

УДК 523.945

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

### II. Магнитные поля в корональных дырах на разных высотах

*О.И. Бугаенко<sup>1</sup>, И.А. Житник<sup>4</sup>, А.П. Игнатьев<sup>4</sup>, С.В. Кузин<sup>4</sup>, В.М. Малащук<sup>3</sup>, В.Н. Обридко<sup>5</sup>, А.А. Перцов<sup>4</sup>, Г.В. Руденко<sup>2</sup>, В.С. Слемзин<sup>4</sup>, Н.Н. Степанян<sup>3</sup>, В.Г. Файнштейн<sup>2</sup>, Н.И. Штерцер<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ГАИШ МГУ, 13, Университетский пр-т, Москва, 119899, Российская Федерация

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

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

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

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

Поступила в редакцию 29 мая 2003 г.

**Аннотация.** На основе одновременных космических и наземных наблюдений проведен анализ магнитных полей в корональных дырах на разных высотах в атмосфере Солнца. Были использованы данные приборов СПИРИТ на космическом аппарате КОРОНАС-Ф и Универсального спектрофотометра на телескопе БСТ-2 КраО. Получены следующие результаты:

В рамках единого подхода развит метод выделения корональных дыр и нахождения их площадей по наблюдениям Солнца в спектральных линиях HeI  $\lambda$  10830 Å, Fe IX – X  $\lambda$  171 Å, Fe XI – XII  $\lambda$  195 Å, Fe XV  $\lambda$  284 Å.

Приведены примеры различного изменения площади корональных дыр с высотой.

Показано, что корональная дыра, площадь которой увеличивается с высотой, почти полностью оказывается в области открытой магнитной трубки, в то время как почти вся КД, площадь которой уменьшается с высотой, оказывается в области замкнутых линий поля.

Найдено, что на уровне фотосферы область вкраплений магнитного поля, противоположного по знаку основному полю корональной дыры, достигает 20 – 25% площади корональной дыры. На высотах 25 – 30 тысяч км магнитное поле корональной дыры становится униполярным.

STUDY OF SOLAR FEATURES BASED ON COMBINED GROUND-BASED AND CORONAS-F OBSERVATIONS. II. MAGNETIC FIELDS AT DIFFERENT HEIGHTS OF CORONAL HOLES, by *O.I. Bugaenko, V.V. Grechnev, 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*. Simultaneous spaceborne and ground-based observations have been used to study magnetic fields in the coronal holes at different heights in the solar atmosphere. The data were obtained with the CORONAS-F SPIRIT instrument and the Universal Spectrophotometer installed on the BST-2 telescope at the Crimean Astrophysical Observatory. The following results have been obtained:

On the basis of a single approach, a method has been developed for isolating coronal holes (CH) and determining their area from the solar observations in the spectral lines HeI  $\lambda$  10830 Å, Fe IX, X  $\lambda$  171 Å, Fe XI  $\lambda$  195 Å, and Fe XV  $\lambda$  284 Å.

A few examples are provided showing different variation of the CH area as a function of height.

It is shown that if the area of a coronal hole increases with height, such a hole is almost entirely located within an open magnetic tube. If the area decreases with height, the CH is located in the closed-field region.

It is shown that in the photosphere, the inclusions of magnetic field of opposite sign embedded in the main field of a coronal hole occupy up to 20 – 25% of the CH area. At the height of 25 – 30 thousand km, the magnetic field of the coronal hole becomes unipolar.

**Ключевые слова:** Солнце, корональные дыры, магнитные поля

---

## 1 Введение

Корональные дыры (КД) – долгоживущие, до нескольких солнечных оборотов, 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 принятой практике отождествления КД в Мировом Центре Данных в США (МЦД Б-1) под корональной дырой понимается униполярная магнитная область без внутренних видимых относительно крупных деталей типа волокон и арочных структур. Считается, что КД расположены в области открытых линий крупномасштабного магнитного поля и являются источниками быстрых квазистационарных потоков солнечного ветра. Многочисленные измерения свидетельствуют, что КД являются областями с пониженными плотностью и электронной температурой плазмы (Зиркер, 1977; Уисброу, 1988).

