

УДК 523.945

Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф:

III. Границы корональных дыр и их связь с активными образованиями

О.И. Бугаенко¹, И.А. Житник⁴, А.П. Игнатьев⁴, С.В. Кузин⁴, В.М. Малащук³, В.Н. Обридко⁵, А.А. Перцов⁴, Г.В. Руденко², В.С. Слемзин⁴, Н.Н. Степанян³, В.Г. Файнштейн², Н.И. Штерцер³

¹ ГАИШ МГУ, 13, Университетский пр-т, Москва, 119899, Российская Федерация

² ИСЗФ СО РАН, 126 ул. Лермонтова, Иркутск 664033, e-mail: rud@iszf.irk.ru

³ НИИ КраО, Научный, АР Крым, Украина, 98409, e-mail: nataly@crao.crimea.ua

⁴ ФИАН, 53, Ленинский пр-т, Москва, 119991, Российская Федерация, e-mail: kuzin@mail1.lebedev.ru

⁵ ИЗМИРАН, Троицк, Московская область, 142092, Российская Федерация, e-mail: obridko@izmiran.troitsk.ru

Поступила в редакцию 29 мая 2003 г.

Аннотация.

Границы КД рассмотрены по наблюдениям яркости КД и по измерениям и расчетам магнитного поля в ней. Для границ, определенных по яркости показаны разные виды границ корональных дыр и их изменение со временем. Оценены скорости изменения площадей корональных дыр в связи со сдвигом границ.

Расчеты магнитных полей в области одной корональной дыры проведены методом построения открытых и закрытых силовых линий, расчетом сепаратрисс, определением DI параметра.

Сделан вывод о наиболее близком совпадении границ корональной дыры, определенных по яркости, с границами между открытыми силовыми линиями и основаниями низких арочных структур, окружающих область корональной дыры и прилегающую к ней область с пониженным контрастом хромосферной сетки и яркостью, соответствующей невозмущенным областям.

Сопоставление эволюции корональных дыр и активных областей, возникающих в этих корональных дырах или вблизи них, позволил сделать вывод о стабильности корональных дыр и слабой связи магнитных полей активной области внутри корональной дыры с внешними по отношению к ней магнитными полями.

Наблюдательной основой данной работы явились данные приборов СПИРИТ на космическом аппарате КОРОНАС-Ф и Универсального спектрофотометра на телескопе БСТ-2 КраО наблюдения Солнца на КА КОРОНАС-Ф, эксперимент СПИРИТ, наземные наблюдения в линии He 10830А НИИ КраО, а также данные о магнитных полях по измерениям в Стенфорде и Китт-Пик.

STUDY OF SOLAR FEATURES BASED ON COMPLEX CORONAS-F AND GROUND OBSERVATIONS. III. BOUNDARIES OF CORONAL HOLES AND THEIR RELATION TO ACTIVE FEATURES, by *O.I. Bugaenko, I.A. Zhitnik, A.P. Ignatiev, S.V. Kuzin, V.M. Malashchuk, V.N. Obridko, A.A. Pertsov, G.V. Rudenko, V.S. Slemzin, N.N. Stepanian, Fainshtein V.G., N.I. Shtertser*. The boundaries of the coronal holes (CH) have been identified using the CH brightness observations and measured and calculated magnetic field values. Several types of the CH boundaries based on the brightness data

as well as their time variations have been considered. The rate of change of the CH area due to the shift of the boundaries has been estimated. The magnetic fields in a particular coronal hole have been computed by plotting the open and closed field lines, calculating the separatrices, and determining the DI parameter. A conclusion is made that the CH boundaries derived from the brightness observations coincide closely with the boundaries between the open field lines and the feet of the low arch systems, which surround the CH and the adjacent region with a reduced contrast of the chromospheric network and the brightness of undisturbed chromosphere. The comparison of evolution of the coronal holes and active regions in their environment suggests the stability of CH and a weak relation of the AR magnetic fields inside a coronal hole to the external magnetic fields.

The present work is based on observational data obtained with the KORONAS-F SPIRIT facility and the Universal Spectrophotometer of the telescope BST-2 in the Crimean astrophysical Observatory and the Stanford and Kitt Peak magnetic data.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, магнитные поля

1 Введение

Напомним общепринятое определение корональной дыры (КД). Корональные дыры (КД) – относительно долгоживущие крупномасштабные структуры в солнечной атмосфере. Они проявляются в короне как области с пониженной эмиссией в линиях крайнего ультрафиолета и в мягком рентгене, и как более яркие области при наблюдении в хромосферной линии HeI 10830 Å. В последнем случае характерным для КД является также ослабление (по сравнению с окружающим фоном) хромосферной сетки (или уменьшением ее контраста). В то же время, как показала Маланушенко (1995), что на Солнце наблюдаются области, имеющие только один из этих двух характерных признаков КД. Существуют области пониженного контраста, но не отличающиеся по яркости от окружающего фона, и области ярче окружающего фона с большим контрастом. Приведем один пример такой структуры. На рис. 1 показана КД, наблюдавшаяся 3 февраля 2002 года. С северо-запада от КД (справа вверху) находится область, в которой наблюдается пониженный контраст хромосферной сетки, характерный для КД, но ее яркость оказывается промежуточной между невозмущенным Солнцем и КД. Назовем такую структуру промежуточной областью. В той же работе Маланушенко (1995) сделан вывод о различии факторов, определяющих яркость и контраст корональных дыр.

Отсюда правомерно рассмотрение границ КД отдельно с использованием данных о яркости и сведений о магнитных полях.

Наблюдательной основой этой работы явились данные приборов СПИРИТ на космическом аппарате КОРОНАС-Ф и Универсального спектрофотометра на телескопе BST-2 НИИ КрАО. Методы наблюдений и исследований описаны в первой статье серии (Бугаенко и др., 2003).

2 Границы корональных дыр по измерениям яркости

2.1 Определение границы корональной дыры

Как и в предыдущей статье этой серии (Бугаенко и др., 2003), примем за КД по наблюдениям в линии HeI 10830 Å область, в которой преобладают элементы с интенсивностью $I > 1.013 I_0$, где I_0 – средняя интенсивность невозмущенного диска. На периферии этой области элементы с яркостью КД перемешаны с более темными элементами. При этом некоторые отдельные маленькие яркие области оказываются существенно удаленными от основного “тела” КД – компактной яркой области. В результате на изображении Солнца в линии HeI 10830 Å формируется многосвязная область, удовлетворяющая выбранному критерию КД. Для такой области трудно дать определение границы. Тем не менее, это можно сделать, если воспользоваться следующим приемом. К отдельной КД

