

УДК 523.98

Свойства магнитных полей корональных дыр на Солнце с активными областями

В.Г. Файнштейн¹, Н.Н. Степанян², Г.В. Руденко¹, В.М. Малащук², Л.К. Кашапова¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Российская Федерация, Иркутск

² НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
nataly@crao.crimea.ua, mvm@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 14 октября 2009 г.

Аннотация. Работа посвящена определению структуры магнитных полей корональных дыр (КД) и исследованию ее изменения в связи с возникновением в КД активных областей (АО). По наблюдениям в линии HeI 1083 нм, проводимым на телескопе БСТ-2 НИИ “КрАО”, были отобраны КД двух видов: без активных областей внутри них (15 КД) и с активными областями (28 КД). Для расчетов магнитных полей тех же объектов использовались магнитограммы, полученные в Национальной солнечной обсерватории Китт Пик.

Методом Руденко были рассчитаны в потенциальном приближении характеристики магнитного поля на нескольких высотах в короне, а именно: средние значения по площади КД радиальной компоненты поля $\langle B_r \rangle$ и ее модуля, $\langle |B_r|/B \rangle$, и максимальные и минимальные по площади КД значения B_r . Были построены распределения изолиний этих параметров, наложенные на изображения КД, и силовые линии рассчитанного магнитного поля с разрешением 33.4" и 100.2" на поверхности Солнца. На основании анализа этих данных получены следующие результаты:

- Линии поля, возникающие в КД без АО, являются открытыми или очень высокими петлями, замыкающимися вне КД. Последнее происходит в полностью или частично закрытых КД.
- Система открытых петель устойчива, мало меняется с рождением АО и полностью восстанавливается после исчезновения АО.
- АО, возникающие внутри КД, – биполярные или мультиполярные магнитные структуры. Они формируются замкнутыми линиями поля.
- Линии поля, начинающиеся в АО, замыкаются либо внутри АО, либо в ближайшей окрестности АО в КД.
- Практически отсутствует связь АО внутри КД с внешними АО или другими местами вне КД.

PROPERTIES OF MAGNETIC FIELDS OF CORONAL HOLES ON THE SUN WITH ACTIVE REGIONS, *by V.G. Fainshtein, N.N. Stepanian, G.V. Rudenko, V.M. Malashchuk, L.K. Kashapova.* Work is devoted to definition of structure of magnetic fields of coronal holes (CH) and research of its change in connection with occurrence active regions (AR) in CH. From observations in the line of HeI 1083 nm obtained on telescope TST-2 SRI “CrAO” have been selected CH of two kinds: without AR in them (15 CH) and with AR (28 CH). Calculations of magnetic fields of thesame objects used magnetograms, received in the National Solar Observatory the Kitt Peak.

Some characteristics of a magnetic field have been calculated by Rudenko’s method in potential approach for several heights in the solar atmosphere. Namely, average values of radial components of field $\langle B_r \rangle$, its module on area CH, $\langle |B_r|/B \rangle$, and maximum and minimum of value B_r on area of

CH. Distributions of isolines of these parameters, imposed on images CH, and field lines of the calculated magnetic field with the resolutions 33.4'' and 100.2'' on the solar surface have been constructed. On the basis of the analysis of this data such results are received:

- The field lines beginning in CH without AR are opened ones or its are very high loops which ended out of a CH. The last occurs in the full or in part closed CH.
- The system of open loops is steady; it varies a little after a birth of AR and it is completely restored after AR disappearance.
- The AR arising inside CH are bipolar or multipolar magnetic structures. They are formed by the closed field lines.
- The field lines beginning in AR are closed either in AR, or in the vicinity of AR in CH.
- There is no AR connection inside CH with external AR or with other places out of a CH.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, активные области, магнитные поля

1 Введение

В последнее время проблема связи активных областей (АО) с корональными дырами (КД) вызывает все больший интерес исследователей. Рассматриваются разные аспекты этой проблемы: КД как последний этап развития АО (Бумба и др., 2007), исчезновение КД в связи с развитием АО и появлением вспышки вблизи КД, эволюция АО, возникшей в КД (Маланушенко, Степанян, 2001; Бугаенко и др., 2004а; Степанян, Малащук, 2008). В последней работе рассмотрены случаи возникновения и развития АО в КД. Общим для всех работ является устойчивость границ КД при развитии АО. Границы КД не меняются до их исчезновения в момент соприкосновения АО с границей КД. После распада АО во многих случаях КД восстанавливается почти в прежнем виде. Такой результат получен для хромосферных и корональных слоев атмосферы Солнца. Это свидетельствует о том, что структура магнитного поля вблизи границ КД является очень устойчивой, и она препятствует взаимодействию нового магнитного потока с магнитными полями вне КД.