КД – объекты интенсивных исследований уже более 30 лет, и, тем не менее, многие физические свойства КД и особенности их эволюции остаются невыясненными. Одна из причин этого – трудности в идентификации КД во многих случаях. Специалистам до сих пор не удалось сформулировать единые общепризнанные критерии выделения КД. Это связано, в частности, с тем, что в области перехода от КД к окружающему фону во многих случаях отсутствуют резкие изменения яркости, которые можно было бы рассматривать как границу КД. Резкие границы обычно имеют участки неполярных КД, примыкающих к активным областям, а также полярные КД. Существуют также трудности, связанные с выделением небольших по размерам КД.

Одним из нерешенных вопросов, касающихся КД, является вопрос о действительном соответствии наблюдаемых КД и открытых магнитных трубок. Единственное измерение магнитного поля в КД было проведено Боровик и др. (1998) по микроволновому излучению в диапазоне от 9 см до 29.6 см. Величина магнитного поля изменялась от 2 Гс на 9 см до 7 – 10 Гс на 18 см и сохраняла это значение или слабо менялась до 29.6 см. Среднее значение продольной компоненты магнитного поля на уровне фотосферы, измеренное по станфорским магнитограммам, составляло  $\sim 0.2$  Гс. Из-за отсутствия регулярных прямых измерений магнитного поля в короне сведения об открытых магнитных трубках в солнечной атмосфере сегодня получают, в основном, двумя способами. Во-первых, используя расчеты магнитного поля короны в потенциальном приближении, во-вторых, выявляя в КД структуры, которые можно рассматривать как проявление в короне открытых линий поля (в полярных дырах, например, это полярные щеточки).

Сопоставления оснований рассчитанных открытых магнитных трубок и наблюдаемых КД выявили сложную картину их связи. Положения, формы и размеры оснований открытых трубок и связанных с ними КД могут заметно различаться в зависимости от вида используемых при проведении расчетов измеряемых магнитных полей, особенностей метода расчета поля, спектрального диапазона, в котором наблюдаются КД, и других факторов. Есть случаи, когда рассчитанным открытым магнитным трубкам не соответствуют наблюдаемые дыры и, наоборот, КД наблюдаются, а связанные с ними рассчитанные открытые трубки отсутствуют.

Существуют и другие указания на то, что КД (по крайней мере, частично) могут оказываться вне открытых магнитных трубок в области магнитного поля со смешанной полярностью поля. Впервые показано, что участки солнечной атмосферы с очень высокими петлями также могут давать эффект корональной дыры. Кроме того, обнаружены случаи смены знака магнитного поля внутри корональной дыры (Степанян, Маланушенко, 2001), (Еселевич, Файнштейн, 1989).

Касааясь связи солнечных магнитных полей и КД, отметим, что существуют лишь единичные работы, посвященные количественной связи “фотометрии” КД с магнитными полями (Ванг и др., 1998). В частности, неизвестны количественные зависимости контраста КД в различных линиях, степени резкости их границ от параметров магнитного поля. Практически не установлены зависимости плотности и температуры плазмы в КД от характеристик магнитного поля.

О сложной связи наблюдаемых КД с солнечными магнитными полями косвенно свидетельствуют результаты работ Черток и др. (2002), Маланушенко, Степанян (1996). В работе Степанян, Малащук (2002) по наблюдениям 100 КД на хромосферном и корональном уровнях показано, что существует 2 класса КД. В КД первого класса площадь растет или не меняется с высотой, а в КД второго класса площадь с высотой уменьшается, в основном за счет появления мелкомасштабных структур на корональном уровне. Маланушенко (1995) показала, что на Солнце существуют области, имеющие только один из двух характерных признаков КД (повышенная яркость в линии HeI 10830 Å и пониженный контраст). Существуют области пониженного контраста, но не отличающиеся по яркости от спокойного Солнца, и области с яркостью КД, но с большим контрастом. Отметим, что подобного рода структуры наблюдались в КД в микроволновом излучении на волне 5.2 см. (Максимов и др., 2002)

Целями II и III статей начатой серии “Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и КА КОРОНАС-Ф” (Бугаенко и др., 2003) являются получение количественных фотометрических и магнитных данных о КД на разных уровнях атмосферы Солнца, анализ резкости границ КД, их изменчивости со временем и в связи с развитием активных образований вблизи КД.