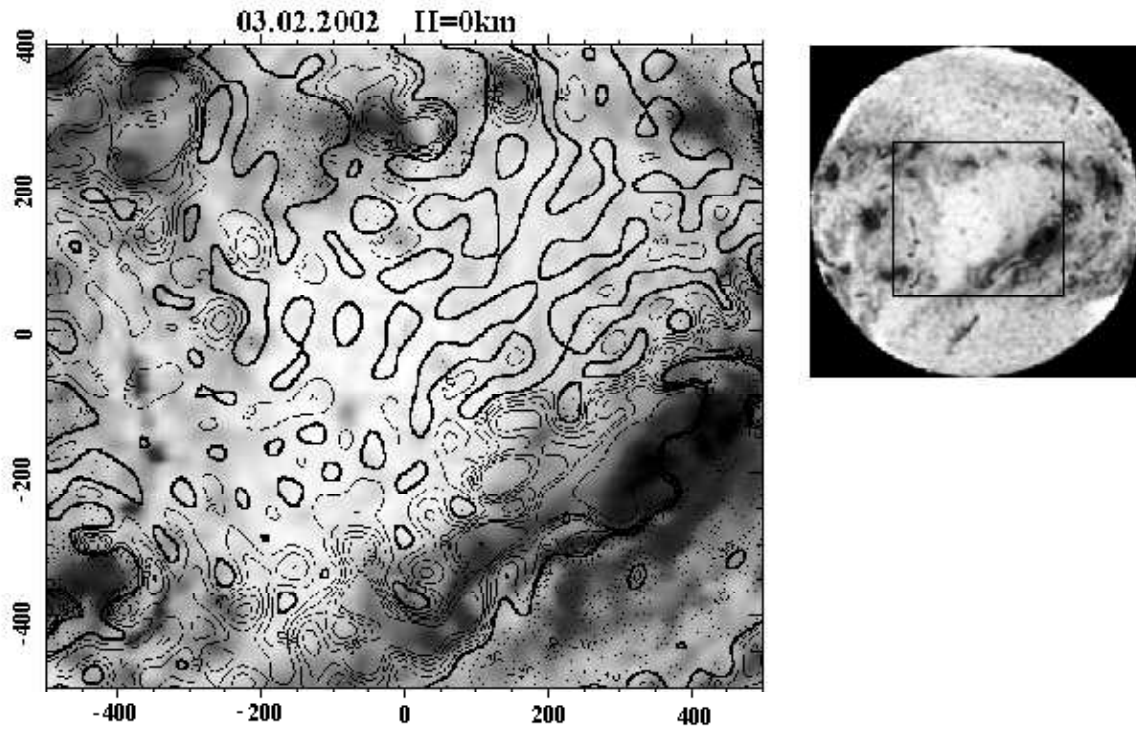


Рис. 1. Изображение Солнца в линии HeI 10830 Å 4 февраля 2002 г. (справа). Слева участок Солнца с корональной дырой и наложенной на него картой радиальной компоненты магнитного поля (B_R) на высоте $H=0$ км. На карте представлены изолинии $B_R(\text{Гс})/1.46$: -500, -100, -50, -40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 500

будем относить все яркие участки, отстоящие от ближайших к ним ярких участков, на расстояние, не больше заданного (например, на размер одного или двух пикселей). По схожему принципу выделялись, например, основания открытых магнитных трубок в расчетах магнитного поля в короне, когда множество отдельных открытых линий поля оказывались на разных расстояниях от основной открытой магнитной трубки (Руденко, 1997). После выделения таким способом КД можно формально ввести понятие границы дыры, как линии, отделяющей объединенные указанным выше способом элементы с яркостью $I > 1.013 I_0$ от окружающего фона с меньшей яркостью. Но и в этом случае граница КД может оказаться не в виде одной замкнутой линии, а состоящей из нескольких замкнутых линий. Т.е. КД будет оставаться многосвязной областью.

2.2 Распределение яркости на границе корональной дыры

Характер распределения ярких и темных областей на краю выделенной таким образом КД существенно зависит от примыкающего к ней участка солнечной поверхности. В этом смысле будем говорить о разных видах границы КД. Так, КД, приведенная на рис. 1, имеет 4 вида границ. К юго-западу от КД находится довольно протяженная активная область (АО). Магнитное поле этой АО вблизи КД имеет тот же знак, что и преимущественная компонента поля в КД. Нулевая линия магнитного поля в этом направлении отстоит от границы КД на $\sim 200''$. Восточная граница КД проходит по области крупномасштабного фонового поля, не превышающего 15 Гс того же знака, что и преимущественная компонента поля в КД. Расстояние от границы КД до границы фонового поля со структурой другого знака около $200''$. С севера к КД непосредственно примыкает АО с сильными полями обоих знаков.

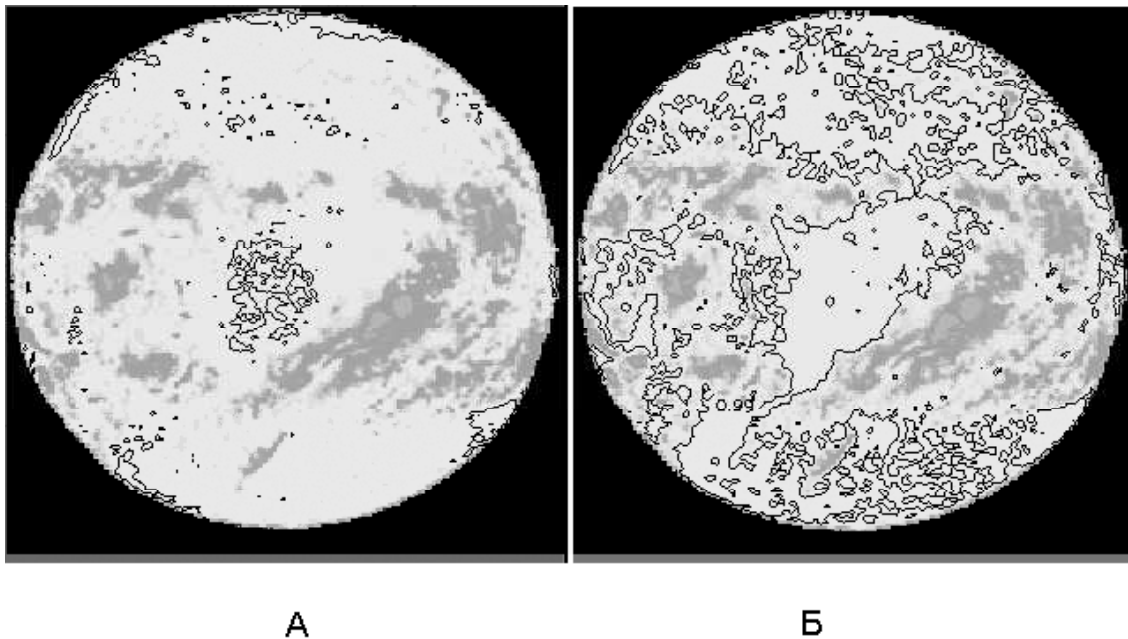


Рис. 2. Иллюстрация различия градиентов яркости на изображении Солнца в линии HeI 10830 Å на различных участках границы корональной дыры. А – изолинии относительной яркости $I=1.03$, Б – изолинии $I=0.99$

На рис. 2 (А, Б) на то же изображение Солнца в линии HeI 10830 Å нанесены изолинии относительной яркости $I = 1.03$, соответствующей максимуму распределения относительной яркости в области КД (А), и $I = 0.99$, захватывающую область вне дыры (Б). Видно, что разные участки изолинии (А) смещаются на различные расстояния при переходе к случаю (Б). Меньше всего смещается участок, граничащий на юго-западе с активной областью. Наиболее сильно смещается участок, граничащий с переходной областью. Это означает, что в первом случае мы имеем максимальный градиент относительной яркости, во втором случае – минимальный градиент яркости.

На рис. 3 (А, Б) показаны сканы относительной яркости вдоль двух лучей на солнечном диске для этого же случая. Лучи выходят из центра дыры под углами к горизонтальной оси – 35° и 60° . В первом случае (А) луч пересекает границу дыры там, где она соприкасается с активной областью. Во втором случае (Б) луч пересекает участок границы дыры с промежуточной областью. Сопоставляя изменения яркости вдоль усредненных по точкам линий, мы также видим, что наибольший средний градиент яркости достигается в случае (А). Разброс точек относительно усредненной кривой обусловлен погрешностью в определении положения границы области с заданной относительной яркостью. Это положение определяется с точностью 10 – 50%.

В Таблице 1 приведены средние и максимальные (вычисленные по усредненной кривой) градиенты относительной яркости (dI/dL) вдоль нескольких направлений из центра дыры для случая КД 3 февраля 2002 г.