Настоящая работа посвящена определению структуры магнитных полей КД и исследованию изменения ее в связи с возникновением в КД активных областей.

2 Наблюдения и их обработка

По наблюдениям в линии HeI 1083 нм, проводимым на телескопе БСТ-2 НИИ "КрАО", были отобраны КД двух видов: без активных областей внутри них и с активными областями. Пример таких КД приведен на рис. 1.

Для расчетов магнитных полей тех же объектов использовались магнитограммы, полученные в Национальной солнечной обсерватории Китт Пик – *Kitt Peak (NSO)*. Список наблюдений дан в таблице 1.

3 Метод расчета магнитного поля в КД

Для выяснения свойств магнитного поля в КД с АО и без АО использовались расчеты магнитного поля в короне в потенциальном приближении с использованием *Vd*-технологии (Руденко, 2001). Суть этой технологии заключается в том, что при решении задачи Лапласа для потенциала магнитного поля в качестве граничного условия на всей видимой поверхности Солнца используется "мгновенное" (усредненное лишь за время измерения магнитограммы) распределение измеряемой

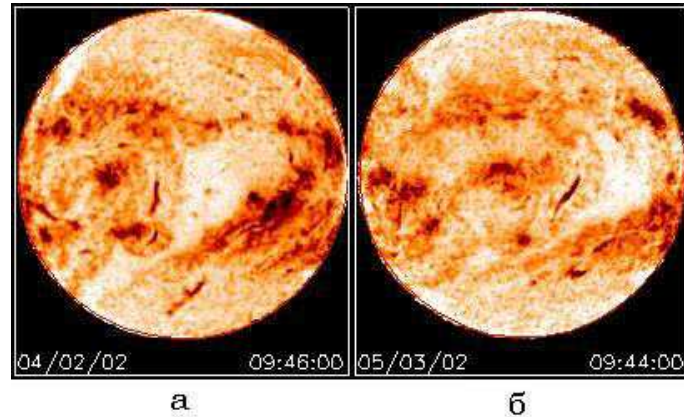


Рис. 1. Изображения Солнца в линии HeI 1083 нм с корональными дырами, содержащими активную область (а) и не содержащими активную область (б)

продольной компоненты магнитного поля (B_d -компоненты) от фотосферы до поверхности источника – сферы радиусом $R_S = 2.5 R_0$ (R_0 – радиус Солнца). Для этого используются магнитограммы высокого пространственного разрешения. До сентября 2003 г. это были магнитограммы, получаемые в Национальной солнечной обсерватории Китт Пик. С помощью этих распределений магнитного поля в расчетной области, включая область измерения поля в фотосфере (“поверхность” Солнца), могут быть определены все компоненты магнитного поля, а также модуль поля.

Таблица 1. Список наблюдений

КД с АО				КД без АО	
№ п.	Дата	№ п.	Дата	№ п.	Дата
1	09.11.1999	16	20.05.2002	1	04.11.1999
2	10.11.1999	17	26.05.2002	2	05.11.1999
3	11.11.1999	18	10.06.2002	3	06.11.1999
4	25.10.2001	19	14.06.2002	4	08.12.2001
5	29.10.2001	20	20.06.2002	5	29.10.2001
6	07.12.2001	21	21.06.2002	6	03.12.2001
7	03.02.2002	22	03.10.2002	7	05.03.2002
8	04.02.2002	23	10.10.2002	8	06.03.2002
9	06.02.2002	24	21.11.2002	9	06.07.2002
10	12.02.2002	25	31.05.2003	10	07.07.2002
11	16.02.2002	26	17.10.2007	11	09.07.2002
12	12.05.2002	27	18.10.2007	12	10.07.2002
13	13.05.2002	28	19.10.2007	13	10.10.2002
14	16.05.2002			14	19.11.2002
15	17.05.2002			15	21.11.2002

Специальная программа позволяет провести силовые линии магнитного поля из любой точки на поверхности Солнца и определить как параметры этой силовой линии, так и свойства магнитного поля вдоль силовой линии.

