

УДК 523.98

## Солнечные пятна и крупномасштабные магнитные поля на разных высотах

*В.А. Перебейнос<sup>1</sup>, Н.Н. Степанян<sup>1</sup>, В.Г. Файнштейн<sup>2</sup>, Г.В. Руденко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*nataly@crao.crimea.ua*

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Россия, Иркутск  
*vfain@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 15 октября 2010 г.

**Аннотация.** Изучено изменение структуры магнитного поля с высотой над группами солнечных пятен для высот от фотосферы до поверхности источника ( $H = 2.5 R_o$ , где  $R_o$  – радиус Солнца). Показано, что на всех высотах, начиная с фотосферы ( $H = R_o$ ), группы пятен не связаны с долгоживущими границами крупномасштабных полей, вращающимися с периодом, меньшим, чем период кэррингтоновского вращения. На высотах 1.0–1.5  $R_o$  видна достаточно четкая связь групп пятен с границами, разделяющими головные и хвостовые пятна в группах (границы Хейла). Периоды вращения таких структур близки к кэррингтоновским, а время жизни не превышает 3–5 оборотов.

Максимальная напряженность магнитного поля Солнца падает на два порядка при увеличении высоты с  $R_o$  до 1.1  $R_o$ . Дальнейший спад напряженности идет медленно (уменьшение на порядок с  $H = 1.1 R_o$  до  $H = 2.5 R_o$ ).

Результаты можно рассматривать как свидетельство того, что крупномасштабные структуры магнитного поля и долгоживущие границы между ними (линии раздела полярности магнитного поля) существуют независимо от полей солнечных пятен, т. е. формируются иными, чем солнечные пятна, источниками. На уровне фотосферы на эти структуры накладываются поля активных областей.

SUNSPOTS AND LARGE-SCALE MAGNETIC FIELDS AT DIFFERENT HEIGHTS, *by V.A. Perebeinos, N.N. Stepanian, V.G. Fainshtein, G.V. Rudenko.* Variation of the magnetic field structure with height over groups of sunspots for the heights from the photosphere to the source surface ( $R = 2.5 R_o$ , where  $R_o$  – radius of the Sun) was studied. It was shown that at all heights sunspot groups are not associated with long-lived boundaries of the large-scale structures, rotating with a period shorter than the Carrington period. At heights of 1–1.5  $R_o$  there is a clear connection between sunspot groups and boundaries, which separate head and tail spots in the groups (Hale boundaries). Rotation periods of these structures are close to the Carrington period, and the lifetime does not exceed 3–5 rotations. The maximal strength of the solar magnetic field decreases by 2 orders with increasing height from  $H = 1 R_o$  to  $H = 1.1 R_o$ . Further decrease of tension is slow (a decrease by 1 order of magnitude from  $H = 1.1 R_o$  to 2.5  $R_o$ ).

The results can be considered as the evidence that the large-scale magnetic field structure and long-lived border between them (the line dividing the polarity of the magnetic field or zero line) are mainly determined by other magnetic fields than the fields of sunspots including large-scale background fields. At the level of the photosphere and at low altitudes above it the fields of active regions superimpose these structures. Arising short-term zero lines dilute the picture of the distribution of zero lines of the background fields.

**Ключевые слова:** солнечные пятна, крупномасштабные структуры магнитных полей

---

## 1 Введение

Неравномерность долготного распределения активных областей на Солнце привлекает внимание исследователей многие годы. Варвик (1965) обратил внимание на наличие избранных долгот с повышенной солнечной активностью. Вилкоккс и Шаттен (1967) усомнились в его результатах. Но уже в 1968 г. Швестка (1968) на большом материале обнаружил повышенную концентрацию протонных вспышек на двух долготах, отстоящих друг от друга на  $180^\circ$ . Назовем ссылки на ряд исследований активных долгот, определенных по пятнам и вспышкам, большая часть которых проведена Бумбой с соавторами (Бумба, Обридко, 1969; Бумба, Хейна, 1981, 1988, 1990; Баи, 1988; Бумба, Гестели, 1987, 1988a, 1988b). В работе (Бумба, Хейна, 1991) активные долготы найдены в солнечном ветре. Проведя анализ 30-летних исследований активных долгот разными авторами, Бумба (1998) пришел к выводу о наличии трех типов активных долгот, различающихся по скорости вращения и преимущественным широтам распространения.

