

УДК 523.98

Связь корональных дыр с границами структур крупномасштабных магнитных полей

В.М. Малащук¹, Г.В. Руденко², Н.Н. Степанян¹, В.Г. Файнштейн²

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

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, а/я 291, Россия

Поступила в редакцию 11 ноября 2010 г.

Аннотация. Проведено сравнение положений 665 корональных дыр (КД) относительно структур крупномасштабного магнитного поля на разных высотах. Показано, что 43 % рассмотренных КД не связаны с униполярными областями фонового магнитного поля на уровне фотосферы. С ростом высоты от 1 до 2.5 радиусов Солнца структура магнитных полей меняется у 57 % КД. В 16 % случаев изменения структуры заметны уже на высотах 2500–10000 км. Сопоставление положений КД с долготным распределением долгоживущих $+/-$ и $-/+$ границ крупномасштабных структур магнитного поля на всех высотах показало, что КД в 2 раза реже соприкасаются, или пересекаются, с границами Хейла, чем с границами, имеющими обратное распределение полей по обе стороны границы. Эти результаты свидетельствуют о более тесной связи КД с подфотосферными и фотосферными полями, чем с корональными. Магнитные поля корональных структур могут экранировать КД, создавая этим “закрытые” КД с ограниченным выходом высокоскоростных потоков солнечного ветра.

RELATIONSHIP BETWEEN CORONAL HOLES AND BOUNDARIES OF STRUCTURES OF THE LARGE-SCALE MAGNETIC FIELDS, *by V.M. Malashchuk, G.V. Rudenko, N.N. Stepanian, V.G. Fainshtein.* The comparison of observations of 665 coronal holes (CH) and structures of the magnetic field at different heights showed that 43 % of the observed CH are not associated with unipolar regions of the background field at the photosphere. With increasing height from 1 to 2.5 solar radii the structure of the magnetic field varies in 57 % of all CH. In 16 % of cases variations of the structure were already noticeable at heights of 2500–10000 km. The comparison of observations of CH with the longitudinal distribution of long-lived $+/-$ and $-/+$ boundaries of the large-scale structure of the magnetic field at all the heights was carried out. It was shown that CH intersect the Hale boundaries half as often as boundaries having the opposite distribution of the fields on both sides of the border. These results show a closer connection of CH with photospheric and subphotospheric fields than coronal. The magnetic fields of coronal structures can shield the coronal holes, thus creating “closed” CH with a limited output of high-speed streams of the solar wind.

Ключевые слова: Солнце, крупномасштабные магнитные поля, корональные дыры

1 Введение

Статья является одной из серии работ о влиянии места возникновения солнечных образований на их эволюцию, публикуемых в этом томе «Известий Крымской астрофизической обсерватории» (Файнштейн и др., 2011; Перебейнос и др., 2011).

Общеизвестно определение корональной дыры как протяженного объекта, расположенного в крупномасштабной структуре магнитного поля одного знака. При наблюдении в линии HeI она видна как яркая область с пониженным контрастом, а в корональных линиях – как темная область. С момента первых космических наблюдений корональных дыр на SKYLAB прошло много лет и выполнено много исследований. В частности, наблюдались корональные дыры, расположенные в областях смешанной полярности (Степанян, 1994; Степанян, Маланушенко, 2001). В работе Еселевич и Файнштейн (1989) был сделан вывод, что появление в пределах КД областей крупномасштабного магнитного поля с противоположной полярностью приводит к уменьшению скорости быстрого потока солнечного ветра, вытекающего из этой дыры. Серия работ, основанная на сравнении площадей корональных дыр в верхней хромосфере и в короне, привела к представлению о наличии «открытых» и «закрытых» КД, их связи с выходом высокоскоростных потоков солнечного ветра (Бугаенко и др., 2004 а, б, в; Житник и др, 2005).

