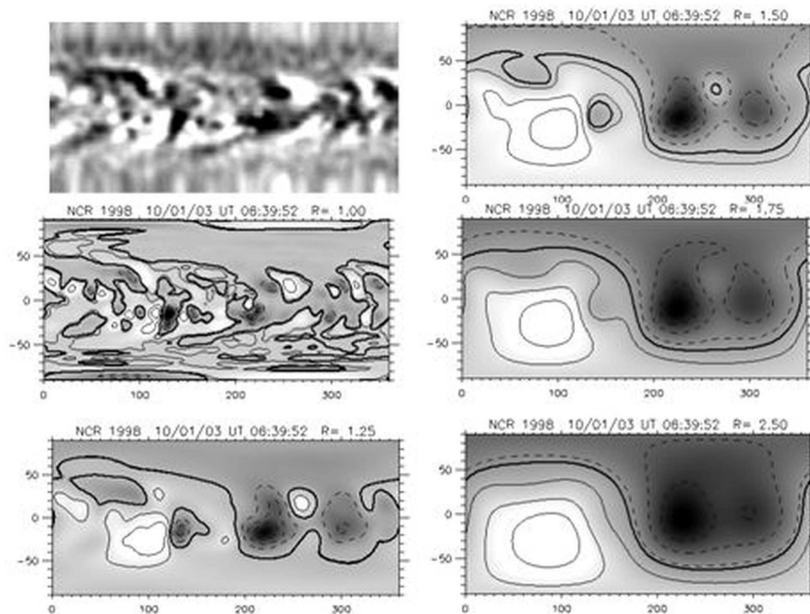


Рис. 1. Синоптические карты оборота Солнца CR 1998 (январь 2003 г.). Верхняя карта слева построена по ежедневным наблюдениям с пространственным разрешением 1° . На остальных картах представлены результаты расчета V_r -компоненты поля с разрешением 6° в гелиоцентрической системе координат. На них показаны нейтральная линия (черная жирная линия) и изолинии нескольких значений V_r

На основе полученных характеристик будет дано описание общей картины развития 23 цикла и сформулированы основные выводы.

2 Расчет радиальной компоненты магнитного поля V_r на семи высотах в атмосфере Солнца

Расчеты магнитного поля в короне проводились в рамках модели “потенциальное поле – поверхность источника”. В рамках этой модели в потенциальном приближении рассчитывались три компоненты магнитного поля в пространстве между фотосферой и поверхностью источника – сферой радиусом 2.5 радиуса Солнца. При этом использовалась так называемая “радиальная коррекция”. Считалось, что на внутренней границе расчетной области (фотосфера) измеряемое магнитное поле является радиальным (Ванг и Шили, 1992). В данных расчетах поля использовалось разложение потенциала поля по 30 гармоникам сферических функций. На поверхности Солнца это соответствует пространственному разрешению примерно 102 угловых секунд. Формирование синоптических карт радиальной компоненты поля V_r осуществлялось стандартным образом. На сферической поверхности фотосферы радиальное магнитное поле усреднялось в фиксированных точках по магнитограммам, в пределы которых эти точки попадали, с учетом весового коэффициента для каждой магнитограммы. В результате основной вклад вносили магнитограммы, для которых анализируемые точки оказывались вблизи центрального меридиана. Эта процедура осуществлялась с шагом 1° по долготе до полного покрытия выбранной сферической поверхности.

Для исследования использовались синоптические карты, построенные на нескольких высотах H_0 – H_6 через $0.25 R_o$. Цифры в названиях высот соответствуют следующим высотам, выраженным в радиусах Солнца R_o : H_0 – $1 R_o$ (фотосфера), H_1 – $1.25 R_o$, H_2 – $1.5 R_o$, H_3 – $1.75 R_o$, H_4 – $2 R_o$,