В дальнейшем серия будет продолжена.

## 2 Наблюдательный материал

В данной статье несколько КД, наблюдавшихся в 2002 г, а также области с характеристиками, промежуточными между характеристиками КД и окружающих спокойных участков Солнца (далее промежуточные области), проанализированы на основе квазиодновременных наблюдений в линии HeI 10830 Å на наземном телескопе БСТ-2 НИИ КрАО, в линиях Fe IX – X 171 Å, Fe XI – 195 Å и в линии Fe XV 284 Å по наблюдениям на КОРОНАС-Ф в эксперименте СПИРИТ. Излучение в этих линиях соответствует следующим температурам в области их формирования  $T \sim 10^4\text{K}$ ,  $1.3 \times 10^6\text{K}$ ,  $1.6 \times 10^6\text{K}$ ,  $2.0 \times 10^6\text{K}$ . С некоторой долей произвола можно интерпретировать различие в температурах разницей высот областей, наблюдаемых в этих линиях. Кроме этого, к анализу были привлечены расчеты “мгновенных” трехмерных распределений магнитного поля в солнечной атмосфере над видимым диском Солнца, полученные с использованием измеряемых фотосферных магнитных полей в обсерватории Китт-Пик (<ftp://140.252.1.21>). Описание наблюдений и методов их совместного анализа дано в первой статье настоящей серии (Бугаенко и др., 2003). В Таблице 1 приведен список исследованных в данной статье объектов.

Основное внимание будет уделено большой долгоживущей КД (КД1 в таблице 1). Ее изображение в четырех линиях приведено на рис. 1. Гелиографические координаты ее центра  $L=0^\circ$ ,  $B=0^\circ$ . В работах Маланушенко, Степанян (2001) и Степанян, Штерцер (2002) по наблюдениям в линии HeI  $\lambda$  10830 Å были прослежены изменения, происходившие в приэкваториальной области Солнца вблизи точки с гелиографическими координатами  $L=0^\circ$ ,  $B=0^\circ$  в течение 42 Каррингтоновских оборотов (апрель 1999 – май 2002 гг.). За это время в рассматриваемой области наблюдалось четыре КД. Последняя из них – компактная КД с резко очерченной западной границей, образовавшаяся в январе 2002 г. (Каррингтоновский оборот № 1985). Она прослежена нами в течение 2002 г. КД находилась

Таблица 1. Список исследованных корональных дыр

Дата	№ корональной дыры	Координаты прямоугольной области (")			
		на Солнце, содержащей КД			
		x1	y1	x2	y2
03.02.02.	1	-500	-500	500	400
	2	-400	370	400	770
04.02.02.	1	-300	-500	700	400
06.02.02.	1	30	-500	980	400
07.02.02.	1	350	-520	980	400
	2	-600	300	50	960
	3	-550	-960	480	-400
05.03.02.	1	50	-400	960	300
	3	-700	-950	950	-400
02.04.02	1	360	-325	940	390
	4	-650	350	100	960
	3	-650	-940	600	150
03.05.02	4	-470	150	670	890
	3	-600	-950	270	250
04.05.02	4	150	150	870	640
	3	-500	-700	500	250
23.05.02	4'	-196	361	431	714
	5'	137	-295	745	341