В данной работе определяется изменение структуры и напряженности магнитного поля в корональных дырах в интервале высот от фотосферы до поверхности источника ($H = 2.5 R_{\odot}$, где R_{\odot} – радиус Солнца). Кроме того, проводится сравнение расположений корональных дыр относительно долгоживущих границ структур магнитных полей, наблюдаемых как на уровне фотосферы, так и на высотах до поверхности источника.

Исходным материалом послужили следующие данные для периода февраль 2000 г. – октябрь 2005 г., каррингтоновские обороты CR1960–CR2034.

1. Изображения Солнца в инфракрасной линии HeI λ 1083 нм. Изображения полного диска получены в НИИ «КрАО» в режиме мониторинга на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2. Для них было учтено потемнение к краю диска и проведена нормировка интенсивности. Интенсивность невозмущенного диска (I) принята за единицу. Изображения были переведены в гелиографические координаты и нанесены на синоптические карты соответствующих оборотов Солнца. Примеры изображений Солнца и синоптической карты даны на рис. 1 и рис. 2.

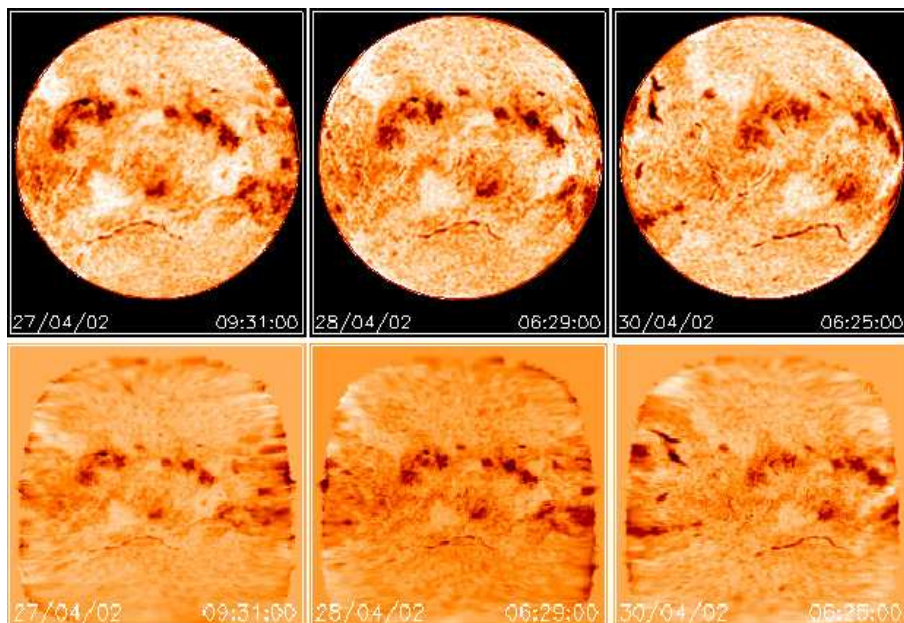


Рис. 1. Изображения Солнца в линии HeI 1083 нм 27, 28 и 30 апреля 2002 г. (верхний ряд). В нижнем ряду – эти же изображения, переведенные в гелиографические координаты