4.02.2002 в той же КД градиенты яркости для углов $\theta = -35^\circ$ и $\theta = 60^\circ$ отличаются от соответствующих градиентов 3.02.2002 не очень заметно, особенно для угла $\theta = -35^\circ$.

2.3 Изменчивость границ

Изменчивость границ КД со временем также разнообразна. На рис. 4 приведены участки изображений Солнца (верхний ряд) и соответствующих им синоптических карт (нижний ряд) с рассматриваемой нами КД по наблюдениям в линии HeI 10830 Å с 3 по 7.02.2002 г. Ось X – гелиографические долготы, ось Y – широты. В нижнем правом углу карт находится АО.

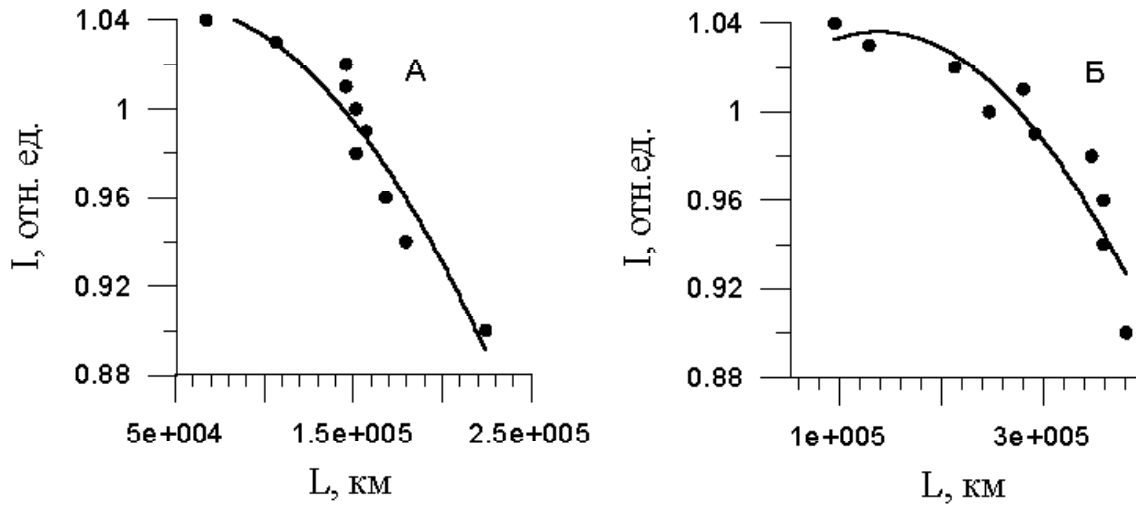


Рис. 3. Сканы относительной яркости изображения Солнца в линии HeI 10830 Å. А – вдоль направления под углом -35° к горизонтальной линии, проведенной из геометрического центра корональной дыры. Б – вдоль направления под углом 60°

Таблица 1. Градиенты яркости на границах КД 3.02.2002 по наблюдениям в линии HeI 10830 Å

Направление	$\theta = -35^\circ$	$\theta = 35^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 120^\circ$	$\theta = 180^\circ$
dI/dL , отн.ед./км	$8.91 \cdot 10^{-7}$	$4.19 \cdot 10^{-7}$	$4.75 \cdot 10^{-7}$	$6.36 \cdot 10^{-7}$	$5.42 \cdot 10^{-7}$
$\max dI/dL$, отн.ед./км	$16.9 \cdot 10^{-7}$	$7.52 \cdot 10^{-7}$	$8.46 \cdot 10^{-7}$	$6.84 \cdot 10^{-7}$	$7.47 \cdot 10^{-7}$

Из рисунка видно, что восточная граница за все время наблюдений практически не менялась. Первые изменения границы и связанное с этим уменьшение площади КД начались со стороны промежуточной области на северо-западе. Затем западная граница сдвинулась на восток. И, наконец, 7.02 от КД отделилась южная часть. Следует отметить, что АО на западе с 4.02 практически не менялась. Возникновение же активной области внутри КД почти не повлияло на изменение внешних границ КД. В то же время само возникновение новой активной области привело к появлению дополнительной границы между изменившейся КД и этой АО.

Границы дыры на других уровнях атмосферы Солнца представлены на рис. 5. На изображениях в линии Fe IX-X 171 Å и Fe XI-XII 195 Å вблизи западной границы КД видны арки, соединяющие близлежащую активную область с промежуточной областью и с КД. На следующий день арок становится меньше, и они меняют свой наклон. Изменение границ с 3 на 4 февраля на всех рассматриваемых уровнях показано на рис. 6 в виде наложенных участков синоптических карт за 3 и 4 февраля.

Одним из следствий изменения границ КД является изменение площади КД. По скорости этого изменения обычно судят о физических процессах, приводящих к таким изменениям.

Если скорость изменения площади сравнима с величиной $\sim 10^4 \text{ км}^2/\text{с}$, то изменение площади КД обычно пытаются связать с транспортировкой солнечных магнитных полей вследствие диффузии (“Лейтоновская” или супергрануляционная диффузия) (Нольт и др., 1978). Эта скорость соответствует средней скорости роста и распада супергрануляционных ячеек, имеющих характерный диаметр $\sim 3 \times 10^4 \text{ км}$ и среднее время жизни $\sim 20 - 50$ час. Калер и Мозес (1990) показали, что скорость изменения площади КД может в несколько раз превышать скорость супергрануляционной диффузии, и предположили, что физическим механизмом таких изменений размеров КД является взаимодействие крупномасштабных магнитных полей с полями ярких рентгеновских точек, сопровождающееся магнитным пересоединением. В результате этого процесса некоторые открытые сило-

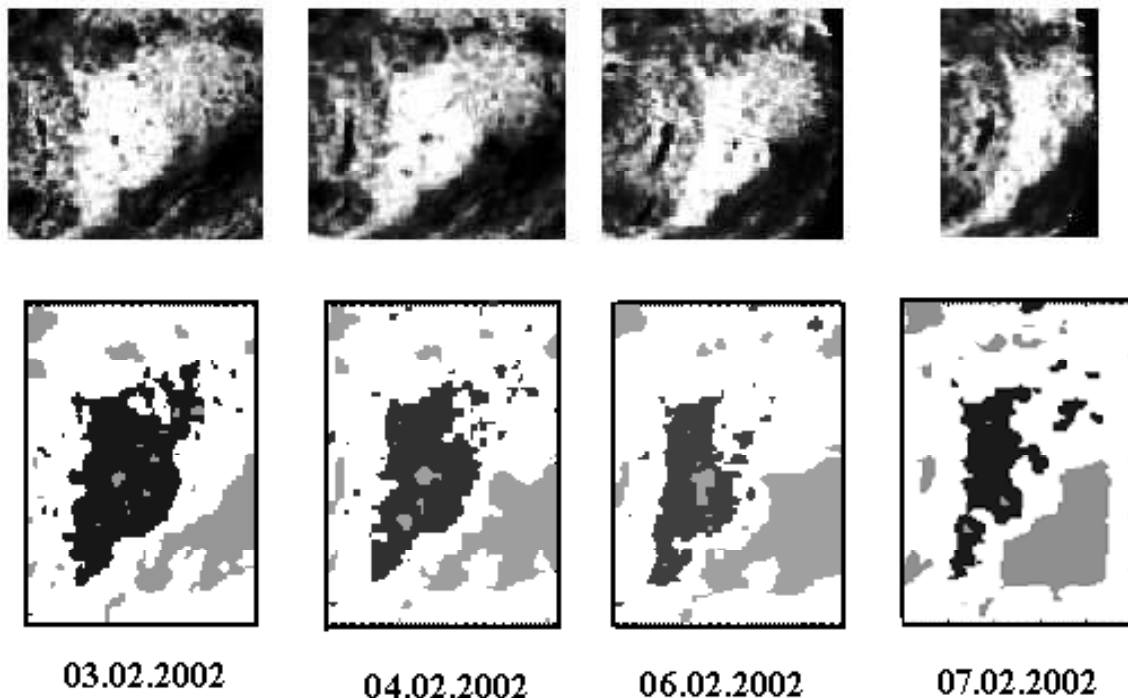


Рис. 4. Участки изображений Солнца (верхний ряд) и соответствующих им синоптических карт (нижний ряд) с корональной дырой по наблюдениям в линии HeI 10830 Å с 3 по 7.02.2002 г. Ось X – гелиографические долготы, ось Y – широты. В нижнем правом углу карт находится АО

вые линии магнитного поля в области КД исчезают (площадь КД уменьшается), либо появляются дополнительные открытые линии поля (площадь дыры растёт).