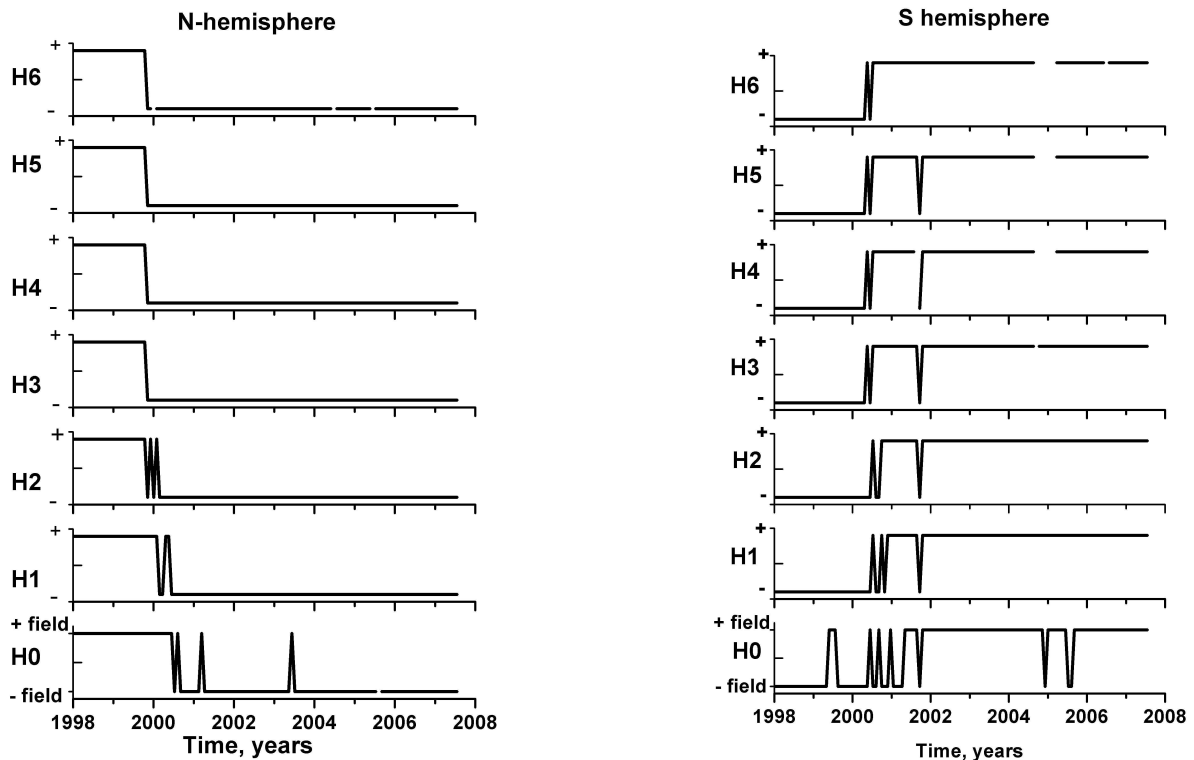


Рис. 2. Схематическое представление изменения знака полярного поля для высот H0–H6 для N- и S-полушфер

H5 – $2.25 R_0$, H6 – $2.5 R_0$. В данной работе карты усреднялись по областям с размером 6° как по широте, так и по долготе.

В качестве примера на рис. 1 приведены синоптические карты одного оборота Солнца для нескольких высот в солнечной атмосфере.

3 Переполусовка полярных полей на разных высотах

На синоптических картах видно, что крупномасштабные структуры отсутствуют на высоких широтах. Назовем магнитное поле на широтах выше 70° полярным полем. На каждой карте для высот H0–H6 был определен знак полярного поля в обоих полушферах. Назовем его знаком полярного поля. В случаях, когда в широтной зоне выше 70° наблюдались поля обоих знаков, полярному полю придавался знак той части области, которая занимала более $2/3$ всей зоны. Особенно много вкраплений “+” поля наблюдалось в полярном поле северной полушферы на высоте H0 с 2001 г. и до конца рассматриваемого периода. На рис. 2 схематично представлены результаты таких определений для высот H0–H6 для северной (N) и южной (S) полушфер.

Как видно на этих графиках, переполусовка происходила не одновременно в обоих полушферах. Характер изменения знака поля с высотой в разных полушферах также различается. Весь процесс переполусовки длился более двух лет.

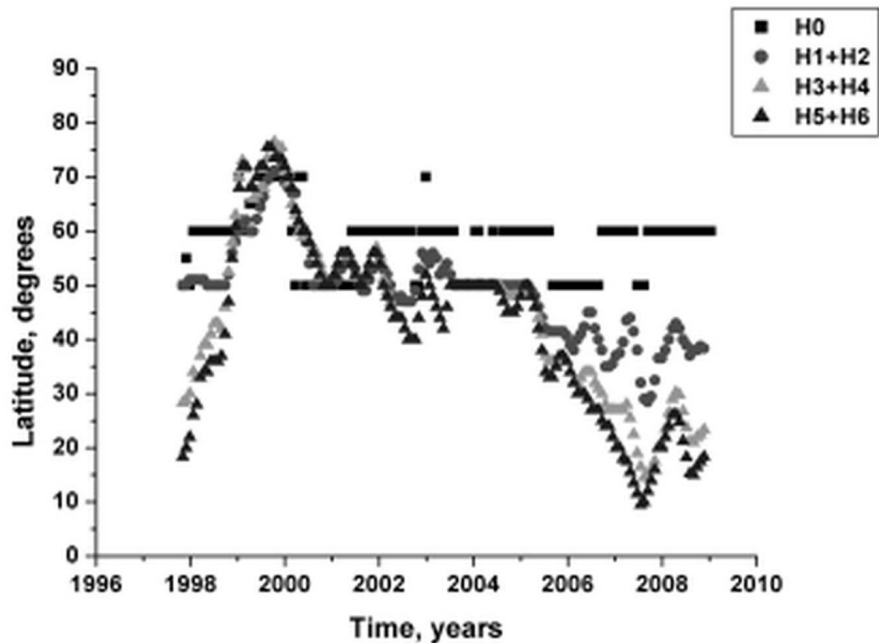


Рис. 3. Изменение со временем максимальной широты распространения крупномасштабных структур магнитного поля в N-полусфере. Суммы $H1 + H2$ и т. д. означают, что для двух высот бралось среднее значение максимальной широты

4 Широты распространения крупномасштабных структур “+” и “-” магнитных полей

С развитием солнечного цикла широтное распределение крупномасштабных структур меняется с высотой. С целью оценки этого процесса для каждого оборота на синоптических картах на высотах от $H0$ до $H6$ были определены значения максимальных широт в обеих полусферах, ниже которых наблюдаются крупномасштабные структуры магнитного поля. Другими словами, были определены широты, выше которых находится полярное поле. На рис. 3 приведено изменение со временем максимальной широты распространения крупномасштабных структур фонового поля в N-полусфере.

5 Секторная структура магнитного поля на средних широтах и границы между секторами

Во Введении мы упоминали о секторной структуре межпланетного магнитного поля и его связи с секторной структурой магнитного поля Солнца. Перейдем к построению секторной структуры Солнца по нашему материалу.

5.1 Построение секторов

Для определения секторной структуры Солнца в широтном интервале существования крупномасштабных структур магнитного поля была проведена следующая процедура. На всех синоптических картах отдельно для каждого полушария находились долготные распределения средних значений поля, найденных при осреднении карт по широте в интервале $0^\circ-40^\circ$. Примеры полученных таким образом графиков даны на рис. 4 для высоты $H0$. Область вдоль долготы, занятую полем одного