С помощью двух программ находились усредненные характеристики различных компонент поля

в области корональных дыр. Одна программа позволяла находить усредненные характеристики поля на разных высотах в пределах “параллелепипеда” с основанием $15^\circ \times 15^\circ$. Недостатком этой программы является то, что в некоторых случаях основание расчетной области оказывалось меньше площади корональных дыр.

Вторая программа позволяла находить усредненные характеристики магнитного поля на поверхности Солнца как в пределах границы любой корональной дыры, так и в пределах произвольной ее части.

Были рассчитаны следующие характеристики магнитного поля в КД на нескольких высотах:

- средние значения по площади КД радиальной компоненты поля $\langle B_r \rangle$;
- среднее значение модуля радиальной компоненты $\langle B_r \rangle$;
- максимальное и минимальное по площади КД значение B_r : $\max B_r$ и $\min B_r$;
- среднее значение $\langle |B_r|/V \rangle$, характеризующее наклон силовой линии к радиальному направлению. Максимальные и минимальные значения этих величин во всех рассмотренных случаях равны соответственно 1 и 0.

Усреднения проводились для “прямоугольника” на сфере размером $15^\circ \times 15^\circ$ по меридиану и параллели. Центр этого прямоугольника совмещался с центром КД.

Высоты, на которых проводился анализ, следующие: 0, 1250, 2800, 15000, 20000 км.

Они были выбраны из следующих соображений. Высота, обозначаемая “0”, – высота измерения магнитного поля. Высота $H = 1250$ км – примерно середина хромосферы, условная высота формирования линии 1083 нм. Высота $H = 2800$ км – высота измерения на радиогелиографе “Нобейма”. Высоты $H = 15000$ км и $H = 20000$ км – вероятные высоты измерения на радиотелескопе ИСЗФ.

Помимо получения средних значений параметров магнитного поля были построены распределения изолиний этих параметров, наложенных на изображения КД.

Кроме того, были построены силовые линии рассчитанного магнитного поля с разрешением $33.4''$ и $100.2''$ на поверхности Солнца.

4 Результаты анализа

4.1 Средние значения параметров КД на разных высотах

Остановимся сначала на результатах, полученных при изучении средних параметров магнитного поля в КД с активными областями и без них.

Полезную информацию о различии магнитных полей в КД с АО и без АО дают распределения $\langle |B_r|/V \rangle$ в области КД.

На рис. 2 приведены изменения $\langle |B_r|/V \rangle$ с высотой для четырех КД. Две из них содержат АО (КД1 и КД2) и две не содержат АО (КД3 и КД4). На фотосфере и до расстояния $H = 2800$ км $|B_r|/V$ во всех КД близки и уменьшаются с ростом расстояния. Это свидетельствует о том, что на данных расстояниях есть много низких магнитных петель, в которых с высотой величина $|B_r|/V$ должна уменьшаться. Очевидно, что вблизи вершины петли $\langle |B_r|/V \rangle \sim 0$. На больших расстояниях, $H = 15000$ – 20000 км, в КД1 с большой АО величина $\langle |B_r|/V \rangle$ примерно такая же, как и в области измерения магнитного поля. В то же время в остальных КД $\langle |B_r|/V \rangle$ заметно возрастает. Это можно интерпретировать следующим образом. В КД с большой активной областью замкнутые силовые линии распространяются до больших высот. А в остальных КД их доля уменьшается на больших высотах. Там преобладают открытые линии поля.

Изменение среднего значения модуля B_r ($\langle |B_r| \rangle$) с высотой для этих КД представлено на рис. 3, где видно, что поле в КД с большой АО (КД2) характеризуется повышенными значениями поля по сравнению с КД без АО (КД3, КД4) или с маленькой АО (КД1).