Изучение связи солнечных пятен с фоновыми полями также имеет свою историю. Бэбкок (1961) предположил, что фоновое магнитное поле Солнца является рассеянным полем активных областей. Аналогичной интерпретации придерживались Говард и Лабонте (1981). На трудности такой интерпретации впервые указал Северный (1969, 1971). Изучение фонового поля по  $H_\alpha$ -наблюдениям методом Мак-Интоша (1976) было проведено Степанян (1982, 1985). Вывод этого исследования: фоновое поле является самостоятельным явлением, отражающим конвекцию 3-го яруса. Размеры конвективных ячеек сравнимы с радиусом Солнца. Котов и др. (1977, 1979) подтверждают этот вывод на основании сравнения фонового магнитного поля, полученного по  $H_\alpha$ -наблюдениям, и общего магнитного поля Солнца как звезды.

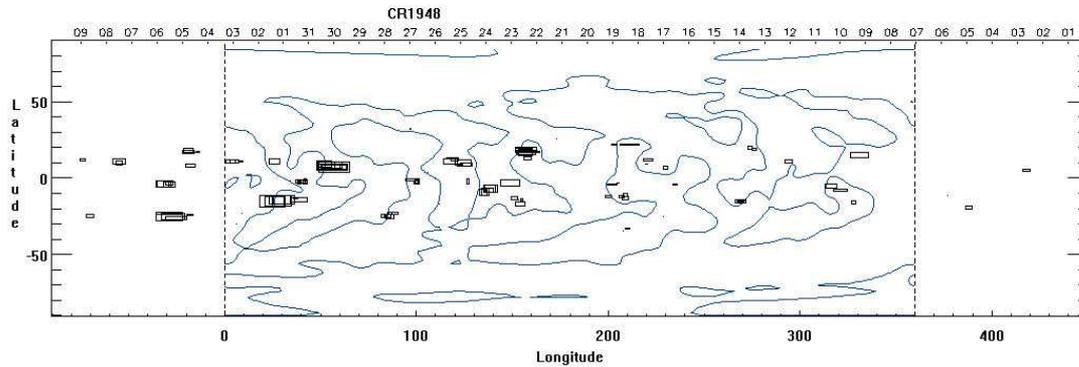
Остановимся еще на двух работах, касающихся общего представления о крупномасштабном поле Солнца, включающего фоновое поле и поле активных областей. Иванов (1993) пишет о трехкомпонентном крупномасштабном поле, включающем аксиальное дипольное, наклонное дипольное и квадрупольное поля. В работе Головки, Куклин (1993) крупномасштабное поле сопоставляется с переломными точками солнечного цикла (Витинский и др, 1986).

Цель данной работы – выявить высотную стратификацию связей между группами пятен и крупномасштабными структурами магнитных полей.

## 2 Исходный материал

В работе было использовано три вида данных.

1. Группы пятен и координаты их центров. В НИИ “КрАО” для всех пятен, находящихся на диске, ежедневно определяются координаты центров групп пятен и координаты S, N, E и W границ групп. Эти данные наносятся на синоптические карты и выставляются на сайте лаборатории физики Солнца НИИ “КрАО” (<http://solar.crao.crimea.ua>). В данной работе использованы такие данные для периода 1999–2008 гг. (Кэррингтоновские обороты CR1948–CR2067).
2. Для анализа использовались синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля ( $B_r$ ) на нескольких высотах в атмосфере Солнца  $H = R_0, 1.0036 R_0, 1.0144 R_0, 1.25 R_0, 1.5 R_0, 1.75 R_0, 2 R_0, 2.25 R_0$  и  $2.5 R_0$ . Карты  $B_r$  были построены на основе ежедневных наблюдений магнитного поля в Национальной обсерватории Китт-Пик (KPNO) до сентября 2003 г. и магнитографом SOLIS (NSO) – с января 2004 г. 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). В данных расчетах использовалась так называемая “радиальная коррекция”. Считалось, что на внутренней границе расчетной области (фотосфера) магнитное поле практически является



**Рис. 1.** Синоптическая карта для кэррингтоновского оборота CR1948 с нанесенными на нее в виде прямоугольников группами солнечных пятен для каждого дня наблюдений. Сплошными линиями нанесены нулевые линии радиальной компоненты  $B_r$  фотосферного магнитного поля (на высоте  $H = 1R_o$ )

радиальным (Ванг и Шелли, 1992). Расчеты магнитного поля в короне проводились с использованием  $B_d$ -технологии, позволяющей рассчитать “мгновенное” распределение поля над видимой поверхностью Солнца (Руденко, 2001). В данных расчетах использовалось разложение потенциала поля по 30 гармоникам специальных функций. На поверхности Солнца это соответствует пространственному разрешению примерно 105 угловых секунд.