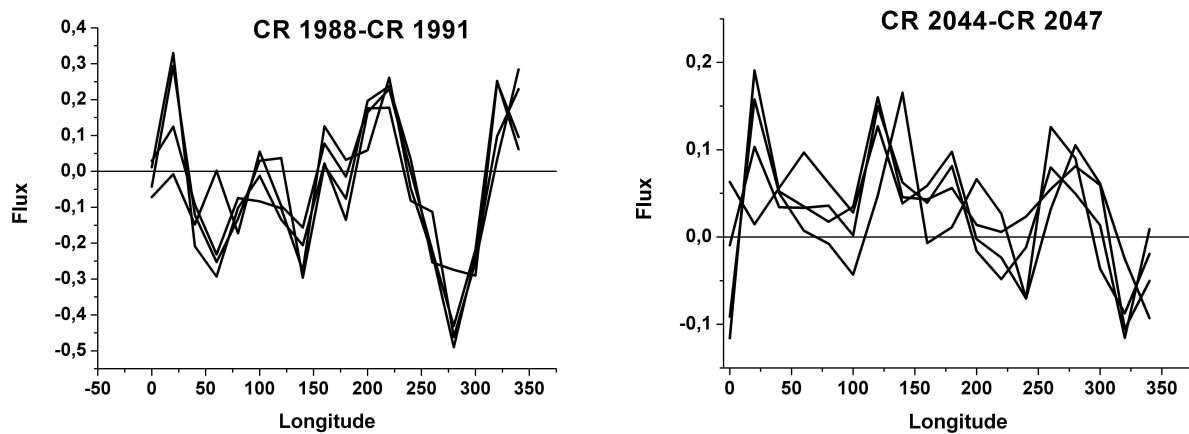


Рис. 4. Долготные распределения средних полей по широтным интервалам 0° – 40° на высоте Н0 в N-полушере для двух серий из пяти последовательных оборотов

знака, назовем сектором. Точки, в которых поле равно нулю – границами секторов. Во всех случаях отдельно фиксировались точки перехода поля от “+” к “-” (граница +/–) и от “-” к “+” (граница –/+) при росте долготы.

На картах для высот Н3–Н6 было видно, что протяженность структур поля одного знака вдоль широты сравнима с 40° . На высоте Н6 на большинстве карт (80 % от общего количества карт) каждая структура занимает всю широтную зону $\pm 40^{\circ}$. В этих случаях принятое нами определение секторов совпадает с реальными структурами фоновых полей на больших высотах.

Повторное определение секторной структуры, но с осреднением по широте в 20° , показало, что на больших высотах распределения границ секторов при 40- и 20-градусном осреднении практически совпадают для 1997–2005 гг. (обороты CR 1997–CR 2025). В последующие годы (CR 2025–CR 2097) 20-градусное осреднение добавляет несколько точек в картину, полученную при осреднении в 40° . Это происходит в тех оборотах, когда высокоширотная граница секторов опускается до 20° и ниже. При этом осреднение в 40° вообще не показывает границ в обоих полушарах. Этот результат показан на рис. 5.

На уровне фотосферы картина иная. Размеры структур магнитных полей вдоль широты чаще всего занимают 10° – 20° . В этом случае сектора, полученные при осреднении полей по широте, не совпадают с реальными структурами полей.

О реальности полученных таким методом распределений секторов на уровне фотосферы можно говорить, определив, как долго они сохраняются.

Для оценки времени их постоянства исследовалась линейная связь распределений секторов в нескольких последовательных кэррингтоновских оборотах. Для распределения в каждом обороте n находились последовательно коэффициенты линейной корреляции r с распределением в оборотах $n + 1$, $n + 2 \dots n + dT$ до тех пор, пока коэффициент r не становился меньше 0.4. Величину dT будем считать временем (в кэррингтоновских оборотах) сохранения подобия распределения крупномасштабного поля в 40-градусных широтных зонах обоих полушарий. Для северной полушеры результаты такого анализа на высоте Н0 представлены на рис. 6, где по оси абсцисс отложено время сохранения подобия структуры dT , а по оси ординат – число оборотов n , соответствующих каждому dT .

Далее мы будем говорить не обо всей структуре поля, а о долготном распределении +/– и –/+ границ секторов магнитного поля.

Для дальнейшего анализа по всем синоптическим картам для высот Н0–Н6 отдельно в N- и

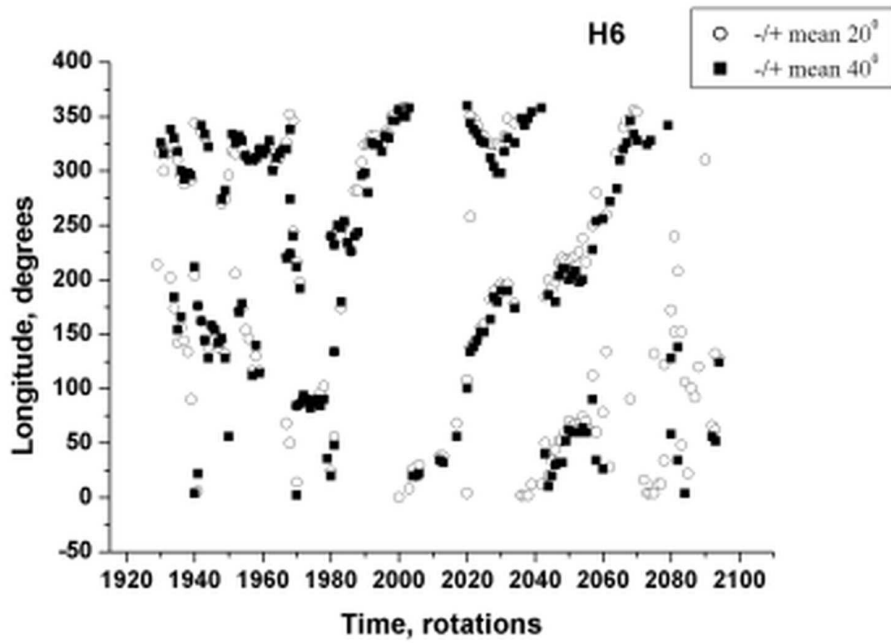


Рис. 5. Долготы \pm границ на высоте H6 в южной полусфере Солнца для оборотов CR 1929–CR 2094 (1997–2010 гг.). Черные квадраты – долготы, полученные при осреднении 40° по широте, полые кружки – при осреднении 20°