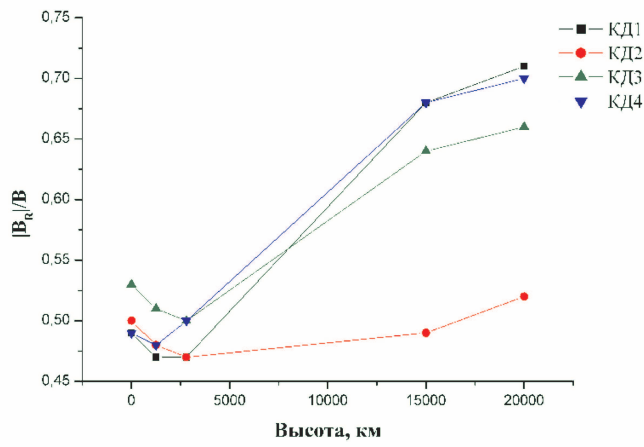


Рис. 2. Изменение $\langle |B_r|/B \rangle$ с высотой для четырех КД

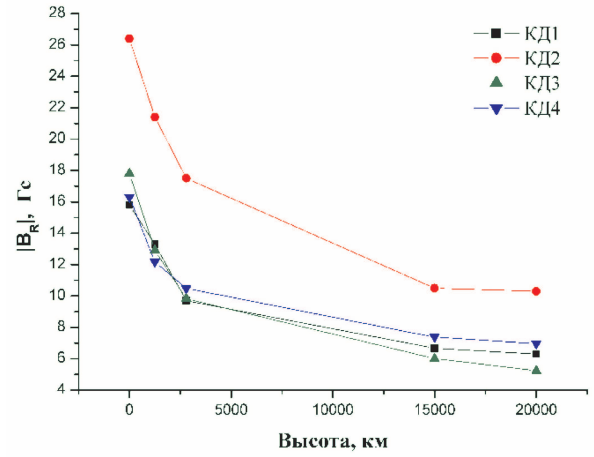


Рис. 3. Изменение среднего значения модуля B_r ($\langle |B_r| \rangle$) с высотой для четырех КД

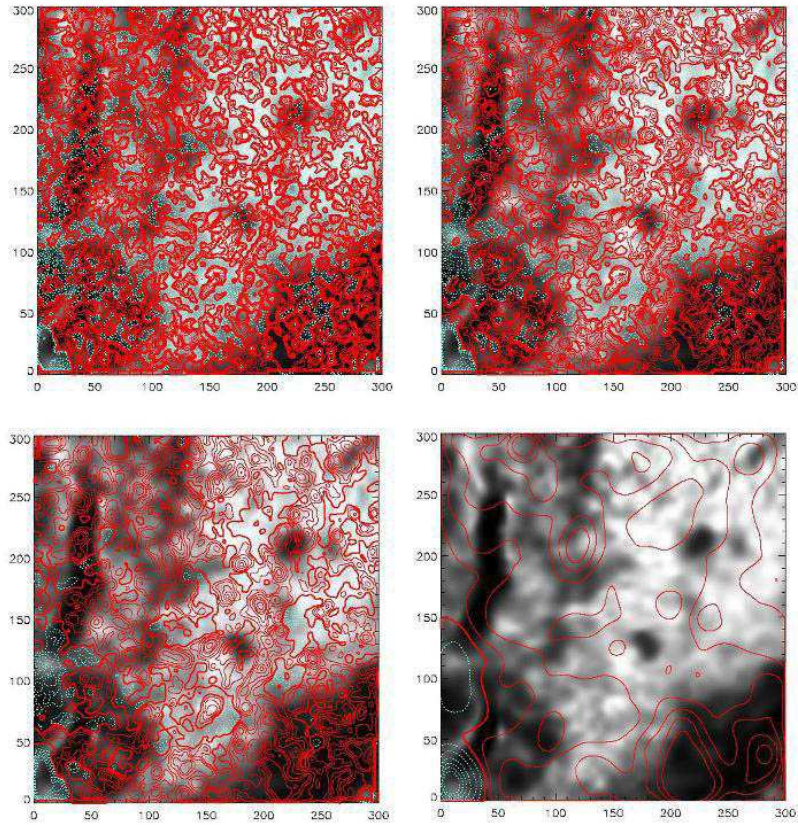


Рис. 4. Карты $|B_r|/B$ для КД1 на высотах 0 и 1250 км в верхнем ряду, 2800 и 20000 км – в нижнем

4.2 Распределение параметров магнитного поля по поверхности КД на разных высотах

Перейдем к результатам, полученным из распределений изолиний параметров магнитного поля, наложенных на изображения КД.