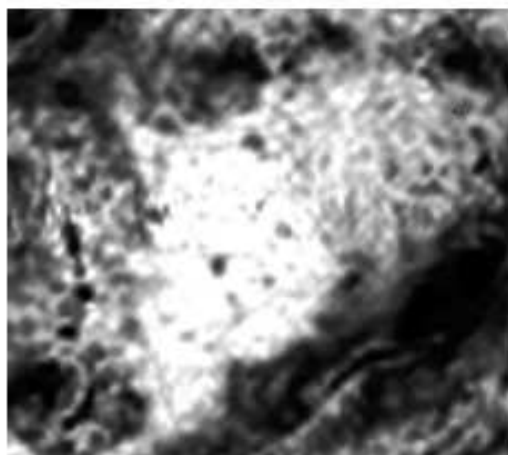
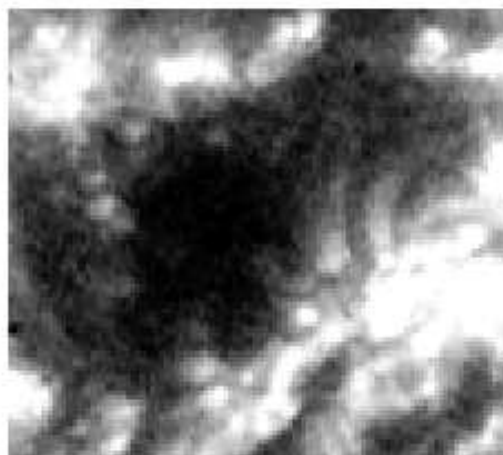
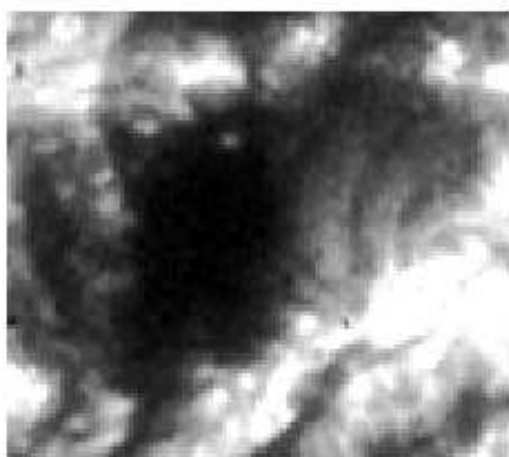
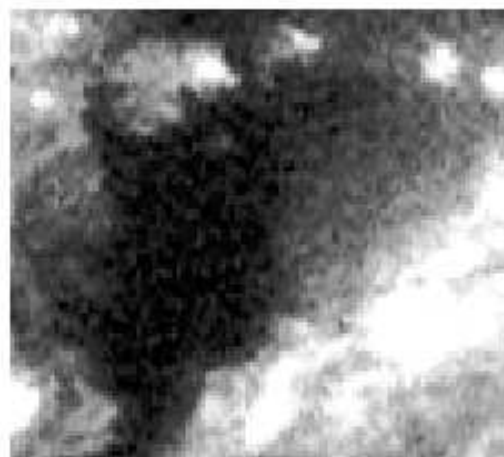
в долгоживущей спокойной крупномасштабной структуре фонового поля N-полярности. В течение года КД медленно меняла свое положение и яркость. Период вращения КД в 2002 г. составлял 26.5 дня, что примерно на 0.75 дня меньше каррингтоновского периода вращения.