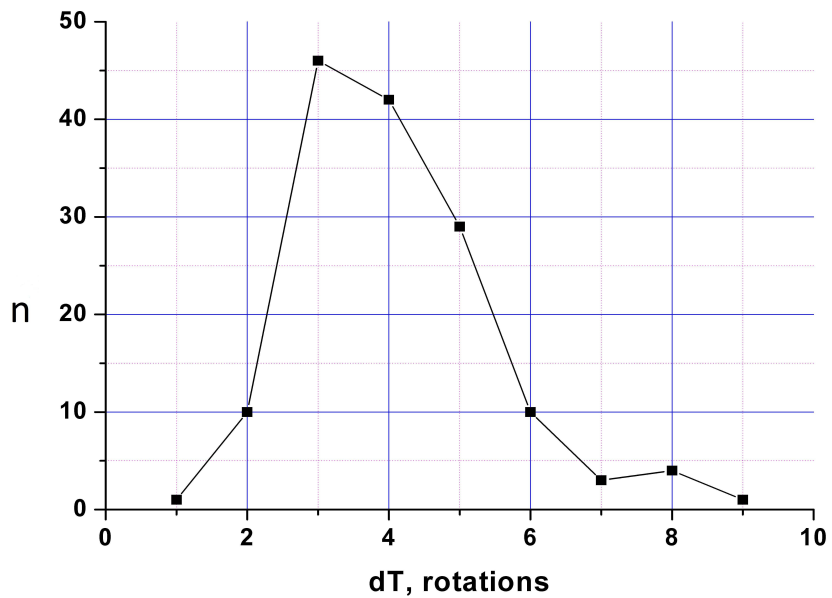


Рис. 6. Распределение числа солнечных оборотов n по времени сохранения долготного распределения секторной структуры магнитного поля на высоте H0

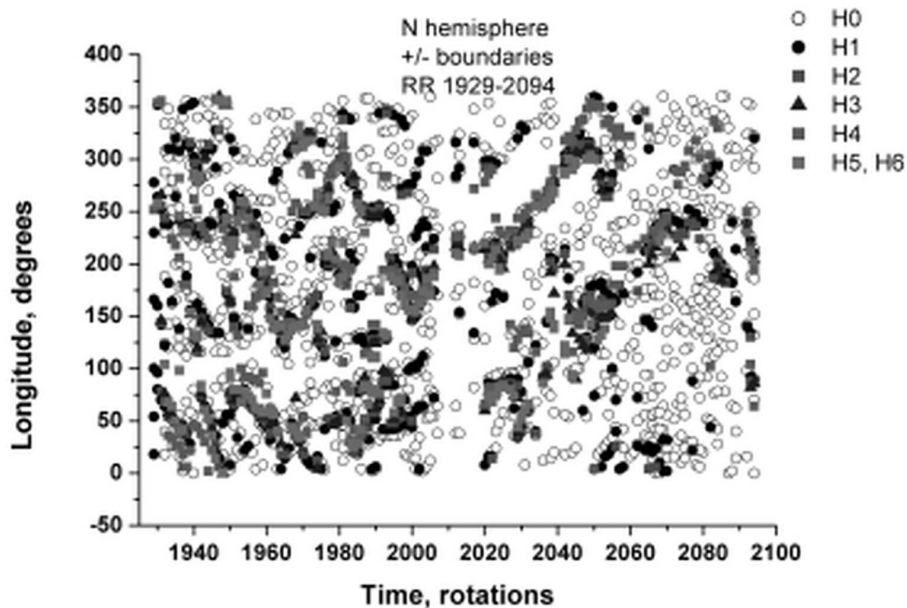


Рис. 7. Долготы \pm границ между секторами крупномасштабного поля в N-полусфере на семи высотах в атмосфере Солнца за весь исследуемый период с 1999 по 2010 гг. (обороты CR 1929–CR 2094)

S-полусферах Солнца были определены долготы всех \pm и $-/+$ границ секторов при осреднении по широте в 40° .

Анализировались зависимости этих долгот от времени, высоты, полусферы и характеристик полярного поля.

Обилие полученных данных затрудняет графическое представление найденных зависимостей. Это видно на рис. 7, где приведены долготы \pm границ на семи высотах в N-полусфере Солнца. Но даже на этом графике видно, что картина долготного распределения резко меняется после оборота CR 2000.

Поэтому будем рассматривать два временных интервала:

- кэррингтоновские обороты №№ CR 1929–CR 1999 (1997–2002 гг.) и
- CR 2000–CR 2094 (2003–2010 гг.).

5.2 Одноименные границы секторов на разных высотах

Рассмотрим \pm границы секторов в S-полусфере на высотах от H0 до H6. Их долготные распределения представлены на рис. 8 (обороты CR 1925–CR 2000) и рис. 9 (обороты CR 2000–CR 2100).

На рис. 8 видны следующие особенности. Большинство границ не простирается выше H0. На этом уровне время существования границ варьируется от одного до 10 оборотов. В первых 20 оборотах (CR 1930–CR 1950) преобладает уменьшение долготы границ со временем (на графике цепочки точек наклонены вправо вниз). Такое изменение долготы соответствует длительности оборота границы, превышающей кэррингтоновскую, составляющую 27.275 суток. Заметное количество границ достигает высоты H1, H2, где сохраняются 1–2 оборота. В эти же 20 оборотов (CR 1930–CR 1950) 4 границы существуют каждая около 10 оборотов. Их протяженность по высоте достигает уровня H6. Период обращения этих границ составляет около 28 суток.