3. Долготное распределение  $+/-$  границ и  $-/+$  границ между крупномасштабными структурами магнитного поля на Солнце, осредненных по широтным интервалам  $0-40^\circ$  в каждой полусфере. Здесь под  $+/-$  границами и  $-/+$  границами понимаются линии, при переходе через которые с востока на запад происходит смена знака  $B_r$  крупномасштабного поля с плюса (N-полярность) на минус (S-полярность), и наоборот, с минуса на плюс. Данные для высот  $H = 1 R_o, 1.25 R_o, 1.5 R_o, 1.75 R_o, 2 R_o, 2.25 R_o$  и  $2.5 R_o$  взяты нами из работы Файнштейн и др. (2011). Заметим, что в этой работе выявлены два типа границ:
  - короткоживущие границы, распространяющиеся до высот  $1.25 R_o$  и вращающиеся со скоростью, близкой к кэррингтоновской;
  - долгоживущие границы, распространяющиеся до высот поверхности источника ( $2.5 R_o$ ), вращающиеся со скоростями выше кэррингтоновских.

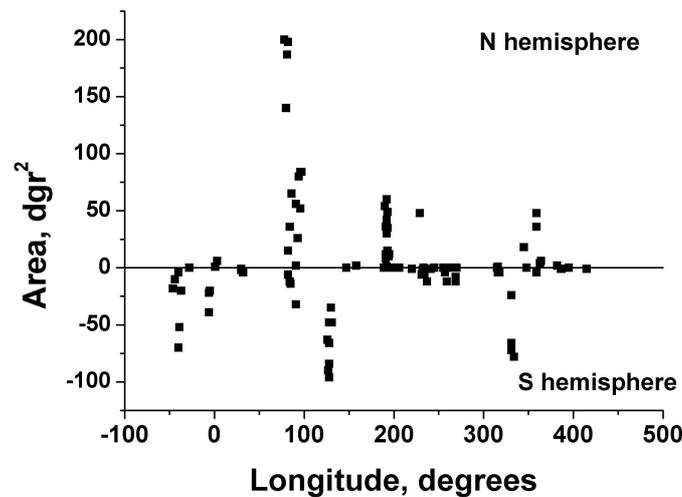
### 3 Методы исследования

Изменение структуры магнитного поля с высотой над группами пятен было рассмотрено тремя способами.

1. Сопоставление долготных распределений долгоживущих границ крупномасштабных структур магнитного поля на всех высотах и долгоживущих групп пятен.
2. Определение по синоптическим картам совпадения границ между структурами с группами пятен на всех высотах.
3. Определение максимальных напряженностей магнитного поля N- и S-полярности на синоптических картах, построенных для девяти высот.

### 4 Сопоставление долготных распределений границ крупномасштабных магнитных полей и групп пятен

Изменение со временем долготного распределения групп солнечных пятен было определено следующим образом.



**Рис. 2.** Долготное распределение площадей групп солнечных пятен для кэррингтоновского оборота CR1976 по всем дням наблюдений. Площади групп пятен, расположенных в северной полусфере Солнца, обозначены положительными числами. Для групп в южной полусфере площади условно обозначены отрицательными числами

По данным наблюдений солнечных пятен в НИИ “КрАО” для каждого кэррингтоновского оборота были определены площади всех наблюдавшихся в данном обороте групп пятен и их долготы за все имеющиеся дни наблюдений. Результаты были представлены в виде графиков, по одному для каждого оборота. Пример такого графика дан на рис. 2. По горизонтальной оси откладывались долготы центров группы пятен, а по вертикальной оси – площади этих групп. Положительные значения площадей относятся к наблюдениям в северной полусфере Солнца. Для южной полусферы площади условно представлены в виде отрицательных чисел.

По этим графикам для каждого оборота были отобраны группы, площади которых хотя бы 1 раз превышали 20 квадратных градусов. Назовем их крупными группами. Долготы этих групп наносились на график в зависимости от времени. Результат представлен на рис. 3 для N- и S-полусфер. На этих графиках (в основном в N-полусфере) угадывается дефицит пятен на долготах около  $200^\circ$ .

Положение  $+/-$  и  $-/+$  границ крупномасштабных структур на разных высотах взяты из работы (Файнштейн и др., 2011). В ней для высот от фотосферы до поверхности источника были определены средние для 40-градусного широтного интервала долготы  $+/-$  и  $-/+$  границы крупномасштабных структур магнитного поля. Границей  $+/-$  называется граница между крупномасштабными униполярными структурами солнечного магнитного поля, к востоку от которой “+” поле (N-полярности), к западу “-” поле (S-полярности). Напомним, что границы Хейла – границы между хвостовой и ведущей частями групп пятен – в 23 цикле соответствуют  $-/+$  в N-полусфере и  $+/-$  границам в S-полусфере.

Полученные нами долготы крупных групп пятен мы наложили на графики  $+/-$  и  $-/+$  границ для всех рассмотренных высот. На рис. 4 и рис. 5 приведены данные для высот H1 (1.25 Ro) и H4 (2 Ro) в N-полусфере.