На рис. 4 приведены такие карты для $|B_r|/V$ на нескольких высотах для КД1(d02008). На изолиниях $|B_r|/V$ жирная линия соответствует $|B_r|/V = 0$, тонкие сплошные линии соответствуют $|B_r|/V > 0$, точки – $|B_r|/V < 0$.

Величина $|B_r|/V$, определяющая степень отклонения линий магнитного поля от радиального направления, на высотах 0, 1250 км, 2800 км характеризуется чередованием мелкомасштабных областей с $|B_r|/V > 0.5$ и $|B_r|/V < 0.5$ для всех рассмотренных КД. Это косвенно отражает тот факт, что здесь замкнутые магнитные петли, с одной стороны, имеют маленькие размеры, с другой – существует спектр этих размеров: одни петли больше, другие меньше.

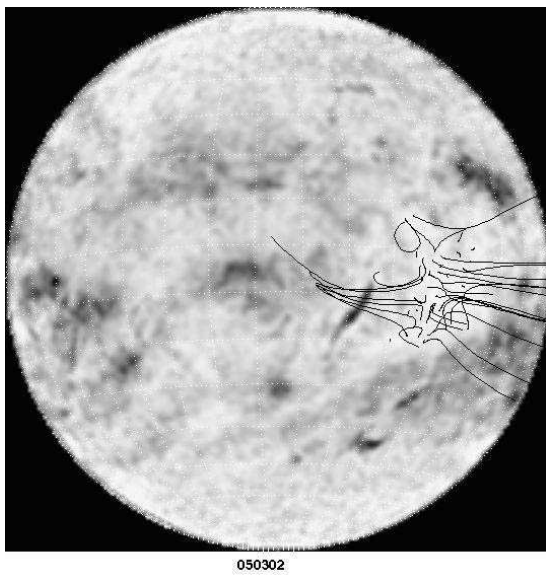


Рис. 5. Силовые линии, рассчитанные для КД3 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм

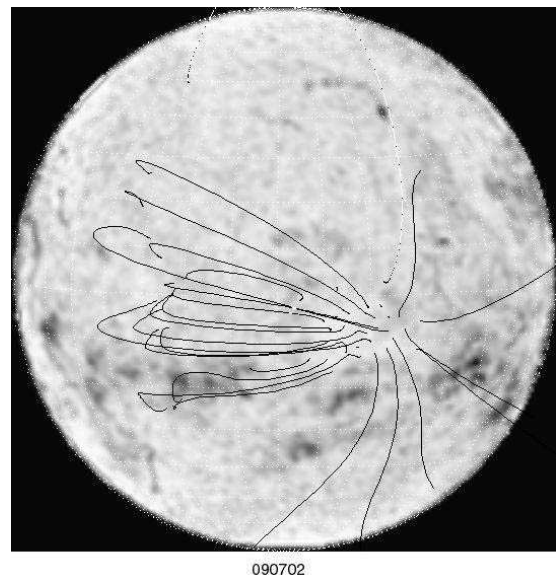


Рис. 6. Силовые линии, рассчитанные для КД4 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм

Вверху ($H = 15000\text{--}20000$ км) в КД без АО преобладают $|B_r|/V > 0.5$, а в КД с АО есть по несколько обширных областей с $|B_r|/V > 0.5$ и $|B_r|/V < 0.5$.