С началом переполосовки полярных полей в середине 1999 года (оборот CR 1950) картина долготного распределения границ существенно меняется. Появляется много короткоживущих границ

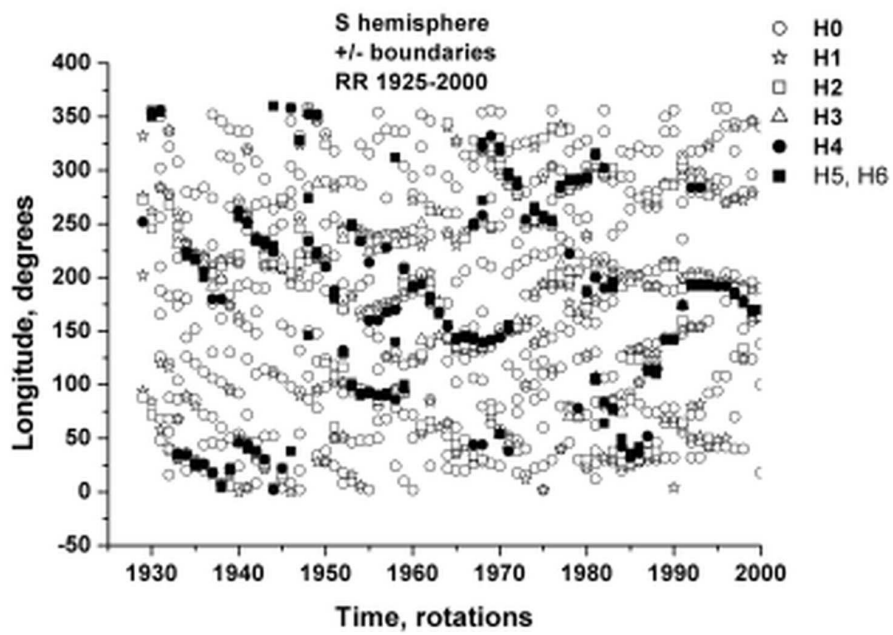


Рис. 8. Долготное распределение +/- границ в S-полусфере на высотах H0–H6 в оборотах CR 1925–CR 2000 (1997–2002 гг.)

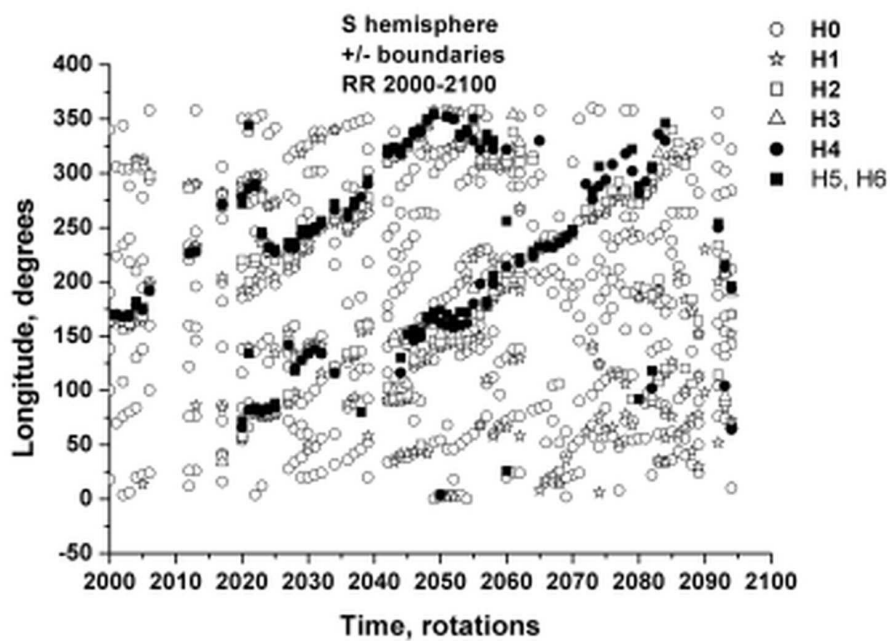


Рис. 9. То же, что и на рис. 8 для оборотов CR 2000–CR 2100 (2002–2010 гг.)

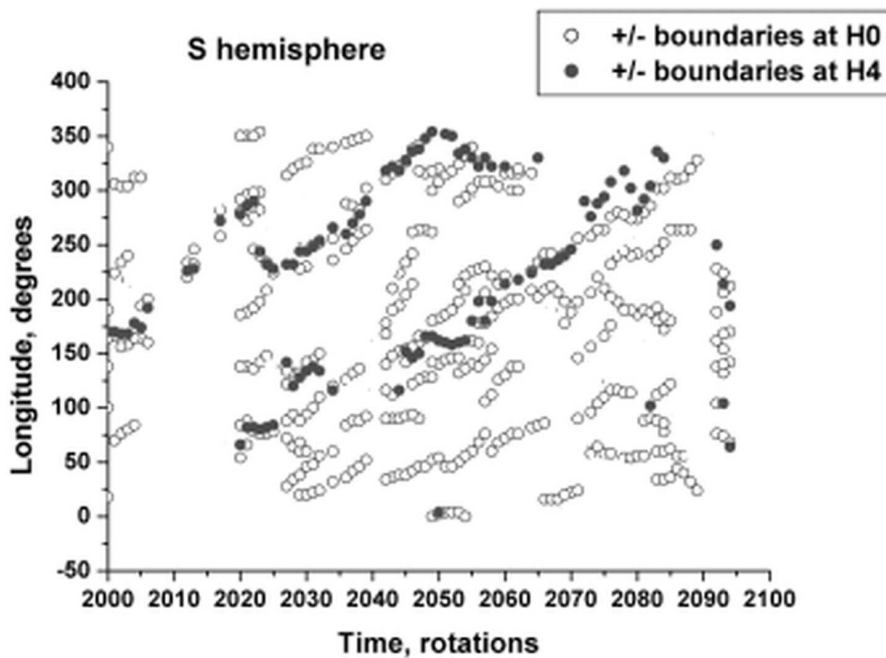


Рис. 10. +/- границы секторов на высотах H0 и H4 в S-полусфере

на больших высотах. Периоды их обращения близки к кэррингтоновским. В середине 2002 года (оборот CR 1990) переполусовка полярных полей закончилась. Из полного списка границ на высоте H0 нами были вычеркнуты границы, существующие менее 4 оборотов. Как видно на рис. 10, на уровне фотосферы большое количество +/- границ существует от 4 до 10 и более оборотов. Долгоживущие границы заметно различаются по скорости вращения. Часть границ от оборота к обороту смещается на графике горизонтально. Их периоды обращения близки к кэррингтоновским (27.275 суток). Другие же обращаются с меньшим периодом. Для них смещение точек на графике направлено к большим долготам. Период обращения этих границ в среднем составляет 27 суток. Долгоживущие границы на высоте H4 расположены над системой границ на высоте H0. Период обращения границ на высоте H4 составляет 26.85 суток.