В работе (Степанян, Малащук, 2002) определены суточные изменения площадей КД на разных уровнях атмосферы Солнца. Для КД, площадь которых увеличивается с высотой, изменение площади КД в сутки составляет в среднем $2 \times 10^{10} \text{ км}^2$, что соответствует скорости изменения площади дыры $\sim 2.3 \times 10^5 \text{ км}^2/\text{с}$. Видно, что эта скорость почти на порядок превышает скорость супергрануляционной диффузии и несколько больше значений скорости изменения площади дыр, полученных в работе (Калер и Мозес, 1990). Для КД, площадь которых уменьшается с высотой, картина более сложная. Часто изменения площади на разных уровнях не связаны друг с другом.

Площадь КД, наблюдавшейся 2 – 7 февраля 2002 г., уменьшается с высотой. Это было показано в предыдущей статье настоящей серии (Бугаенко и др., 2003). Оценим скорости изменения площади этой КД для четырех участков ее границы, отличающихся по градиенту яркости. Результаты представлены в таблице 2.

Видно, что наибольшая скорость изменения площади КД связана с изменением участка границы КД, отделяющего ее от промежуточной области, а наименьшая – в области высокого градиента магнитного поля вблизи активной области. В среднем суточное изменение площади для этой КД составило $1.5 \times 10^{10} \text{ км}^2$, что близко к значению, определенному в работе (Степанян, Малащук, 2002). В то же время отчетливые закономерности изменения площади КД с высотой в данном случае не просматриваются. Анализ изменений границ этой и других КД показал, что, наряду с существованием очень устойчивых границ КД, не меняющих свою форму до двух оборотов Солнца, наблюдаются границы, меняющиеся день ото дня. При этом не видно явной связи с состоянием пограничных областей.

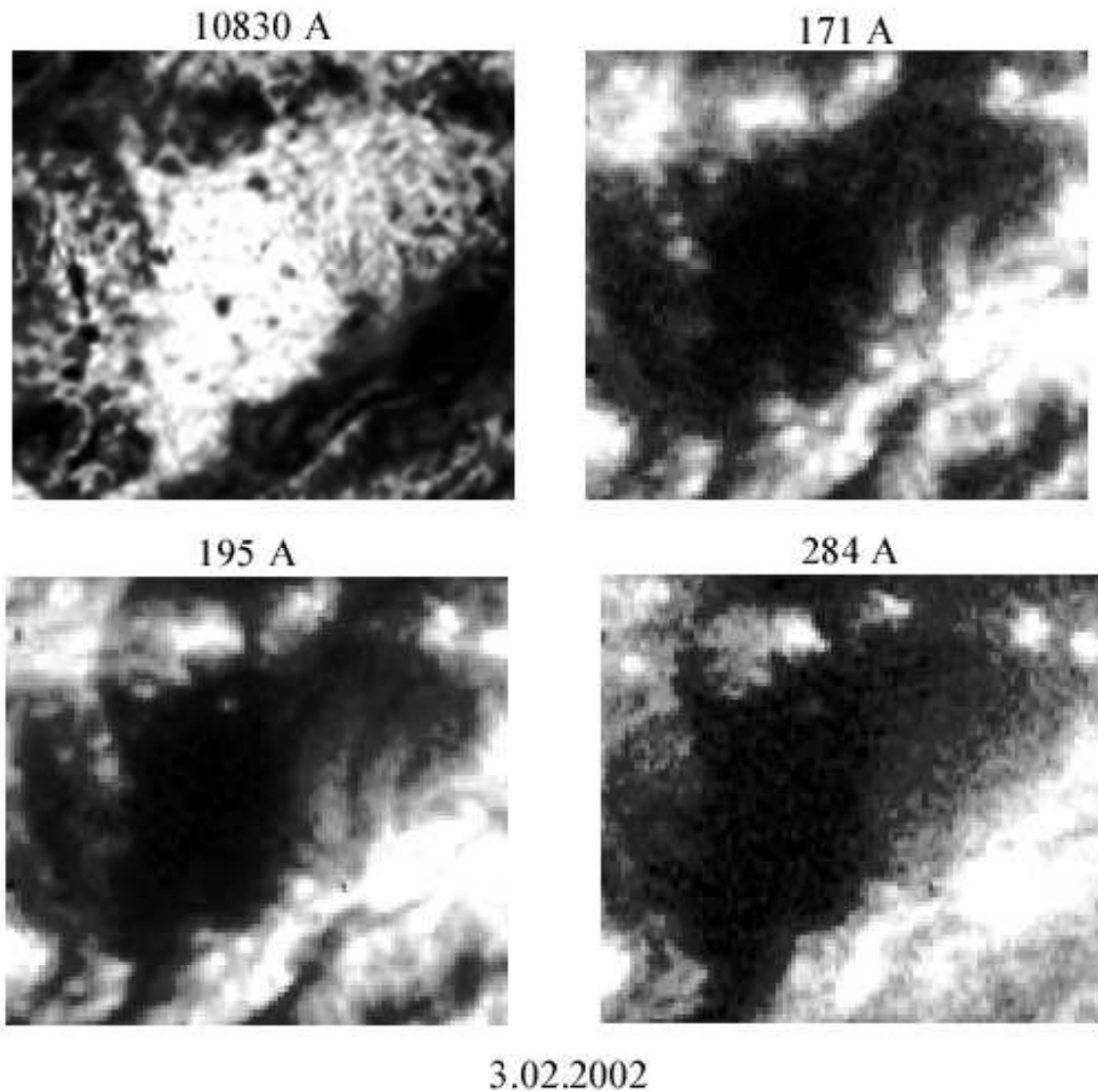


Рис. 5. Изображения корональной дыры 3.02.02 полученные в четырех спектральных линиях

3 Границы корональных дыр по измерениям магнитных полей

Нет сомнения в том, что для магнитного поля в КД характерна сложная взаимосвязь полностью открытых силовых линий, высоких и низких петель. В качестве первого приближения мы рассмотрели традиционное представление о том, что магнитная КД является совокупностью оснований полностью открытых силовых линий. На рис. 7 представлена КД по наблюдениям на SOHO 3.02.02, на которую наложены основания полностью открытых силовых линий. При этом открытыми силовыми линиями считались те, которые полностью выходят за пределы поверхности источника. Легко видеть, что, хотя основания открытых силовых линий связаны с КД, их очертания никак не могут считаться границами КД.