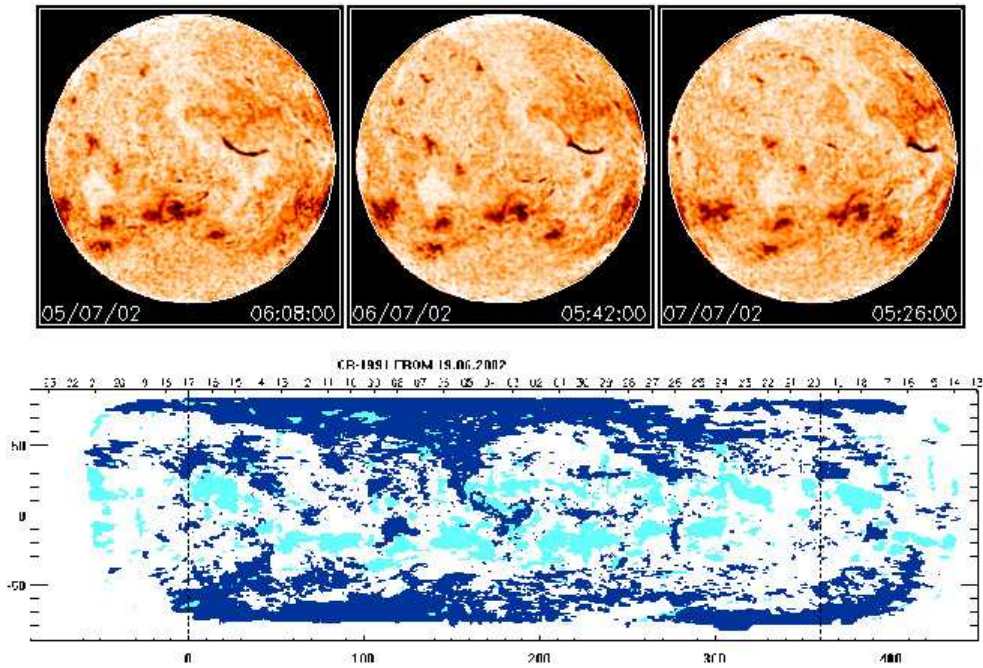


Рис. 2. Изображения Солнца в линии HeI 1083 нм 5, 6, 7 июля 2002 г. (верхний ряд). В нижнем ряду – синоптическая карта для оборота CR1991(20.06.2002–17.07.2002). Темные участки – корональные дыры ($I > 1.01$), светлые – активные области ($I < 0.9$)

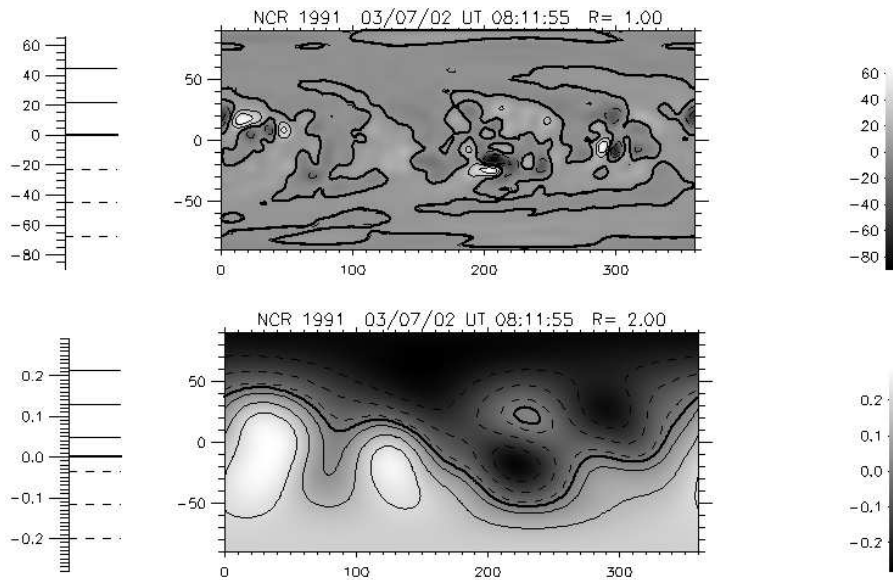


Рис. 3. Синоптические карты оборота CR1991 на высотах $H = R_0$ и $H = 2R_0$

Таблица 1. Высоты H , для которых были построены синоптические карты продольного магнитного поля Солнца

Высота	
Обозначение	H, R_0
H0	1
H7	1.0036
H8	1.0144
H1	1.25
H2	1.50
H3	1.75
H4	2.0
H5	2.25
H6	2.50

2. Синоптические карты с нанесенными на них нулевыми линиями радиального магнитного поля для восьми высот в атмосфере Солнца.

Карты были построены на основе ежедневных наблюдений 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 компонента 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 радиальным (Ванг и Шили, 1992). Расчеты магнитного поля в короне проводились с использованием Vd-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. В качестве примера на рис. 3 представлены карты для оборота CR1991 на высотах $H = R_0$ (фотосфера) и $H = 2R_0$.