В это время меняется и долготное распределение границ. К началу оборота CR 2020 на Солнце формируются устойчивые долгоживущие границы, занимающие все рассматриваемые высоты от фотосферы до поверхности источника. Период обращения этих границ около 26.85 суток.

В 2006 г., за 2 года до начала нового цикла, определяемого по пятнам (в 2008 г., оборот CR 2078), появляются короткоживущие границы, распространяющиеся сначала до высот H1, а затем и выше.

Рассмотрим подробнее поведение +/- границ на высотах H0 и H4 во временном интервале CR 2000–CR 2100 обороты (см. рис. 10).

Из полного списка границ на высоте H0 нами были исключены границы секторов, существующие менее 4 оборотов. Как видно на рис. 10, на уровне фотосферы большое количество +/- границ существует до 10 и более оборотов. Долгоживущие границы заметно различаются по скорости вращения. Часть границ от оборота к обороту смещаются на графике горизонтально. Их периоды обращения близки к кэррингтоновским (27.275 суток). Другие же обращаются с меньшим периодом. Для них смещение точек на графике направлено к большим долготам. Период обращения этих границ в среднем составляет 27 суток. Долгоживущие границы на высоте H4 расположены над системой границ на высоте H0. Период обращения границ на высоте H4 составляет 26.85 суток.

Аналогичную картину эволюции +/- границ в N-полусфере можно увидеть и на рис. 7. Вид гра-

фиков, но не конкретные долготы, для границ $-/+$ не отличается принципиально от вида графиков для границ $+/-$.

5.3 Секторная структура на разных высотах

Изменение секторной структуры со временем продемонстрируем на примере S-полусферы на высоте H4 (рис. 11 и рис. 12) и H0 (рис. 13). Распознать сектор крупномасштабного поля одного знака на этих рисунках можно, проследив интервал долгот между $+/-$ и $-/+$ границами в один и тот же момент времени. В общих чертах изменение секторной структуры на высоте H4 характерно для всех высот, начиная с H1.

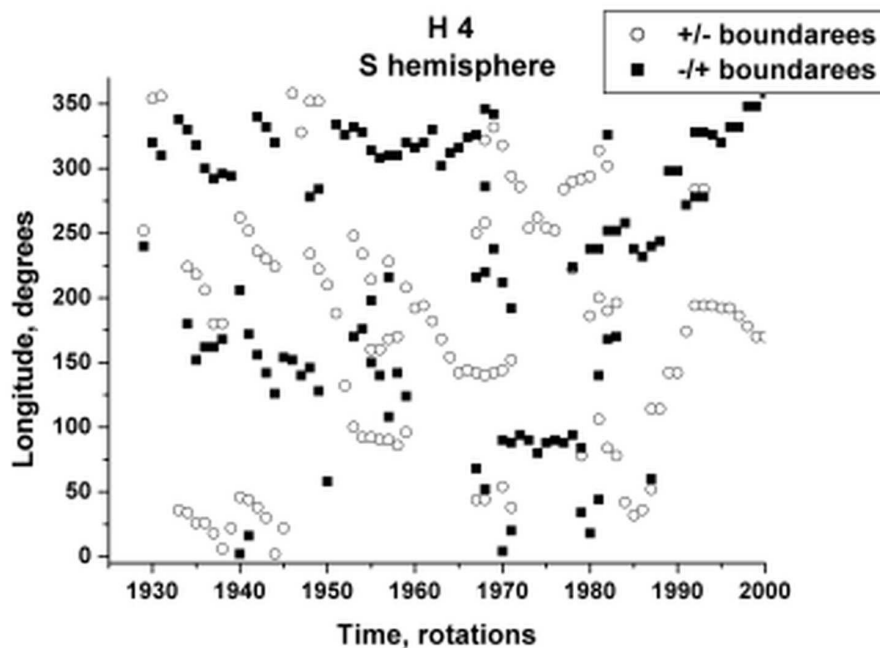


Рис. 11. Долготное распределение $+/-$ и $-/+$ границ секторов крупномасштабного поля на высоте H4 с 1998 по 2003 гг. (обороты CR 1929–CR 2000)

От начала 23 цикла до оборота CR 1985 (1996–2002 гг.) картина довольно пестрая. Сектора существуют короткое время, имеют небольшую протяженность по долготе. Количество секторов и их долготы в обоих полушариях не совпадают.

Это время соответствует периоду от начала цикла до конца процесса переполюсовки полярных полей. Только в двух коротких временных интервалах (обороты CR 1960–CR 1967 и CR 1972–CR 1978) на Солнце существует двухсекторная структура.

В 2002 г. после оборота CR 1985 структура крупномасштабного поля становится двухсекторной. Размеры секторов по долготе почти одинаковы: 175° и 185° . Такой структура остается до оборота CR 2020, после которого возникает еще 2 сектора, и структура становится четырехсекторной почти до конца 23 цикла (оборот CR 2080). Размеры “+” и “-” секторов заметно различаются. Протяженность по долготе “+” секторов составляет 125° , а “-” секторов – 55° . Периоды обращения секторов короче кэррингтоновских и близки к 26.85 суток. Почти все это время сектора охватывают весь широтный интервал от -40° до $+40^\circ$.