Другой подход к поиску физических основ для границы корональной дыры состоит в построении квази-сепаратрисных слоев. Он был предложен в (Черток и др., 2002). Согласно современным представлениям, квази-сепаратрисные слои – это области резкого изменения взаимосвязи сило-

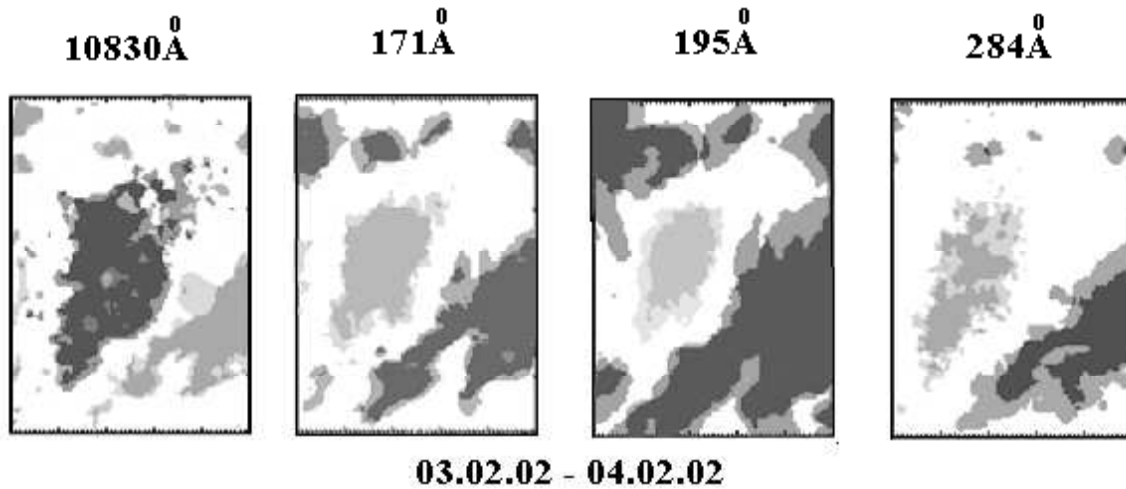


Рис. 6. Изменение границ с 3 на 4 февраля 2002 г. на всех рассматриваемых уровнях, представленное в виде наложенных участков синоптических карт за 3 и 4 февраля. Более темный цвет соответствует 4 февраля

Таблица 2. Суточные изменения площади корональной дыры по наблюдениям в четырех линиях (в квадратных градусах/сутки)

Расположение граница	1 кв. градус на экваторе составляет $1.45 \times 10^8 \text{ км}^2$				Характер участка границы
	HeI 10830 Å	Fe IX-X 171 Å	Fe XI-XII 195 Å	Fe XV 284 Å	
Е	22	18	45	25	Низкий градиент напряженности магнитного поля
S-W	18	14	36	15	Средний градиент напряженности магнитного поля
W	15	12	3	26	Высокий градиент напряженности магнитного поля
N-W	70	26	19	58	Нулевой градиент напряженности магнитного поля, граница с промежуточной областью

вых линий, образующиеся на границах разных систем магнитного потока. Если на границе КД имеет место переход от области открытых силовых линий и высоких петель к низким аркам, можно было ожидать, что эта граница будет совпадать с квази-сепаратриссным слоем. Расчет квази-сепаратриссного слоя был сделан следующим образом (Демулен и др., 1997). Нами был рассчитан параметр разделения оснований силовых линий (сепаратриссный параметр), который характеризует отношение расстояния между концами силовых линий на поверхности источника к расстоянию между их началами на поверхности Солнца. Очевидно, что области максимальных значений этого сепаратриссного параметра должны соответствовать сепаратриссным слоям. На рис. 8а,б показан расчет сепаратриссного параметра для 3 февраля 2002 г., причем область максимальных значений этого параметра обведена сплошной черной линией. На рис. 8а карта сепаратриссного параметра наложена на изображение Солнца в линии HeI 10830 Å, полученное в тот же момент времени. На рис. 8б показана в крупном масштабе только область КД. Видно, что сепаратриссный слой гораздо лучше обрисовывает границы КД, полученные по измерениям интенсивности, однако полного совпадения нет. Переходная область, примыкающая с северо-запада к КД, выходит за пределы сепаратриссного слоя. В то же время, почти такой же сепаратриссный слой очерчивает области повышенной активности севернее КД и к юго-востоку от нее.

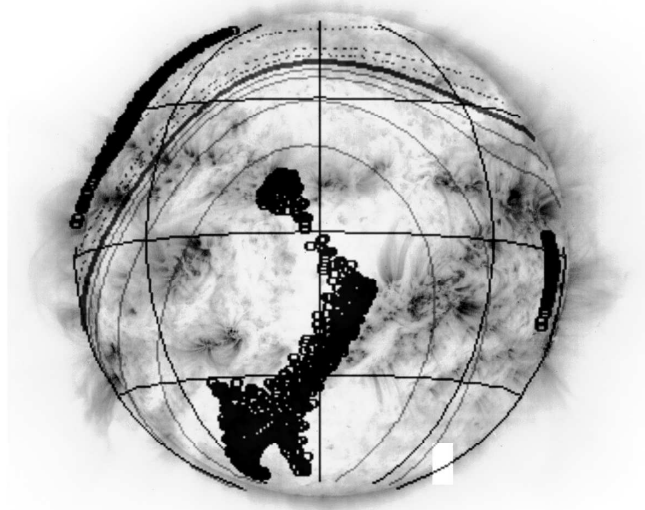


Рис. 7. КД по наблюдениям на SOHO 3.02.02, на которую наложены основания полностью открытых силовых линий

Следующим методом, примененным для исследования границ КД, было определение оснований открытых силовых линий и низких арок. На рис. 9а,б,в открытые силовые линии (или высокие арки) и низкие арочные структуры нанесены на изображение Солнца в линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$. На рис. 9а показано все Солнце, на рис. 9б – только область КД в большом масштабе, а на рис. 9в – основания открытых силовых линий нанесены малыми кружками, а основания низких петель – большими. Расчеты магнитного поля выполнены для момента снимка. На рисунке 9б и 9в видна достаточно плотная группа открытых силовых линий на границе КД с промежуточной областью и несколько открытых силовых линий в центральной части КД. Низкие арочные структуры четко очерчивают границы КД вместе с промежуточной областью.

Такая картина сближает структуру магнитного поля в КД со структурой магнитного поля солнечного пятна. В центре КД располагаются более высокие петли или полностью открытые силовые линии. Это, как бы, “тень” КД. “Полутень” КД, особенно четко выраженная вблизи ее границ с активными областями, состоит из относительно невысоких арок. Подобная структура КД в радиоизлучении наблюдалась Кунду и др. (1994) и обсуждалась в (Могилевский и др., 1999; Могилевский и др., 1997). В работе Обридко (1998) эта аналогия между КД и солнечным пятном была обсуждена подробно, и были изложены основные параметры сходства.