В таблице 1 даны высоты в атмосфере Солнца, для которых были построены синоптические карты.

3. Долготные распределения долгоживущих границ между крупномасштабными структурами магнитного поля.

В работе (Файнштейн и др., 2011) были приняты следующие определения крупномасштабного и фонового магнитного поля Солнца.

Солнечное магнитное поле состоит из двух компонент: слабого магнитного поля, занимающего всю поверхность Солнца (фоновое поле), и сильного магнитного поля, возникающего с рождением активных образований. Уменьшение пространственного разрешения поля при наблюдениях приводит к тому, что оба типа магнитного поля все больше 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.

Данные о распределении долгоживущих границ между секторами крупномасштабных магнитных полей были взяты нами для рассматриваемого периода из работы (Файнштейн и др., 2010). Для двух высот они приведены на рис. 4.

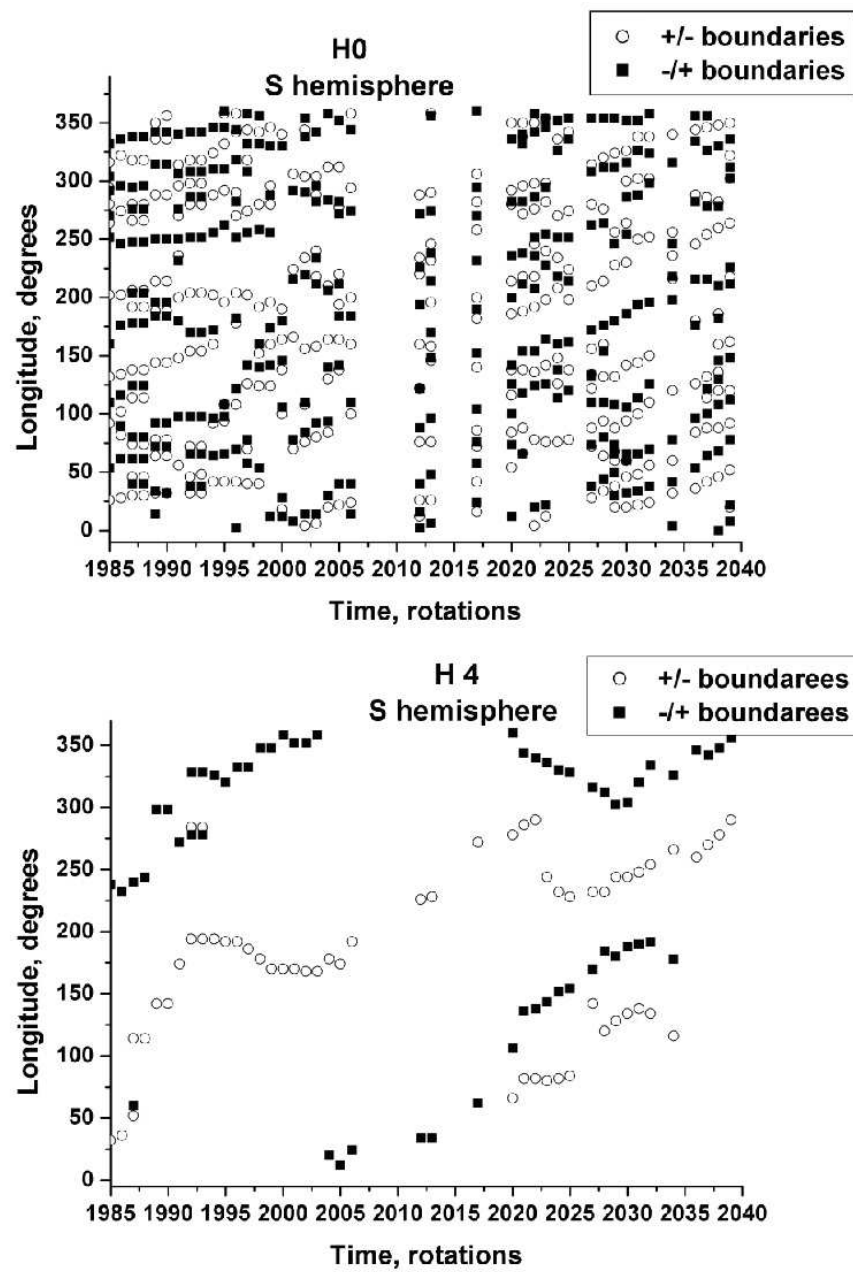


Рис. 4. Долготные распределения долгоживущих границ между секторами крупномасштабных полей для интервала оборотов CR1985–CR2034 для высот $H = R_0$ и $H = 2 R_0$

2 Обработка наблюдений

Из массива данных наблюдений в линии HeI λ 1083 нм были выбраны изображения Солнца с корональными дырами. На них было найдено 665 корональных дыр (далее КД). Из них 284 КД содержали активные области, а 381 – не содержали. Каждая КД вошла в список столько раз, сколько было для нее дней наблюдений.

Из ежедневных изображений Солнца были сформированы синоптические карты, которые были совмещены для восьми высот с синоптическими картами радиальной компоненты магнитного поля B_r . На картах поля были нанесены только нулевые линии B_r . Для каждой КД были определены номер оборота и гелиографические координаты L (долгота) и φ (широта) ее центра тяжести.