### 3 Площади корональных дыр на разных высотах в атмосфере Солнца

#### 3.1 Измерение площадей корональных дыр

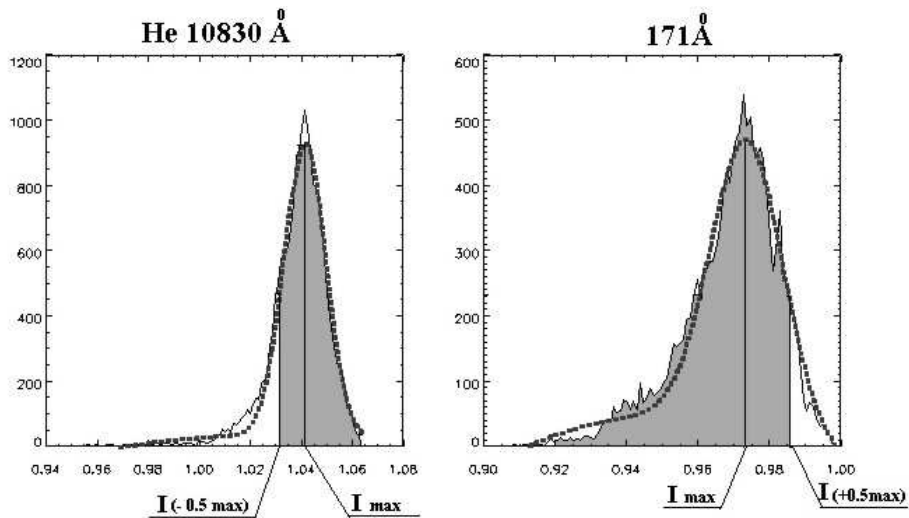
В настоящее время отсутствуют общепринятые в научном сообществе как определение границ КД так и технологии их идентификации. Главная причина этого заключается в том, что в действительности область солнечной атмосферы, рассматриваемая в качестве КД, часто не характеризуется резкими изменениями в пространстве своих характеристик, прежде всего интенсивности излучения, в котором она регистрируется. Другими словами, у КД не всегда наблюдаются резкие границы. В результате определение границ КД, измеряемых в различных линиях спектра солнечного излучения, производится с использованием различных критериев и носит субъективный характер.

В данной статье площадь КД находится с помощью метода, не предполагающего предварительного нахождения ее границы. Этот метод, с некоторыми видоизменениями, применялся ранее в работах Маланушенко, Степанян (1996) и Степанян, Малащук (2002). Его суть заключается в следующем. Сначала на нормированных по средней яркости изображениях Солнца, полученных в один и тот же день в разных спектральных линиях по двум фотометрическим критериям (яркость и контраст) очерчивается единая область, заведомо включающая КД на всех изображениях. После этого по каждому наблюдению определяется часть этой области, занятая элементами (пикселями) с яркостью, характерной для КД на изображениях в данной линии. Площадь выделенного таким образом участка солнечной поверхности (рассчитанного в кв. км) и принималась за площадь КД. Здесь не фигурирует понятие границы, но есть некоторая неопределенность в определении характерного значения интенсивности КД ( $I_{\text{КД}}$ ). Величина  $I_{\text{КД}}$  определялась следующим образом. На нормированном по средней яркости изображении Солнца выделялась область внутри КД. По всем пикселям этой области строилась гистограмма – распределение участков внутри дыры по яркости.

**3.02.2002****10830 Å****171 Å****195 Å****284 Å**

**Рис. 1.** Изображения КД 1, полученные в четырех спектральных линиях: 10830 Å, 171 Å, 195 Å, 284 Å 3 февраля 2002 года

Для изображений в линии HeI 10830 Å (напомним, что КД на изображениях Солнца в этой линии ярче невозмущенного диска) характерными для КД принимались интенсивности  $I_{\text{КД}} > I_{(-0.5\text{max})}$ , где  $I_{(-0.5\text{max})}$  – интенсивность, соответствующая значению 0.5 максимума гистограммы со стороны меньших интенсивностей (см. рис. 2а). Для изображений Солнца в корональных линиях, в которых КД темнее невозмущенного диска, характерная для КД интенсивность определяется формулой  $I_{\text{КД}} < I_{(+0.5\text{max})}$ , где  $I_{(+0.5\text{max})}$  – интенсивность, соответствующая значению 0.5 максимума гисто-



**Рис. 2.** Гистограммы распределения по яркости пикселей внутри КД по наблюдениям в линии HeI 10830 Å (рис. 2а) и в линии 171 Å (рис. 2б).  $n$  – число пикселей,  $I$  – нормированная интенсивность,  $I=1$  соответствует яркости невозмущенного диска

граммы со стороны больших интенсивностей (рис. 2б). На рис. 2а,б области характерных значений интенсивности КД показаны серой заливкой.