Разный характер плотности распределения открытых линий поля в КД и в промежуточной области может свидетельствовать о различных характерных значениях величины локальной сверхрадиальной расходимости силовых линий поля F_L в этих областях солнечной атмосферы. По определению,

$$F_L = [(S_{SS})_L / (S_O)_L] [(R_O)^2 / (R_{SS})^2] == [(B_O) / (B_{SS})] [(R_O)^2 / (R_{SS})^2]$$

(см., например, Ванг и Шилли, 1990). Здесь B_O , S_O и B_{SS} , S_{SS} – значения магнитного поля и площади сечения в основании (на поверхности Солнца) и в вершине (на поверхности источника) маленькой по поперечным размерам магнитной трубки, R_{SS} и R_O – радиусы поверхности источника и Солнца. Можно показать, что более “густое” распределение оснований открытых линий поля (как, например, в промежуточной области) обычно соответствует повышенным значениям F_L , разреженное распределение таких оснований открытых линий (как в КД) соответствует более низким

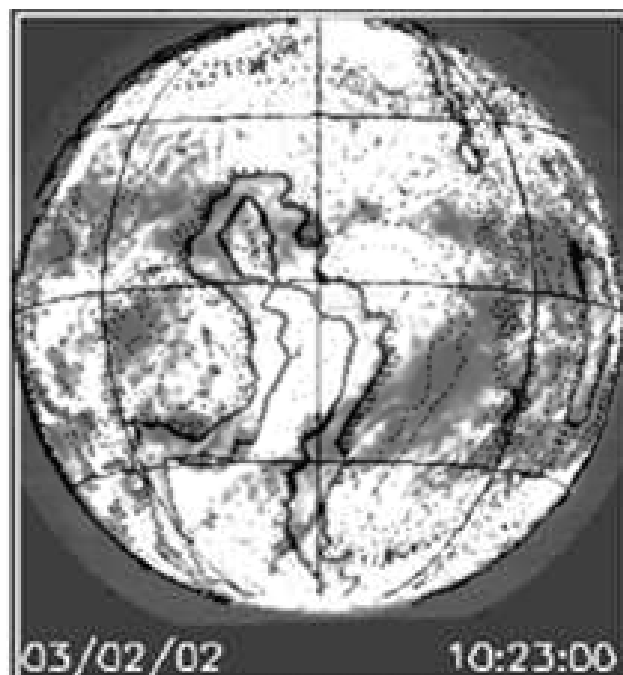


Рис. 8. (а). Карта сепаратрисного параметра наложена на изображение Солнца в линии He I 10830 Å

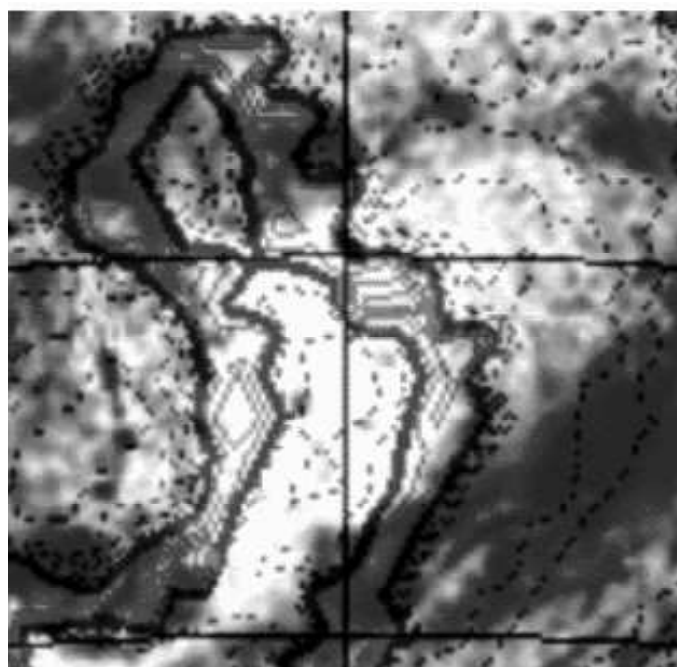


Рис. 8. (b). В крупном масштабе показана область КД

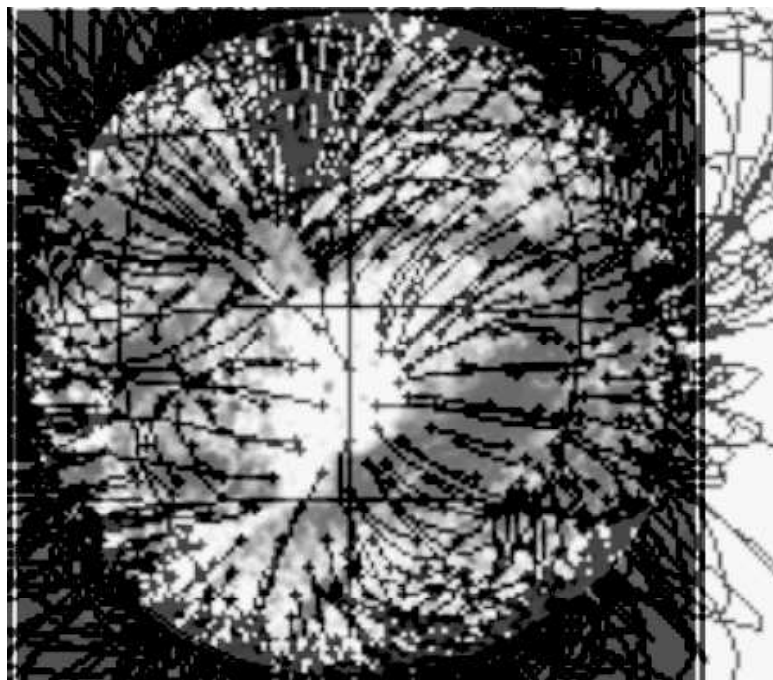


Рис. 9. (а). Все Солнце

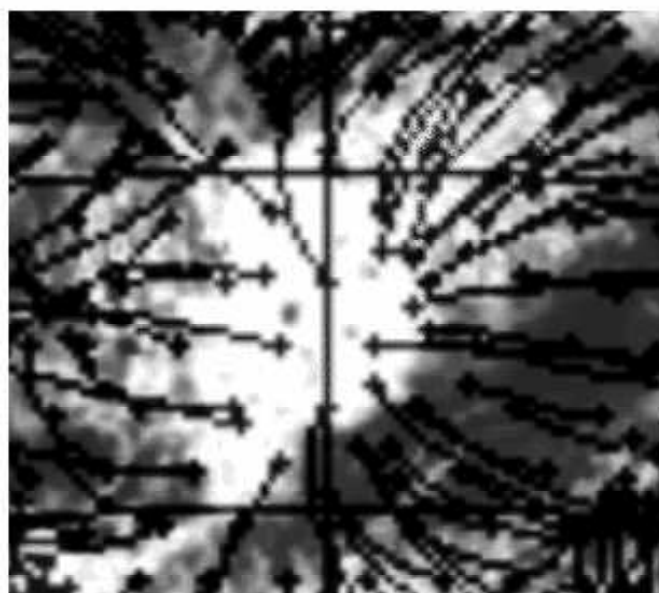


Рис. 9. (б). Область КД в большом масштабе

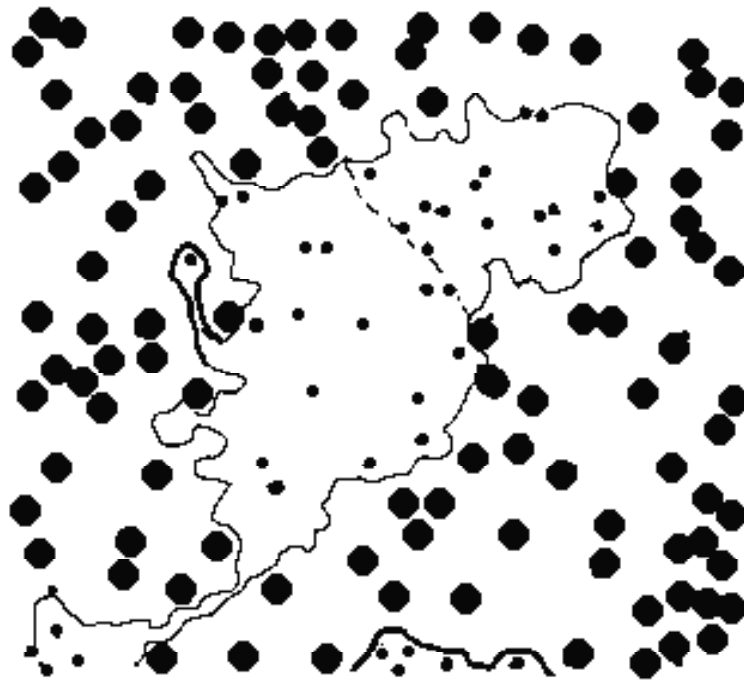


Рис. 9. (v). Основания открытых силовых линий нанесены малыми кружками, а основания петель – большими. Границы корональной дыры (сплошная линия) и промежуточной области (пунктир) проведены по изображению Солнца в линии HeI 10830 Å

значениям F_L . В то же время, согласно Ванг и Шили (1990), существует обратная корреляция между скоростью солнечного ветра (СВ) на орбите Земли и величиной локальной сверхрадиальной расходимости силовых линий магнитного поля в короне F_L . Отсюда можно сделать вывод, что данная КД является источником более быстрого потока СВ, чем промежуточная область. Возможно, что в данном случае промежуточная область является источником медленного течения СВ, а КД – источником быстрого потока СВ. Но чтобы убедиться в справедливости первой части этого утверждения, необходимо провести дополнительные исследования.