Для всех КД на всех рассмотренных высотах были определены следующие параметры, характеризующие связь КД с высотной стратификацией магнитного поля в атмосфере Солнца.

1. Прохождение нулевой линии магнитного поля через КД. Значение параметра равно 0, если нулевая линия не проходит через КД, и 1 – если проходит.
2. Прохождение нулевой линии магнитного поля по границе КД. Значение параметра равно 0, если нулевая линия не проходит по границе КД, и 1 – если проходит.
3. Знак магнитного поля в области КД для случая, когда первые два параметра равны нулю.

На основе полученных данных были решены 2 задачи.

2.1 Изменение структуры магнитного поля с высотой в области корональных дыр

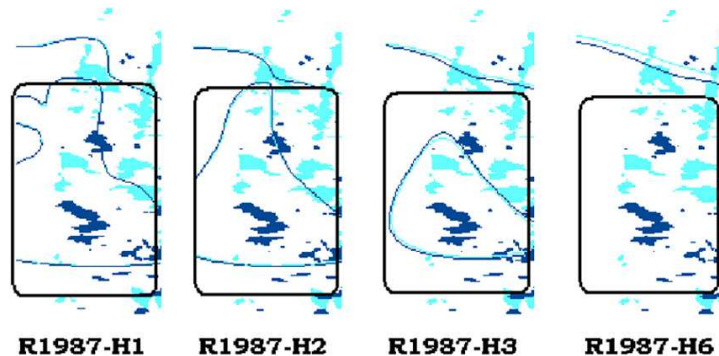


Рис. 5. Структура магнитного поля на высотах H1–H3, H6 ($1.25 R_o$ – $1.75 R_o$, $2.5 R_o$) над участком Солнца с двумя небольшими корональными дырами в обороте CR1987. Темные участки – корональные дыры, наблюдаемые в линии HeI 1083 нм, светлые участки – активные области. Сплошные линии – нулевые линии магнитных полей, рассчитанные для каждой высоты

В качестве характеристики изменения магнитного поля в области КД с высотой рассматривалось изменение с высотой названных выше параметров 1–3.

Назовем магнитное поле в области КД на любой высоте сложным, если один из двух первых параметров равен 1.

На уровне фотосферы (высота H_0) магнитное поле в области КД было сложным в 297 случаях из 665 (45 % изученных КД).