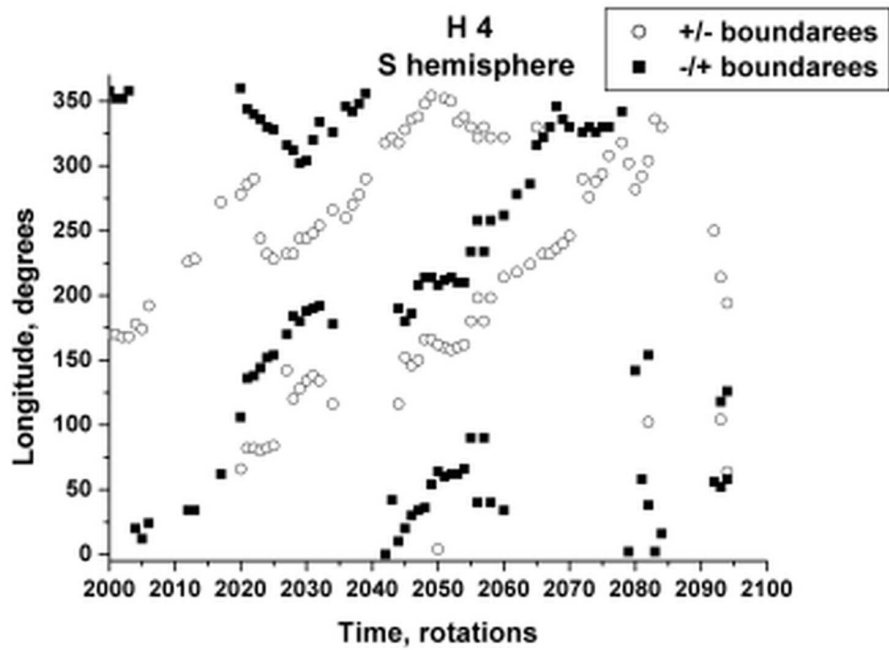


Рис. 12. То же, что и на рис. 11 для интервала 2004–2010 гг. (обороты CR 2000–CR 2094)

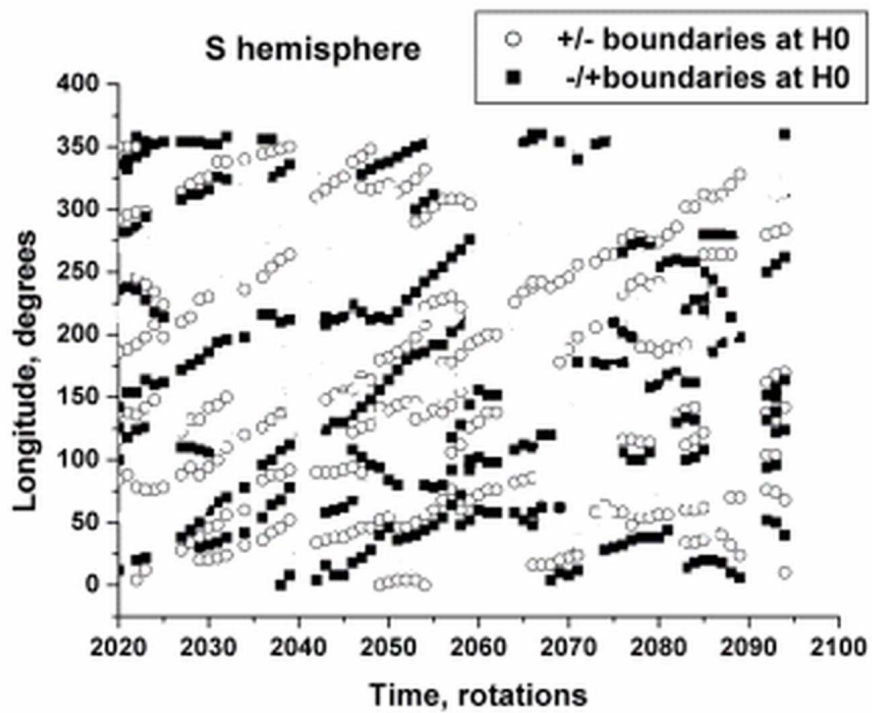


Рис. 13. Долготное распределение +/- и -/+ границ на высоте H0 с оборота CR 2020 до оборота CR 2100 (2004–2010 гг.)

На уровне фотосферы (на высоте Н0) секторная структура очень сложна ввиду наличия большого количества короткоживущих $+/-$ и $-/+$ границ. Для выявления секторной структуры на уровне фотосферы из полного списка нами были вычеркнуты границы, существующие менее 4 оборотов, а также сектора, размеры которых по долготе не превышают 3° . Пример полученных графиков приведен на рис. 12.

Ранее мы говорили, что на уровне фотосферы во всех рассмотренных интервалах времени есть $+/-$ и $-/+$ границы магнитных структур, существующие более 10 оборотов. На рис. 13 видно, что не всегда с ними связаны по два долгоживущих сектора. В некоторых случаях можно увидеть отдельные “+” или “-” сектора, протянувшиеся на $20^\circ-50^\circ$ по долготе и существующие 10–30 оборотов.

6 Характерные этапы развития крупномасштабной структуры магнитных полей в 23 цикле солнечной активности

Выше мы рассмотрели изменение с высотой, временем и широтой полярных полей. Кроме того, были изучены границы между “+” и “-” структурами фоновых полей, а также секторная структура солнечного магнитного поля. Можно выделить несколько этапов в изменении этих характеристик в течение цикла. Сначала представим эти этапы в виде таблицы.

Таблица 1. Этапы развития 23 цикла солнечной активности

№ п/п	Название этапа	Годы	Кэррингтоновские обороты
1	Фаза роста активности	1997–1999.4	CR 1929–CR 1950
2	Переполюсовка полярных полей	1999.4–2002.4	CR 1950–CR 1990
3	Двухсекторная структура	2002.4–2004	CR 1990–CR 2012
4	Четырехсекторная структура	2004–2008	CR 2012–CR 2078
5	Начало 24 цикла	2008–2010	CR 2078–CR 2094

В первые полтора года 23 цикла (обороты CR 1929–CR 1950, ноябрь 1997 – апрель 1999 гг.) на Солнце на высотах Н0–Н6 наблюдается несколько долгоживущих границ между структурами магнитного поля разного знака. Время жизни их не превышает 10 оборотов, периоды обращения больше 27.275 суток. Помимо этих границ наблюдаются границы со временем жизни 1–3 оборота и протяженностью по высоте Н0–Н3. Полярное поле в северной полусфере в это время положительно, а в южной полусфере отрицательно. Крупномасштабные структуры на высотах Н0 и Н1 распространены в широтном интервале от -50° до $+50^\circ$. На больших высотах широтная зона распространения крупномасштабных структур весь этот период непрерывно увеличивается от -20° и $+20^\circ$ до -60° и $+60^\circ$.