Если бы фоновые поля, а следовательно и границы крупномасштабных структур, определялись полностью магнитными полями групп пятен и линиями раздела полярностей в них, следовало бы ожидать, что долгоживущие группы в N-полусфере лежали бы на  $-/+$  границах Хейла структур фоновых полей. Как видно на рис. 4, относящимся к высоте H = 1.25 Ro, большинство групп пятен совпадает с  $-/+$  границами, вращение которых близко к кэррингтоновскому и время жизни 3–5 оборотов. На границах, вращающихся с большей скоростью (смещающихся на графиках вправо

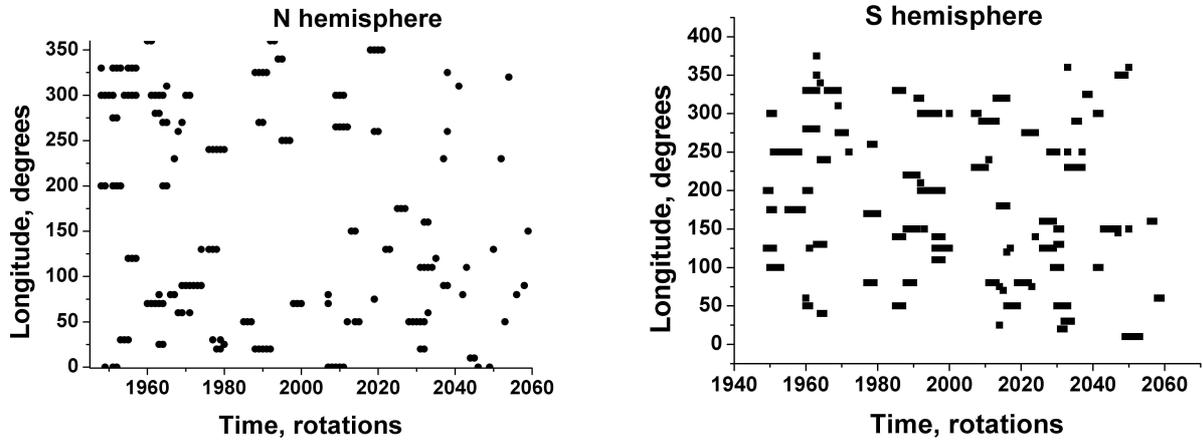


Рис. 3. Долготное распределение крупных групп пятен в N-полусфере (левый график) и S-полусфере (правый график) с мая 1999 г. (оборот CR1949) по май 2000 г. (оборот CR1960)

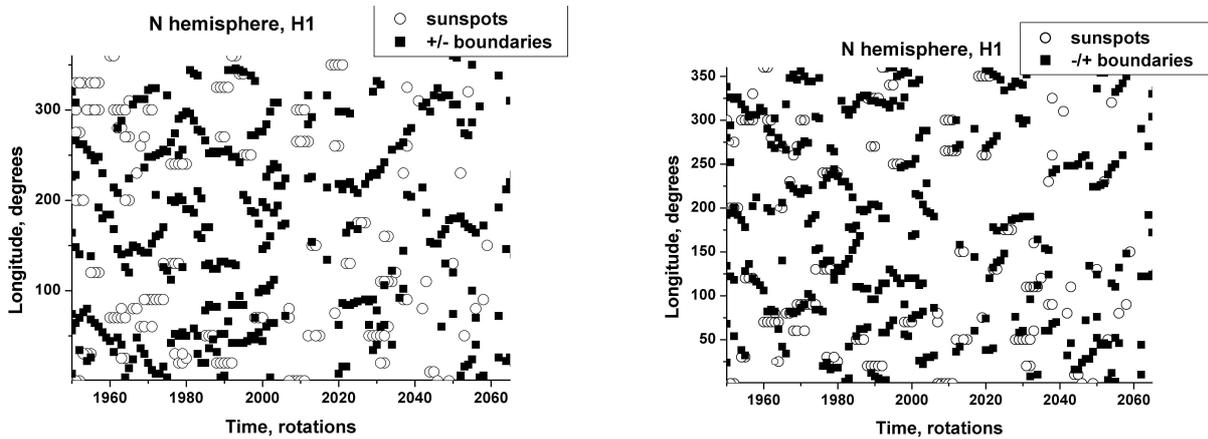


Рис. 4. Долготы крупных групп солнечных пятен и +/- (левый график) -/+ (правый график) границ структур крупномасштабного магнитного поля на высоте  $H = 1.25 R_0$  в северной полусфере в 23 цикле солнечной активности