В Таблице 2 приведены средние значения полученных по нескольким КД характерных интенсивностей. Величины, помещенные в третьем ( $I_{(-0.5max)}$ ) и пятом ( $I_{(+0.5max)}$ ) столбцах, объяснены выше. В четвертом столбце – интенсивность, соответствующая максимуму гистограммы. В шестом столбце  $I_{(extrem)}$  – максимальные значения интенсивности КД по наблюдениям в HeI 10830 Å и минимальные по наблюдениям в остальных линиях. Обратим внимание на то, что  $I_{(extrem)}=0$  для Fe XV 284 Å. Это приводит к большой неопределенности при нахождении интенсивности КД в этой линии из-за сильного влияния неоднородностей фона по кадру. В связи с этим, при определении изменений площади КД с высотой мы исключили из рассмотрения изображения Солнца, полученные в линии 284 Å.

**Таблица 2.** Характерные интенсивности внутри корональных дыр, полученные по наблюдениям в четырех спектральных линиях

№	Длина волны	$I_{(-0.5max)}$	$I_{(max)}$	$I_{(+0.5max)}$	$I_{(extrem)}$
1	HeI 10830 Å	1.013	1.027	1.04	1.057
2	Fe IX, X 171 Å	0.47	0.60	0.80	0.30
3	Fe XI 195 Å	0.42	0.50	0.60	0.30
4	Fe XV 284 Å	0.40	0.70	0.80	0

### 3.2 Изменение площадей КД с высотой

В работах Малапушенко, Степанян (1996) и Степанян, Малащук (2002) на основе сопоставления наблюдений КД в хромосферной линии HeI 10830 Å и в ряде корональных линий было достаточно

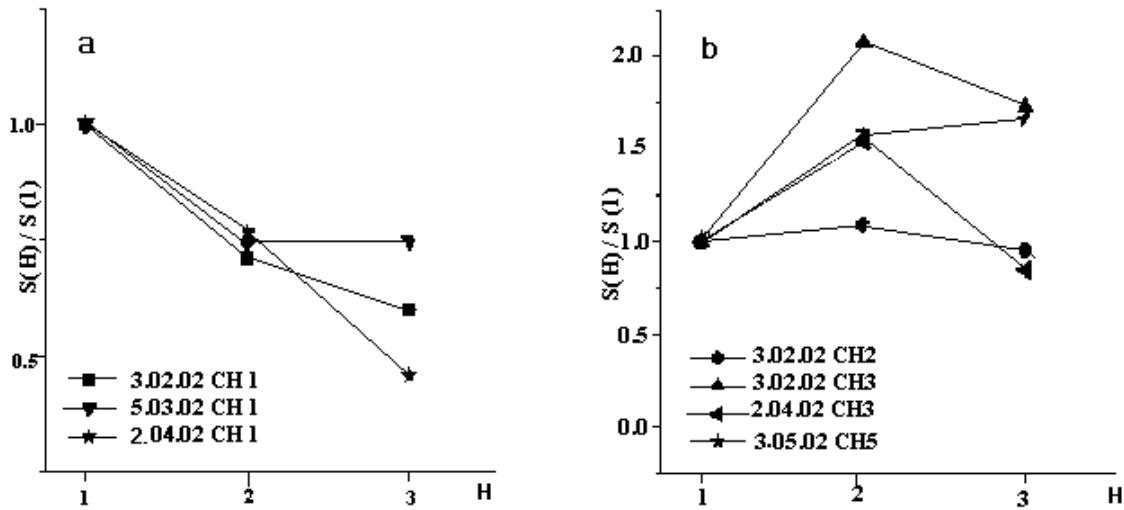


Рис. 3. Изменение площади КД с высотой для нескольких событий

убедительно показано, что площади КД меняются с высотой по-разному. В частности было обнаружено, что существуют дыры, в которых их площадь уменьшается с высотой, и, наоборот, есть КД, площадь которых с высотой возрастает. В Степанян, Малащук (2002) эти два класса КД были проинтерпретированы как области солнечной атмосферы с открытыми и замкнутыми линиями магнитного поля.