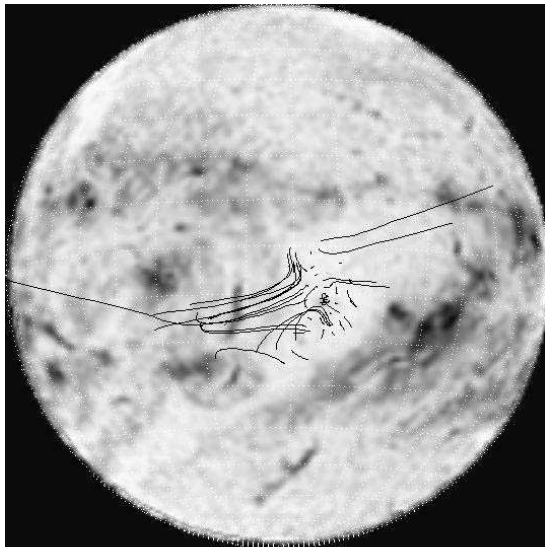
4.3 Силовые линии в КД без АО

Рассмотрим картину силовых линий в КД с АО и без них.

Для большинства КД без АО в случае низкого пространственного разрешения практически все силовые линии, исходящие из КД, являются открытыми. При переходе к высокому пространственному разрешению в пределах КД есть малые участки с небольшими замкнутыми силовыми линиями, замыкающимися в пределах КД. Это типичная ситуация при переходе от низкого к высокому разрешению: площадь с открытыми линиями поля уменьшается.

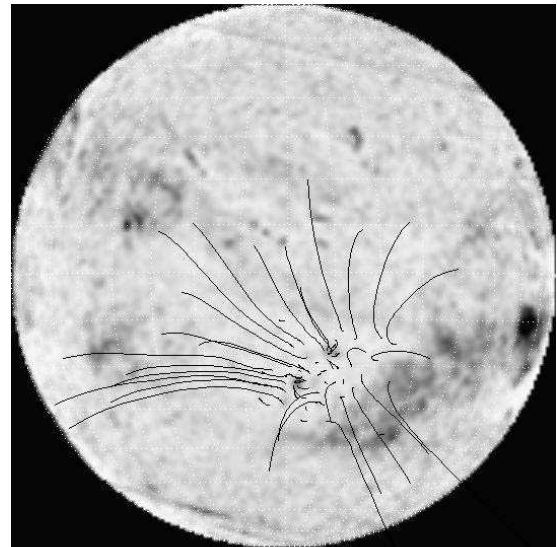
Остановимся на двух случаях КД без АО, в которых наблюдаются протяженные силовые линии, выходящие из КД и замыкающиеся вне ее. В КД3 на рис. 5 замкнутые силовые линии с восточной

стороны выходят из пограничных областей КД и демонстрируют рассмотренный нами ранее (Бугаенко, Гречнев и др., 2004а) факт отсутствия во многих КД четких границ. В этих случаях границей является зона, в которой наблюдаются участки, характерные как для КД, так и для спокойного Солнца.



040202

Рис. 7. Силовые линии, рассчитанные для КД1 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм



310503

Рис. 8. Силовые линии, рассчитанные для КД5 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм

На рис. 6 представлена КД4, значительная часть которой на востоке (слева) занята поднимающимися до высоты $\sim (1.5 - 2) R_o$ замкнутыми линиями поля, концы этих линий вне КД характеризуются крючками, или эти линии имеют характерный вид замкнутых. Линии из западной части дыры – открыты. Наложение изображения Солнца в линии HeI 1083 нм на изображение в корональной линии 17.1 нм показало, что в короне КД смещена на запад. Т. е рассматриваемая КД4 не является полностью открытой. В прежних работах (Степанян, Малащук, 2002; Бугаенко, Житник и др., 2004; Бугаенко, Житник и др., 2004а) мы назвали КД открытыми, если их площади по наблюдениям в линии HeI 1083 нм равны или меньше площадей по измерениям в корональных линиях. Обратное соотношение площадей соответствует закрытым КД. Выход высокоскоростных потоков солнечного ветра в большинстве случаев связан с открытыми КД.

В КД4 мы наблюдаем случай частично открытой КД с разным поведением силовых линий в ней.