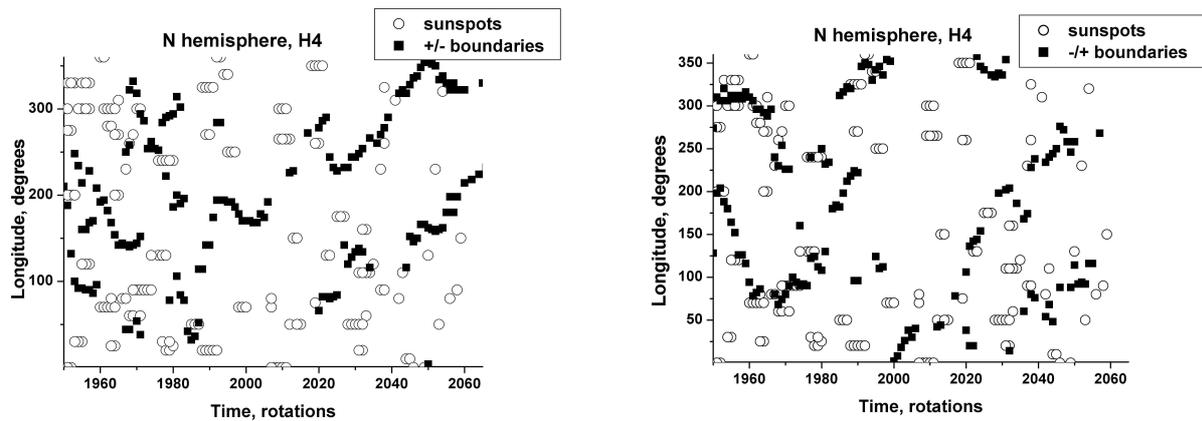


Рис. 5. То же, что и на рис. 4 на высоте  $H = 2 R_0$  в северной полусфере в 23 цикле солнечной активности

вверх) и живущих более 3–5 оборотов, пятна практически отсутствуют. На высоте  $H = 2 R_0$  (рис. 5) совпадений границ с пятнами значительно меньше. Только скопления групп на долготах  $300^\circ$  в оборотах около CR1960, на долготах  $70\text{--}80^\circ$  (обороты CR1960–CR1980) и на долготе  $350^\circ$  в оборотах CR1985–CR1995 совпадают с долгоживущими границами фоновых полей и на высоте  $H_6$ .

Этот результат свидетельствует о преимущественном вкладе в формирование крупномасштабных структур магнитного поля мелкомасштабных (фоновых) полей, а не полей солнечных пятен. Влияние пятен может проявляться в возникновении короткоживущих “хейловских” нулевых линий поля, разделяющих головные и хвостовые пятна в группах, что в свою очередь приводит к “замыванию” картины нулевых линий фонового поля. С ростом высоты влияние магнитных полей активных областей на картину фоновых полей уменьшается.

На уровне фотосферы на эти структуры крупномасштабного поля накладываются поля активных областей. Возникающие при этом короткоживущие границы Хейла замыкают картину распределения нулевых линий фонового поля.

Отсюда встает вопрос о том, до каких высот распространяется влияние групп пятен на структуру крупномасштабного поля.

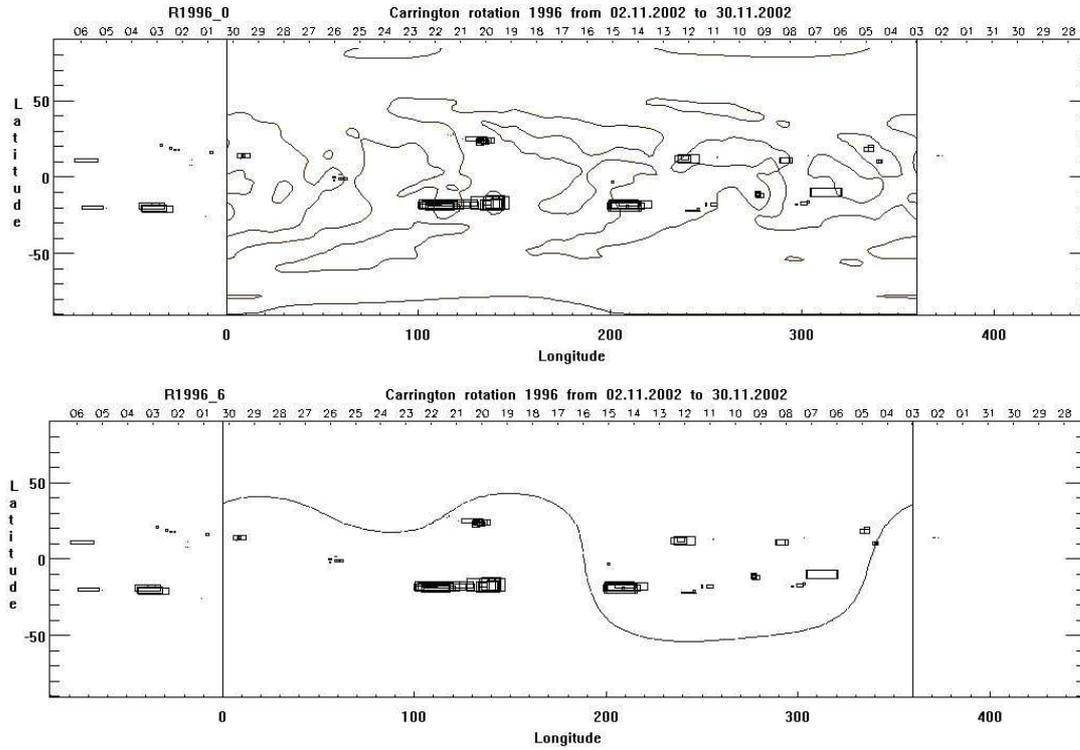
## 5 Сопоставление положений границ между структурами крупномасштабного магнитного поля на всех высотах с группами пятен