В качестве следующего шага был рассчитан параметр, характеризующий скорость падения величины полной напряженности магнитного поля с высотой. С этой целью были вычислены полная напряженность магнитного поля на уровне $R=1.0$ и $R=1.1$. Было найдено отношение $DI = B_{1.0}/B_{1.1}$. Таким образом, параметр DI является большим там, где поле быстро падает с высотой, и малым там, где поле медленно падает с высотой. Такой выбор параметра DI определялся следующими соображениями. Есть многочисленные основания полагать, что нагрев короны происходит в трубках магнитного поля, причем, если трубки сильно изогнуты или, вообще, замкнуты, нагрев более интенсивный. В этих областях параметр DI должен быть относительно велик. С другой стороны, в трубках, уходящих радиально на большую высоту, реализуется менее интенсивный нагрев. В этих областях параметр DI относительно мал. На этом основано применение параметра Ванга и Шили для расчета истечения вещества из КД (Ванг и Шили, 1990; Ванг и Шили, 1991; Ванг и др., 1990). На рис. 10а,б на изображение Солнца, полученное в линии Fe IX-X 171 Å на телескопе SPIRIT спутника КОРОНАС-Ф, наложена карта изолиний параметра DI . Карта построена в прямоугольной развертке. Изолинии для $DI < 2$ указаны пунктиром. Из рис. 10а видно, что, в целом, имеется корреляция между яркостью и величиной параметра DI . Области пониженной яркости попадают в район, где $DI < 2$, а участки с повышенной яркостью соответствуют $DI > 2$. Более подробное рассмотрение области КД на рис. 10б показывает, что изолиния $DI=2$ проходит по восточной и юго-западной границам КД, определяемым по яркости, очерчивая также переходную область. Но

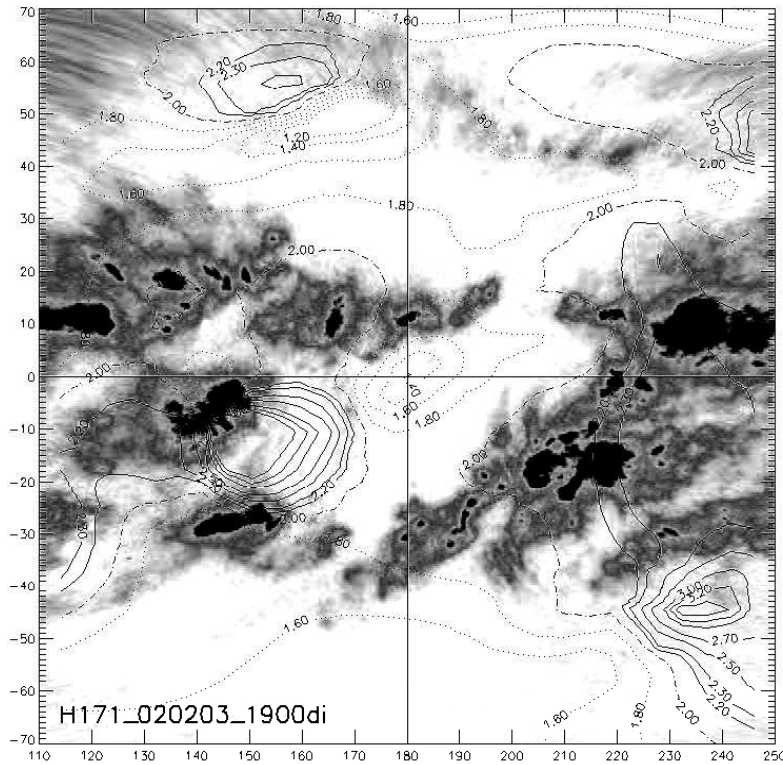


Рис. 10. (а). Все Солнце

АО с севера и юга КД попадают в область $DI < 2$. Следует отметить, что как этот рисунок, так и три предыдущих построены по синоптическим картам обсерватории WSO в Стенфорде, полученным с низким разрешением. Возможно, этим объясняются отдельные случаи несогласия характера поведения параметра DI с яркостью в Fe IX-X 171 Å.

4 Реакция корональных дыр на возникновение активной области

В работе (Степанян, 1992) на основе наблюдений с грубым временным разрешением был сделан вывод о том, что одна из причин распада КД – выход нового магнитного потока в КД. Подробное исследование процесса возникновения АО в КД в статье Маланушенко, Степанян (2001) показало, что при рождении АО в КД последняя исчезает только после того, как АО займет всю площадь КД. В течение нескольких дней АО остается окаймленной элементами КД. Все это время граница КД не меняется. Для КД, рассмотренной в работе (Маланушенко, Степанян, 2001), были рассчитаны магнитные поля. На рис. 11 показаны изолинии напряженности магнитного поля и силовые линии, выходящие из АО, возникшей в КД. Как видно на этом рисунке, магнитные поля АО, расположенной к северу от КД, не были связаны с магнитными полями АО, возникшей в КД. Устойчивость границ КД при возникновении в ней АО была прослежена нами на многих случаях в наблюдениях 2002 года. В большинстве из них АО после возникновения, не достигнув размеров КД, исчезала. Границы КД при этом практически не менялись.

Опишем подробнее случай существования небольшой АО в рассмотренной в предыдущих разделах КД. В центре этой КД, наблюдавшейся с 3 по 7.02.02 г., на уровне He I 10830 Å и в линии He II, Si XI 304 Å все дни существовала небольшая АО. По наблюдениям в корональных линиях Fe IX-X 171 Å, Fe XI-XII 195 Å и Fe XV 284 Å 3.02 и в первой половине 4.02 активной области в КД не было. И только 4.02 в 14 часов АО появилась в корональных линиях. На рис. 12 приведен