4.4 Силовые линии в КД с АО

На рис. 7 представлена КД1. Это КД с двумя АО небольших размеров по отношению к площади КД. В случае высокого пространственного разрешения в КД наблюдаются открытые линии поля, но значительная часть КД занята замкнутыми линиями как небольшими, замыкающимися в пределах КД, так и большими, замыкающимися вне дыры. АО характеризуются замкнутыми линиями поля, которые замыкаются либо в пределах АО, либо рядом в КД. Рядом с АО видны открытые линии поля. Практически не наблюдается связь этих АО с внешними по отношению к КД активными

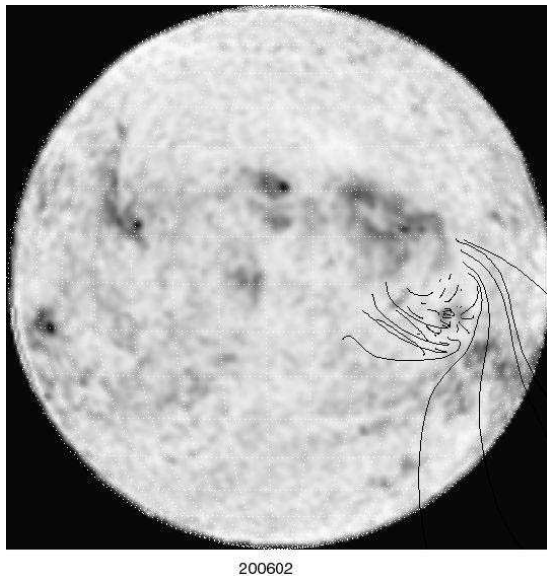


Рис. 9. Силовые линии, рассчитанные для КД2 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм

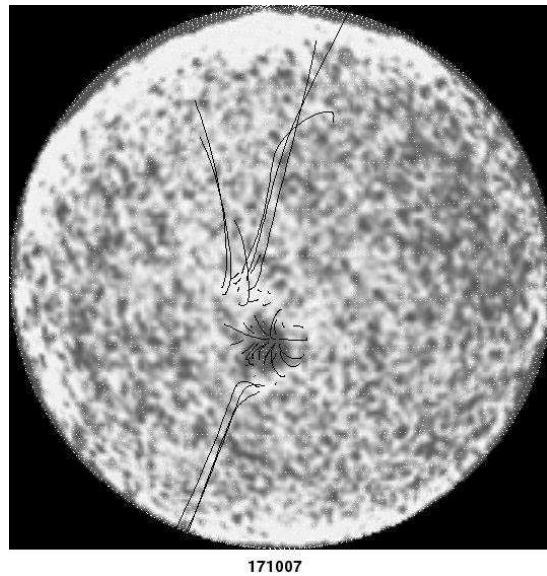


Рис. 10. КД6 Силовые линии нанесены на карту магнитных полей

областями. В следующем обороте АО в КД исчезла, и мы наблюдали ее как КД4, показанную выше.

КД5 на рис. 8 – это КД также с двумя АО. В случае высокого пространственного разрешения видно, что магнитное поле в области мультиполярное: нулевая линия Вг внутри АО и рядом с ними имеет сложную форму. Это приводит к тому, что в АО есть небольшие силовые линии, выходящие наружу из АО и (в северной АО) даже открытые линии.

В КД 2 на рис. 9 АО больших размеров, чем в предыдущих двух случаях. Она состоит из двух близко расположенных биполярных областей. Силовые линии, выходящие из них, замыкаются либо внутри АО, либо рядом с ними, в основном справа от каждой АО. Вокруг АО часть КД занята маленькими замкнутыми линиями. В остальной северной части КД – открытые линии поля, к югу – длинные замкнутые линии поля, замыкающиеся вне КД.

В КД 6 на рис. 10 АО занимает большую часть КД. Эта АО с окрестностью – классическая биполярная область. АО – источник замкнутых линий поля (как униполярная область), замыкающихся вокруг АО во все стороны либо внутри КД, либо рядом с КД вне нее. Но большинство линий замыкаются справа от центра АО. К югу и к северу от АО – пучки открытых линий, занимающих, по-видимому, маленькие площади. Остальные участки КД вокруг АО заняты маленькими замкнутыми линиями. В этой АО произошла большая вспышка.