Для выяснения этого вопроса были использованы синоптические карты для оборотов CR1985–CR2060, охватывающих почти весь 23 цикл от фазы роста до минимума. Пример таких карт дан на рис. 6. На каждой синоптической карте мы определили число совпадений групп пятен с нулевой линией. На рис. 7 представлен результат подсчета таких совпадений для каждой высоты и двух временных интервалов, соответствующих периодам высокой и низкой активности (CR1985–CR 2005 и CR2040–CR2060 соответственно). Для фотосферы число совпадений принято за единицу.

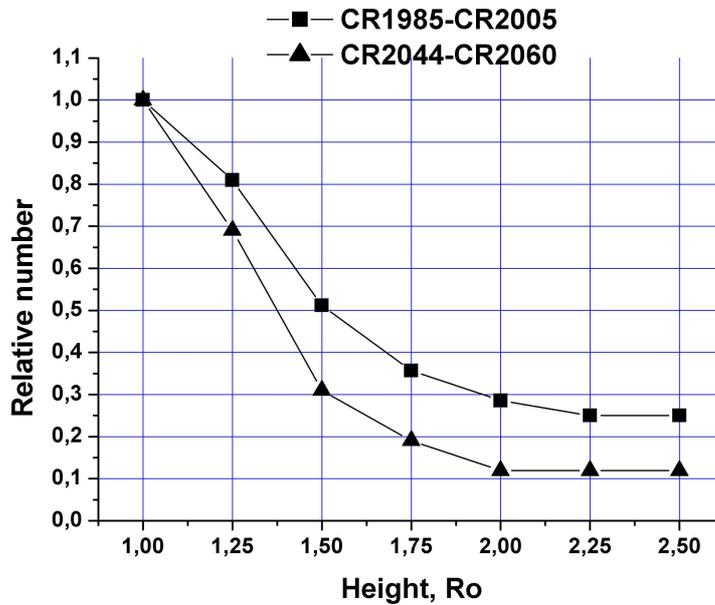
## 6 Определение максимальных напряженностей магнитного поля N- и S-полярности на девяти высотах

Обратимся к количественным оценкам напряженности магнитного поля на разных высотах.

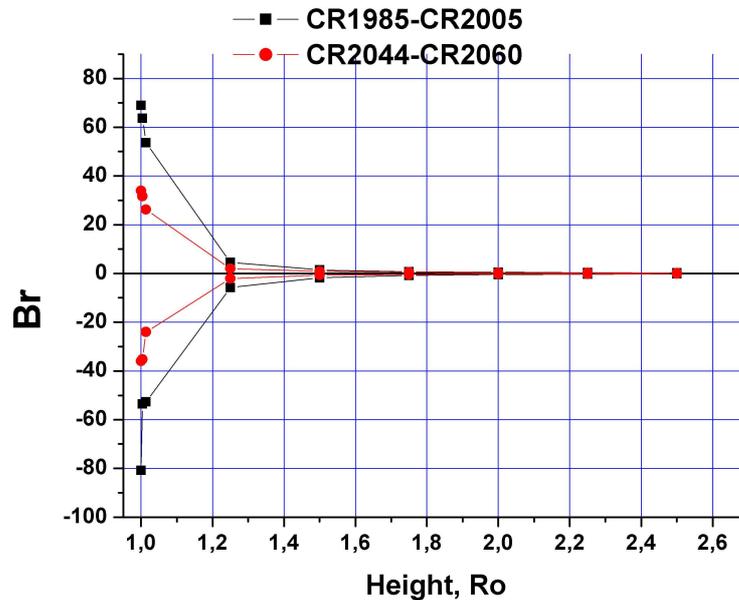
На синоптических картах, построенных для девяти высот, были определены максимальные значения напряженности  $B_g$  магнитного поля N- и S-полярности. Примем, что они определяются максимальной напряженностью в группах пятен. Для каждого из двух вышеупомянутых интервалов