С изменением высоты от $1 R_o$ до $2.5 R_o$ структура поля в области КД изменилась в 379 КД из рассмотренных 665 (57 % КД). В качестве примера изменения структуры магнитного поля в области

Таблица 2. Напряженности магнитного поля в области КД на разных высотах для оборота CR2034

Высота		Напряженность поля в КД, Гс		Макс. напряженность на карте, Гс	
Обозначение	Ro	S-поле	N-поле	S-поле	N-поле
H0	1	1.2–2.5	0.15–1.4	58	114
H7	1.0036	1	0.7	54	107
H8	1.0144	0.7	0.6	42.8	89
H1	1.25	0.1	0.2	1.7	5.5
H2	1.50	0.4	0.4	1.43	1.40
H3	1.75	0.22	–	0.35	0.55
H4	2.0	0.1	–	0.2	0.4
H5	2.25	0.07	–	0.17	0.2
H6	2.50	0.06	–	0.14	0.15

КД на рис. 5 приведены положения рассчитанных нулевых линий магнитного поля, нанесенные на участок синоптической карты с двумя КД. Как видим, знак поля над этими КД менялся с высотой.

Особый интерес представляет сравнение структуры поля на высотах R_0 , $1.0036 R_0$ и $1.014 R_0$. Высота R_0 соответствует фотосфере, $1.0036 R_0$ – средней высоте образования свечения КД в линии HeI 1083 нм, $1.014 R_0$ – характерная высота хромосферных спикул (10000 км). В работах, рассматривающих магнитное поле в КД, обычно молчаливо предполагается, что структура поля в области КД, наблюдаемой в линии HeI 1083 нм, такая же, как в фотосфере. Мы нашли 105 случаев, когда структура поля на этих двух высотах не совпадала (16 % рассмотренных КД).

С ростом высоты от $H = R_0$ до $H = 1.014 R_0$ напряженность магнитного поля резко падает. Это справедливо не только для КД, но и для максимальных и средних напряженностей всего диска.

В таблице 2 приведены средние напряженности магнитного поля ($|B_r|$) в области одной КД в обороте CR2034 на разных высотах. Начиная с высоты $H = 1.75 R_0$ над КД расположена область S-поля.

2.2 Связь корональных дыр с долгоживущими $+/-$ и $-/+$ границами крупномасштабных структур магнитного поля

Для решения этой задачи были найдены долготы центров тяжести КД в каждой полусфере. Они были последовательно совмещены с долготным распределением $+/-$ и $-/+$ границ на семи высотах, полученных в работе (Файнштейн и др., 2010). 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 $-/+$ в N-полусфере и $+/-$ в S-полусфере.

На рис. 6 в качестве примера приведено наложение долгот центров тяжести КД в интервале оборотов CR1985–CR2034, наблюдавшихся в N-полусфере, на долготное распределение $+/-$ и $-/+$ границ фоновых полей. Верхний график относится к высоте $H = R_0$, а нижний – к высоте $H = 2 R_0$.

Сравнение числа совпадений долгот $+/-$ и $-/+$ границ фоновых полей и КД показало, что число совпадений с границами обоих типов примерно одинаково. Но, если рассматривать только границы, существующие не менее 5 оборотов, то результат заметно изменяется. Он приведен на рис. 7.

КД гораздо реже соприкасаются с границами, или пересекаются ими, характер изменения знака поля у которых такой же, как у групп пятен в полусфере расположения КД, т. е. как у границ Хейла.