4.5 Процесс возникновения АО в КД

Остановимся на серии наблюдений 4–11 ноября 1999 г. На рис. 11 представлены несколько наблюдений в линии HeI 1083 нм из этой серии. В первые три дня наблюдений в КД не было активных областей и рассчитанные для них силовые линии были открытыми. 8.11.99 в КД возникла быстро развивающаяся АО. Открытые силовые линии, выходящие из КД вне АО, практически не изменились. Внутри КД появились низкие петли. С ростом АО число и высота петель внутри КД росло, но все они не выходили за ее пределы.

На рис. 12 представлены силовые линии, рассчитанные для КД 9.11.99 и нанесенные на изображение Солнца. В следующем обороте в сохранившейся КД не было АО.

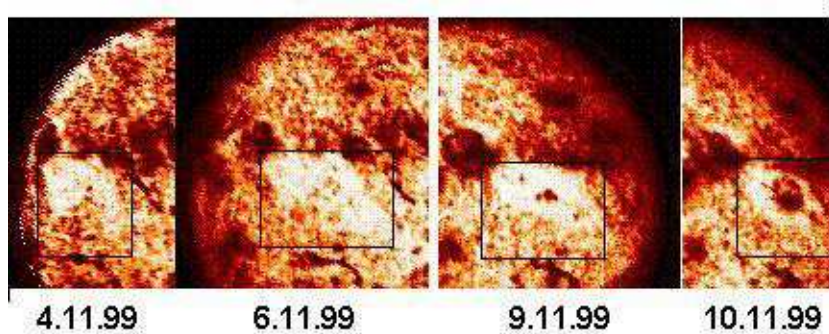


Рис. 11. Корональная дыра с возникшей в ней активной областью из серии 4–11 ноября 1999 г. Изображения в линии HeI 1083 нм

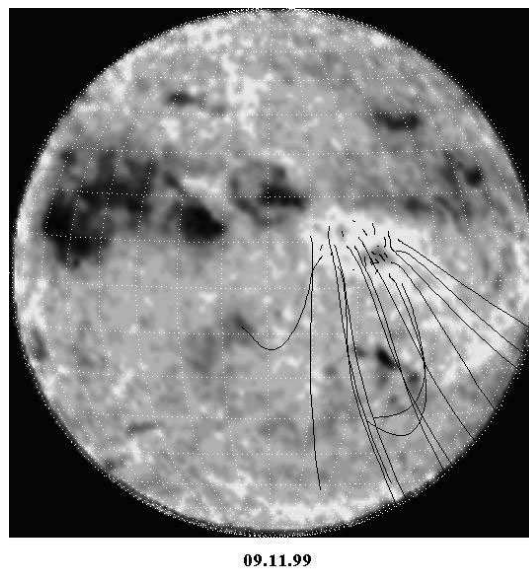


Рис. 12. Силовые линии, рассчитанные для 09.11.99 и нанесенные на изображение Солнца в линии HeI 1083 нм

Аналогичный случай был рассмотрен нами ранее. КД1 с АО в следующем обороте наблюдалась как КДЗ уже без АО. На рис. 2 и 3 было видно, что характеристики магнитного поля КД почти не изменились после исчезновения в ней АО.

5 Выводы

На основании рассмотрения ряда средних характеристик магнитных полей в КД на разных высотах, содержащих и не содержащих АО, распределения этих характеристик внутри КД, а также расчетов силовых линий в них мы можем сделать следующие выводы.

- Линии поля, возникающие в КД без АО, являются открытыми или очень высокими петлями, замыкающимися вне КД. Последнее происходит в полностью или частично закрытых КД.
- Система открытых петель устойчива, мало меняется с рождением АО и полностью восстанавливается после исчезновения АО.

- АО, возникающие внутри КД, – биполярные или мультиполярные магнитные структуры. Они формируются замкнутыми линиями поля.
- Линии поля, начинающиеся в АО, замыкаются либо внутри АО, либо в ближайшей окрестности АО в КД.
- Практически отсутствует связь АО внутри КД с внешними АО или другими местами вне КД.

Литература

- Бугаенко О.И., Житник И.А и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004. Т. 100. С. 123.
Бугаенко О.И., Житник И.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004а. Т. 100. С. 136.
Бумба и др. (Bumba V., Klvana M., Garcia A.) // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. №. 4. С. 153.
Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 69.
Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 198. С. 8.
Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 2.