**Рис. 6.** Синоптические карты оборота CR1996 с нанесенными группами пятен за все дни наблюдений (прямоугольники) и нулевыми линиями магнитного поля. Верхняя карта для высоты  $H_0$  (фотосфера), нижняя – для высоты  $H_8$  (поверхность источника,  $2.5 R_0$ )



**Рис. 7.** Среднее относительное число совпадений групп пятен с линией раздела полярностей магнитного поля на высотах от  $1 R_0$  до  $2.5 R_0$  для интервалов высокой и низкой солнечной активности



**Рис. 8.** Средние для двух периодов активности высотные распределения максимальных напряженностей магнитного поля

высокой и низкой активности были определены средние значения максимальной напряженности на каждой из девяти высот. Они показаны на рис. 8.

На рис. 9 эти же данные представлены для разных интервалов высот.

Из рассмотрения этих графиков можно сделать вывод, что напряженность магнитных полей, связанных с группами пятен, быстро падает с высотой. На высоте 1,1  $R_o$  напряженность магнитного поля в очень слабой степени зависит от полей групп пятен.

Выше мы получили, что связь нулевых линий крупномасштабных полей с крупными группами пятен сохраняется до высот 1,5  $R_o$  и более. Это, по-видимому, связано с влиянием на больших высотах полей флоккулов, существующих в активной области значительно дольше пятен и распространяющихся на большие высоты.

## 7 Результаты и выводы

Кратко основные результаты работы можно сформулировать следующим образом. Тремя способами было рассмотрено изменение структуры магнитного поля над группами пятен с высотой. В результате были сделаны следующие выводы.

Сопоставление долготных распределений крупных групп пятен и долгоживущих границ структур крупномасштабного магнитного поля показало, что на всех высотах  $H$ , начиная с  $H = R_o$ , группы пятен не связаны с долгоживущими границами крупномасштабных структур, вращающимися с периодом, меньшим кэррингтоновского. На высотах  $(1-1,5)R_o$  видна достаточно четкая связь групп пятен с границами Хейла. Периоды вращения таких структур близки к кэррингтоновским, а время жизни не превышает 3–5 оборотов. Дополнительно получено, что в 23 цикле нет явно выраженных активных долгот.

Сравнение по синоптическим картам расположения групп пятен относительно границ между структурами крупномасштабного магнитного поля на более высоких уровнях показало, что число групп, над которыми расположены границы, с ростом высоты уменьшается. На высоте  $H = 2,5 R_o$

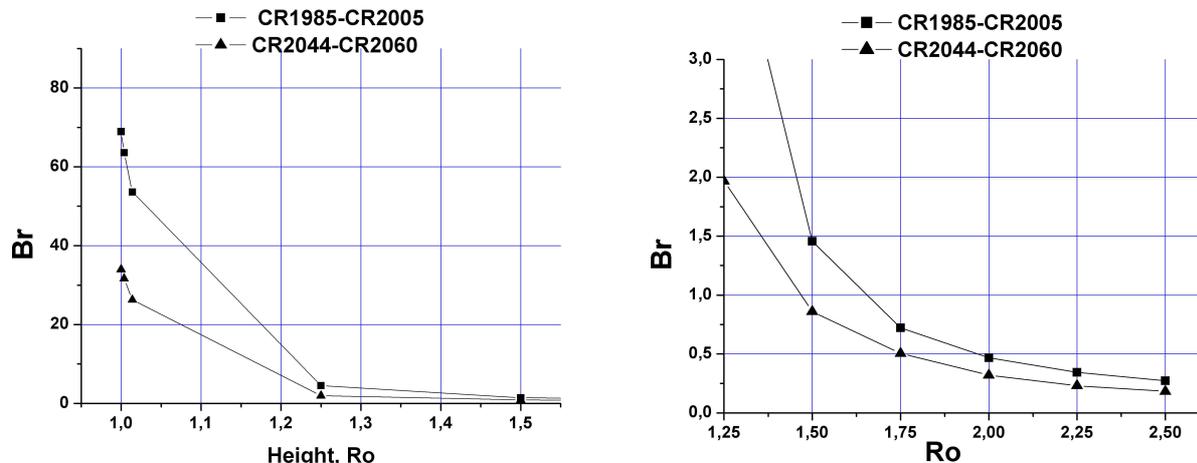


Рис. 9. То же, что и на рис. 8 для высот 1–1.5 Ro (левый график) и для высот 1.25–2.5 Ro (правый график)

число таких групп составляет 20 % от числа аналогичных групп на высоте  $H = 1.25$  Ro. Это значение получено как среднее для 20 кэррингтоновских оборотов для периода с высоким уровнем солнечной активности. При низкой активности в конце цикла процент таких групп снижается до 10 %.