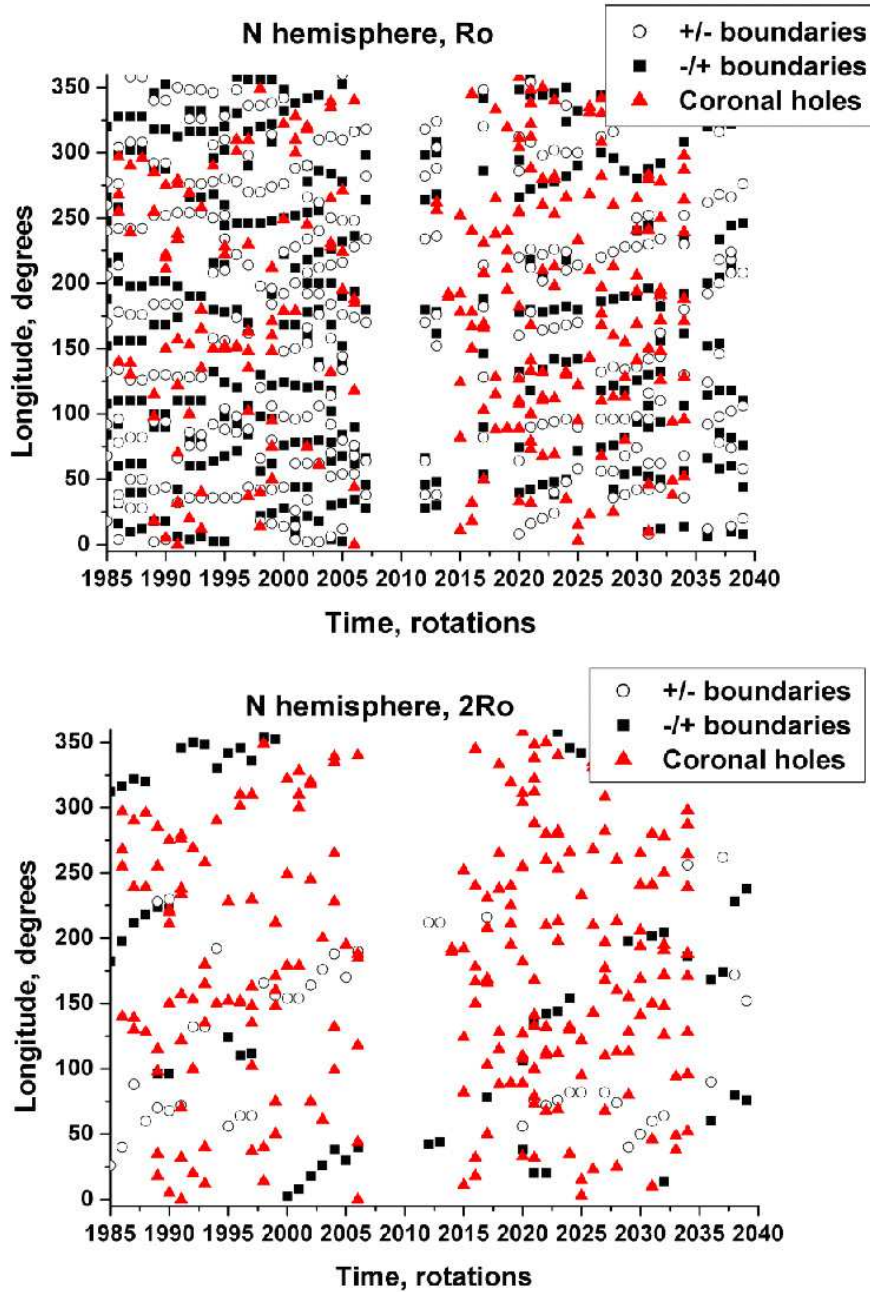


Рис. 6. Наложение долгот КД в интервале оборотов CR1985–CR2034, наблюдавшихся в N-полусфере, на долготное распределение +/- и -/+ границ фоновых полей. Верхний график относится к высоте $H = R_o$, а нижний – к высоте $H = 2 R_o$. Полыми кружками обозначены долготы +/- границ, сплошными прямоугольниками – долготы -/+ границ, треугольниками – долготы корональных дыр