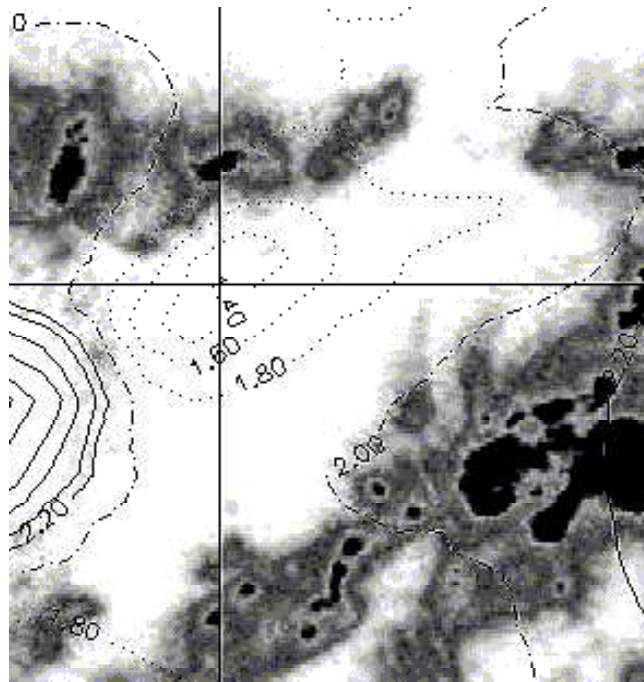


Рис. 10. (b). Область КД в большом масштабе

график изменения со временем яркости одного из узлов этой АО на разных уровнях атмосферы Солнца. В других узлах яркость менялась несколько иначе. Следует заметить, что на уровне фотосферы пятен в этой активной области не было. Как уже говорилось выше, границы КД на уровне хромосферы и короны в связи с появлением внутри дыры АО и ее эволюцией не претерпевали существенных изменений. Из рассмотрения многих случаев возникновения АО в КД можно сделать вывод, что КД – стабильное образование в том смысле, что ее внешние границы практически не реагируют на появление и эволюцию АО внутри дыры. Ее магнитные поля слабо взаимодействуют с окружающими магнитными полями активных областей и фоновых полей. В свете полученных нами результатов можно говорить, что КД – это место существования некоторых активных областей. Активные области рождаются в КД, живут в ней и исчезают, а КД остается.

5 Заключение

В начале статьи мы отмечали, что попытаемся выделить и исследовать границы КД по распределению яркости в области КД и по измерениям и расчетам магнитного поля в ней. Такое рассмотрение на примере одной КД показало, что границы КД, выделенные двумя способами, часто не совпадают. Тем не менее, для дальнейшего изучения физических процессов, происходящих в КД и на их границах, метод построения открытых и замкнутых силовых линий внутри дыры и ее окрестности представляется довольно перспективным. Граница КД, определенная по основаниям низких арочных структур, охватывает не только область с характерной для КД яркостью, но и примыкающую к КД промежуточную область пониженного контраста и пониженной яркости. Это подтверждает вывод, полученный в (Маланушенко, 1995), что между распределением яркости солнечного излучения по диску Солнца в различных спектральных линиях и распределением в солнечной атмосфере открытых и замкнутых силовых линий магнитного поля нет простой или прямой (однозначной) связи.

Сопоставление эволюции КД и АО, возникающих в КД или вблизи них, позволяет сделать вывод

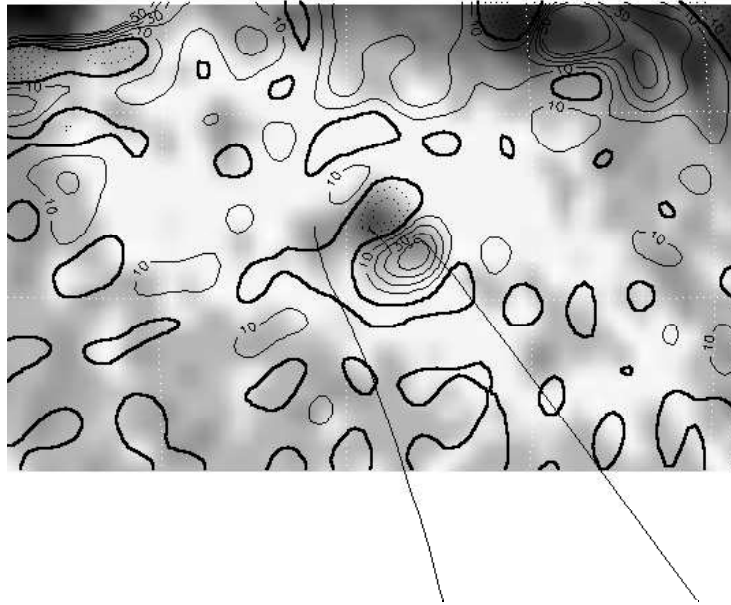


Рис. 11. Силовые линии, выходящие из активной области, возникшей в корональной дыре в ноябре 1999 г.

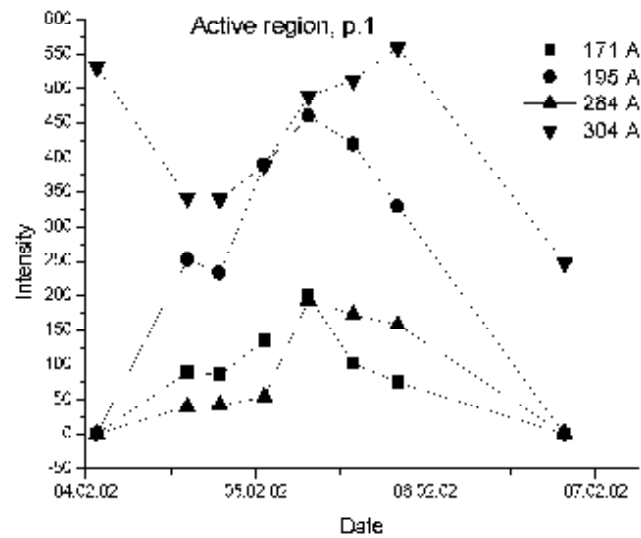


Рис. 12. Изменение со временем яркости одного из узлов АО, возникшей в корональной дыре, на разных уровнях атмосферы Солнца

о стабильности внешней границы КД в этом случае и слабой связи магнитных полей АО внутри КД с внешними по отношению к КД магнитными полями.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 02-02-17272 и НШ-477.2003.2., INTAS 2000-752, “Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН” “Солнечный ветер: генерация и взаимодействие с Землей и другими планетами”.

В работе используются магнитограммы NSO/Kitt Peak (<ftp://140.252.1.21>), получаемые как совместный продукт NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL., магнитограммы Станфорд и изображение Солнца 3.02.02, полученное на SOHO.

Литература

- Бугаенко О.И., Гречнев В.В., Жигалкин Р.К. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 100. (в печати).
- Бугаенко О.И., Житник И.А., Игнатъев А.П. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 100 (в печати).
- Ванг (Wang Y.M., Sheeley N.R.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 355. P. 726.
- Ванг (Wang, Y.M., Sheeley, N.R.) // *Astrophys. J. (Lett.)*. 1991. V. 372. P. L45.
- Ванг (Wang, Y.M., Sheeley, N.R., Nash, A.G.) // *Nature*. 1990. V. 347. N. 6292. P. 439.
- Демулен (Demoulin, P., Bagala, L.G., Mandrini, C.H., Henoux, J.C., Rovira, M.G) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 325. P. 305.
- Кунду (Kundu, M.R., Strong, K.T., Pick, M et al) // *Astrophys. J.* 1994. V. 427. L59.
- Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 89. С. 22.
- Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 69.
- Могилевский (E.I.Mogilevsky, V.N.Obridko and N.S. Shilova) // *Solar Phys.* 1997. V. 176. P. 107.
- Могилевский Э.И., Обридко В.Н., Шилова Н.С. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 79. N. 4. С. 299.
- Обридко (Obridko, V.) // *Proc. Third SOLTIP Symp. Oct. 14 – 18. 1996. Beijing, China, ed. by Feng X.S., Wei F.S., and Dwyer M.* 1998. International Academic Publishers. pp. 41–48.
- Степанян Н.Н. // Сб.: Цикл.– С-Птб.: ФТИ. 1992. С. 36.
- Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 8.
- Черток И.М., Хадсон Х.С., Могилевский Е.И., Обридко В.Н., Шилова Т.С. (Chertok I.M., Hudson H.S., Mogilevsky E.I., Obridko V.N., Shilova N.S.) // *Astroph.J.* 2002. V. 567. P. 1225.