В середине 1999 года (CR 1950) начался второй этап – процесс переполюсовки полярных полей на всех высотах Н0–Н6. Период CR 1950–CR 1990 (апрель 1999 – апрель 2002 гг.) характеризуется частой сменой знака полярных полей, распространением крупномасштабного поля на широты $\pm 70^\circ$ и сложными границами между секторами поля. В течение почти трех лет переполюсовки стабильных границ не наблюдается. Времена жизни границ не превышают полугодия (5–6 оборотов Солнца). Периоды обращения отдельных границ бывают больше или меньше 27.275 суток. Секторная структура практически отсутствует. Только в двух коротких временных интервалах (обороты CR 1960–CR 1967 и CR 1972–CR 1978) на больших высотах существует двухсекторная структура.

Следующие 1.5 года – третий этап (апрель 2002 – январь 2004 гг., обороты CR 1990–CR 2012). После середины 2002 г. наступает время спокойного развития. Время жизни границ между структурами увеличивается до десятков оборотов, появляются устойчивые двух- и четырехсекторные

структуры. Знаки полярных полей не меняются. Заметные изменения наблюдаются только в изменении высокоширотной границы распространения структур крупномасштабных полей. На высотах Н3–Н6 прослеживается четкая двухсекторная структура. Ее период обращения составляет около 27 суток. На более низких высотах картина усложняется.

2004–2008 годы (обороты CR 2012–CR 2078) – четвертый этап. Это время стабильной четырехсекторной структуры, охватывающей высоты от Н1 до Н6 и вращающейся с периодом около 26.85 суток. На уровне фотосферы существуют долгоживущие границы, совпадающие с границами секторов на более высоких уровнях и вращающиеся с их скоростью. Но, кроме этого, на уровне фотосферы и на высотах до $1.5 R_0$ наблюдаются и границы с более коротким временем жизни и с меньшими скоростями вращения. Около них в большинстве случаев нет крупных секторов.

В 2008 г. (пятый этап) наблюдается возврат к двухсекторной структуре на высотах Н1–Н6, а затем появление новых короткоживущих границ, достигающих иногда высот Н3.

Подведем итоги рассмотрения этапов развития крупномасштабных структур магнитного поля на Солнце в течение цикла.

7 Два типа границ между структурами крупномасштабных магнитных полей

Характерной чертой всего цикла является наличие двух типов границ между структурами магнитного поля.

I тип – это границы со временем жизни 3–5 оборотов, вращающиеся с кэррингтоновской скоростью. Число этих границ падает с высотой, и они не создают устойчивых униполярных структур крупномасштабных полей.

II тип – долгоживущие границы между униполярными структурами. Их время жизни достигает десяти и более оборотов. Они уверенно прослеживаются на всех высотах, а на высотах от $1.25 R_0$ и выше эти границы создают двух- или четырехсекторную структуру Солнца. Скорость вращения таких границ больше кэррингтоновской.

Учитывая высотную стратификацию и разницу в скоростях вращения границ этих двух типов, можно сделать предварительный вывод о разной природе этих границ. Долгоживущие границы определяются фоновыми полями, возникшими на низких широтах, а в короткоживущие границы заметный вклад вносят активные области.

8 Заключение

В начале статьи мы писали, что данная работа должна стать основой для исследований связи эволюции солнечных образований с местом их возникновения.

Для таких работ могут быть использованы следующие полученные нами материалы и выводы:

- синоптические карты для семи высот в атмосфере Солнца с осреднением в 6° и нанесенными на них нулевыми линиями магнитного поля;
- долготные распределения границ крупномасштабных структур на средних широтах, их изменения с высотой и временем (отдельно для границ $+/-$ и $-/+$ в N- и S-полусферах);
- секторная структура крупномасштабных полей на разных высотах – время существования, количество секторов и скорости их вращения;
- высокоширотные границы распространения крупномасштабных структур магнитного поля на разных высотах;
- процесс переполусовки полярных полей во времени на разных высотах;
- этапы бурного и спокойного развития крупномасштабных полей в течение цикла;
- наличие двух типов границ крупномасштабных структур и их разная природа

Литература

- Бэбкок (Babcock H. W., Babcock H.D.) // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 349.
- Бэбкок (Babcock H. W.) // *Astrophys. J.* 1961a. V. 133. №. 2. P. 74.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1961b. V. 133. №. 2. P. 572.
- Бумба В. // Проблемы солнечной активности / Ред. Бумба В., Клечек И. М.: Мир. 1979. С. 50.
- Бумба, Говард (Bumba V., Howard R.) // *Astrophys. J.* 1965. V. 141. P. 1502.
- Ванг и Шили (Wang Y.-M. and Sheeley N.R.Jr.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310.
- Гуртовенко Э.А. (ред.) // Вариации глобальных характеристик Солнца. Киев. Наукова думка. 1992.
- Говард, Лабонте (Howard R.H., LaBonte) // *Solar Phys.* 1981. V. 74. P. 131.
- Говард и др. (Howard R., Bumba V., Smith S.F.) // *Carnegie Inst. Publ. Wash.* 1967. №. 626.
- Северный и др. (Severny A., Wilcox J.M., Scherrer P.H., Colburn D.S.) // *Solar Phys.* 1970. V. 15. P. 3.
- Хейл (Hale F.E) // *Astrophys. J.* 1908. V. 28. №. 2. P. 100.; P. 315.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., et al.) // *Solar phys.* 1977. V. 52. P. 3.