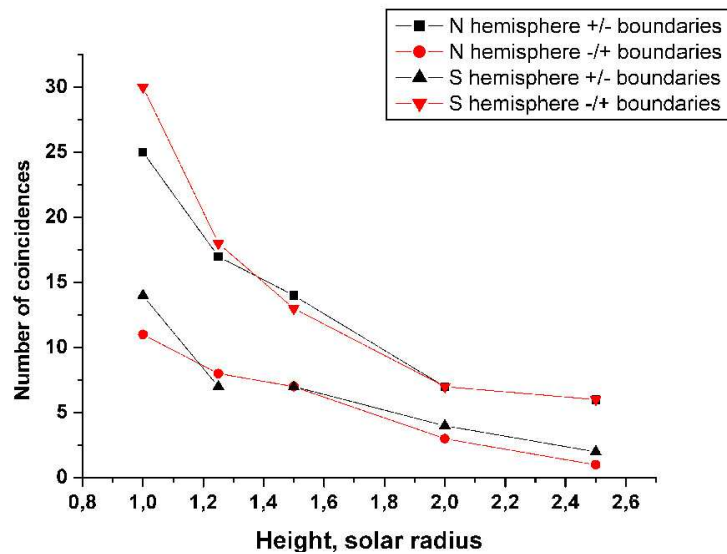


Рис. 7. Число совпадений КД (в интервале оборотов CR1985–CR2034) с долгоживущими границами фоновых полей. Две нижние кривые относятся к границам Хейла в N- и S-полушариях

Это, возможно, свидетельствует о значительной глубине образования КД и подтверждает представление о подфотосферном источнике КД. Аналогичный вывод получен в работе Степанян (1993) в результате сравнения характеристик КД и фоновых полей, полученных по наблюдениям в линии H_{α} . Исследование колебательных процессов в области КД и вне их на уровне хромосферы и фотосферы также свидетельствует о подфотосферном источнике КД (Маланушенко и др., 1999).

3 Выводы

Сравнение положений 665 КД относительно различных элементов магнитного поля на разных высотах показало:

- 43 % КД не связаны с униполярными областями фоновых полей на уровне фотосферы;
- у 57 % КД структура магнитных полей меняется с ростом высоты от $H = 1 R_{\odot}$ до $H = 2.5 R_{\odot}$;
- у 16 % КД изменение структуры заметно на высотах 2500–10000 км;
- напряженность магнитного поля в области КД падает на 2 порядка с ростом высоты на $H = 1.5 R_{\odot}$;
- КД в 2 раза реже соприкасаются, или пересекаются, с долгоживущими границами крупномасштабных структур магнитного поля, характер изменения знака поля у которых такой же, как у групп пятен в полушарии расположения КД (с границами Хейла).

Эти результаты свидетельствуют о более тесной связи КД с подфотосферными и фотосферными полями, чем с корональными.

Магнитные поля корональных структур могут “экранировать” КД, создавая этим “закрытые” КД с ограниченным выходом высокоскоростных потоков солнечного ветра.

Полученные результаты следует считать предварительными. При их получении не учитывалось, например, возможное отклонение с высотой открытого магнитного поля из КД от радиального направления, а также изменение сечения открытой магнитной трубки (т. е. КД) с высотой. Кроме этого, нужно учесть, что расчеты магнитного поля в потенциальном приближении характеризуются погрешностью. Это может приводить, в частности, к появлению ложных пересечений КД границами. Учет этих факторов требует дополнительного, довольно сложного анализа. Мы предполагаем провести такой анализ в следующей работе.

Литература

- Бугаенко О.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004а. Т. 100. С. 110.
- Бугаенко О.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004б. Т. 100. С. 123.
- Бугаенко О.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004в. Т. 100. С. 136.
- Ванг и Шелли (Wang Y.-M. and Sheeley N.R., Jr.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310.
- Еселевич, Файнштейн (Eselevich V.G., Fainshtein V.G.) // *Planetary Space Sci.* 1989. V. 37. №. 9. P. 1027.
- Житник И.А., Жигалкин Р.К., Игнатъев А.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 128.
- Маланушенко и др. (Malanushenko E.V., Malanushenko V.P., Stepanian N.N.) // *Motions in the solar atmosphere.* Kluwer Acad. Publ. 1999. P. 251.
- Перебейнос В.А., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. (в печати).
- Руденко (Rudenko G.V.) // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 5.
- Степанян (Stepanian N.) // *IAU Coll 144.* 1994. P. 61.
- Степанян Н.Н. // *Солнечный цикл.* Спб.: 1993. С. 44.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 76.
- Файнштейн В.Г. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. №. 1. С. 7.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Ахтемов З.С., Руденко Г.В., Силакова Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. (в печати).