Для периода высокой солнечной активности при увеличении высоты на 0.1 Ro средняя для 20 оборотов максимальная напряженность падает на 2 порядка. Дальнейший спад идет медленно (уменьшение на порядок к высоте 2.5 Ro). При низкой солнечной активности в конце цикла максимальные напряженности на низких высотах в 2–3 раза ниже, чем при высокой солнечной активности. На больших высотах разница существенно меньше (не более 20 %).

Все вышесказанное может свидетельствовать о том, что структуры крупномасштабных магнитных полей и долгоживущие границы между ними (линии раздела полярности поля) существуют независимо от полей солнечных пятен, т. е. формируются иными, чем солнечные пятна, источниками. На уровне фотосферы на эти структуры накладываются поля активных областей. Возникающие при этом короткоживущие нулевые линии, разделяющие головные и хвостовые пятна в группах (границы Хейла), замыкают картину распределения нулевых линий фонового поля. С ростом высоты влияние магнитных полей активных областей на картину фоновых полей уменьшается. Подтверждением такого вывода является различие в скоростях вращения границ структур фоновых полей на разных высотах и во времена различного уровня солнечной активности.

В то же время несовпадение групп пятен и линий раздела полярности поля на больших высотах может быть связано с другой причиной – отклонением пояса стримеров от радиального направления при удалении от поверхности Солнца. Чтобы разделить два указанных эффекта, необходимо провести дополнительные исследования. Это предполагается сделать в отдельной работе.

## Литература

- Баи (Bai T.) // *Astrophys. J.* 1987. V. 314. P. 795.  
 Баи (Bai T.) // *Astrophys. J.* 1988. V. 328. P. 860.  
 Бумба (Bumba V.) // XIV Consultation on solar physics./ Eds Rompolt B., Jakimiec J., Heinzel P. AI AS Czech Rep. Publ. 1998. №. 88. P. 1–9.  
 Бумба, Гестели (Bumba V., Gesztelyi L.) // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1987. V. 37. P. 352.  
 Бумба, Гестели (Bumba V., Gesztelyi L.) // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1988a. V. 39. P. 1.

- Бумба, Гестели (Bumba V., Gesztelyi L.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1988b. V. 39. P. 86.
- Бумба, Обридко (Bumba V., Obridko V.N.) // Solar Phys. 1969. V. 6. P. 104.
- Бумба, Хейна (Bumba V., Hejna L.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1991. V. 42. P. 5; P. 56.
- Бумба, Хейна (Bumba V., Hejna L.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1981. V. 32. P. 349.
- Бумба, Хейна (Bumba V., Hejna L.) // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1988. V. 39. P. 8.
- Бумба, Хейна (Bumba V., Hejna L.) // Publ. Debrecen Observ. 1990. V. 7. P. 92.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // Astrophys. J. 1961. V. 133. P. 572.
- Ванг и Шили (Wang Y.-M. and Sheeley N.R.Jr.) // Astrophys. J. 1992. V. 392. P. 310.
- Варвик (Warwick C.S.) // Astrophys. J. 1965. V. 141. P. 500.
- Вилкокс (Wilcox J.M., Hundhausen A.J.) // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 8095.
- Вилкокс, Шаттен (Wilcox J.N., Schatten K.H.) // Astrophys. J. 1967. V. 147. P. 364.
- Витинский Ю.И., Куклин Г.В., Обридко В.Н. // Солнечные данные. 1986. №. 3. С. 53.
- Говард, Лабонте (Howard R.H., Labonte B.J.) // Solar Phys. 1981. V. 74. P. 131.
- Головко А.А., Куклин Г.В. // Солнечный цикл. 1993. С. 56.
- Еселевич и др. (Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V.) // Solar Phys. 1999. V. 188. P. 277.
- Еселевич, Еселевич (Eselevich V.G., Eselevich M.V.) // Solar Phys. 2002. V. 208. P. 5.
- Иванов Е.В. // Солнечный цикл. 1993. С. 32.
- Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 56. С. 75.
- Котов В.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1979. Т. 62. С. 117.
- Мак-Интош П.С. // Наблюдения и прогноз солнечной активности. / Ред. Мак-Интош П.С.,  
Драйер М. М.: Мир. 1976. С. 43.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
- Северный (Severny A.V.) // Quart. J. Roy. Astron. Soc. 1971. V. 12. №. 4. P. 363.
- Северный (Severny A.V.) // Nature. 1969. V. 224. №. 5214. P. 53.
- Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 43.
- Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985. Т. 71. С. 62.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Ахтемов З.С., Руденко Г.В., Силакова Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. (в печати).
- Швестка (Shvestka Z.) // Solar Phys. 1968. V. 4. P. 18.