В настоящей работе для нескольких КД и для их окрестностей рассчитаны, с использованием метода (Руденко, 2001), “мгновенные” распределения магнитного поля. Изменение площади этих дыр с высотой представлено на рис. 3. За единицу принята площадь, определенная по линии HeI 10830 Å. Шкала высот на графиках условная. Точки 1, 2 и 3 на оси абсцисс соответствуют высотам образования линий HeI 10830 Å, Fe IX – X 171 Å и Fe XI – XII 195 Å. Хотя у ионов Fe довольно широкие температурные зависимости возбуждения, грубо будем считать, что высоты увеличиваются слева направо. Обращает на себя внимание то, что для КД1 (см. таблицу 1) площадь дыры уменьшается при переходе от высоты “1” к высоте “2”, и далее при переходе к высоте “3” либо продолжает уменьшаться, либо слабо меняется (рис. 3а). В то же время для КД2 и КД3 их площади растут на высотах “1” – “2” и далее, на высоте “2” – “3”, либо слабо меняется, либо уменьшается (рис. 3б). Мы предполагаем, что эти две группы КД относятся к выделенным в (Степанян, Малащук, 2002) классам. Чтобы в этом убедиться, были сопоставлены положения КД и оснований рассчитанных открытых магнитных трубок. Результаты такого сопоставления мы обсудим в разделе 4.

## 4 Магнитные поля в области КД и в промежуточных областях

### 4.1 О соответствии открытой магнитной трубки и корональной дыры

Используя метод расчета магнитного поля в солнечной атмосфере (Руденко, 2001), можно рассчитать “мгновенные” (т.е. в момент измерения магнитного поля) конфигурации открытых магнитных трубок и сравнить их сечения на различных высотах с измеряемыми на этих же высотах площадями КД.

В данной работе мы сопоставим лишь положения КД с положениями оснований открытых магнитных трубок (ОМТ) в области измерения поля (<ftp://140.252.1.21>). На рис. 4 слева показаны изображения Солнца в линии HeI  $\lambda$  10830 Å с выделенными корональными дырами, на которые нанесены отмеченные точками основания открытых силовых линий магнитного поля, рассчитанные

для момента наблюдений в линии  $\text{HeI } \lambda 10830 \text{ \AA}$  эти линии группируются в открытые магнитные трубки. На правых рисунках для удобства сопоставления дыр с рассчитанными ОМТ отдельно показаны только изображения Солнца в линии  $\text{HeI } \lambda 10830 \text{ \AA}$ .

Заметим, что это одно из первых сопоставлений “мгновенных” ОМТ и КД. Большинство предшествовавших сравнений такого рода использовали ОМТ, рассчитанные с помощью синоптических карт магнитного поля. Другими словами, с КД сравнивались ОМТ, рассчитанные по усредненному, как минимум, за несколько дней полю.

Визуально можно оценить степень согласия двух структур: ОМТ и КД. Прежде всего обращает на себя внимание различный характер соответствия между ОМТ и КД для двух КД: для КД1, наблюдавшейся в феврале 2002 г., и КД3, зарегистрированной 2 апреля 2002 г. Для КД1 ОМТ в основном оказывается вне дыры, охватывая ее с севера, и запада и юга. В то же время КД3 почти полностью оказывается в пределах связанной с ней ОМТ (ОМТ оказалась несколько смещенной к западу по сравнению с КД). При этом ОМТ имеет большую площадь, чем КД3. Учитывая, что КД1 относится к классу КД, площадь которых уменьшается с высотой (рис. 3а), а в КД3 площадь растет с высотой (рис. 3в), мы приходим к выводу, что результаты расчетов ОМТ подтверждают интерпретацию двух типов КД, которая была сделана в работе (Степанян, Малащук, 2002): КД, площадь которой уменьшается с высотой, находится в области с замкнутыми линиями поля. И, наоборот, КД, площадь которых возрастает с высотой (по крайней мере с высоты “1” до высоты “2”) находятся в области с открытыми линиями поля. В одной из следующих работ мы планируем сопоставить рассчитанные ОМТ и КД для большого числа событий. Это позволит нам более надежно выяснить характер соответствия между рассчитанными ОМТ и КД двух классов.

#### 4.2 Напряженность и полярность магнитного поля в корональных дырах

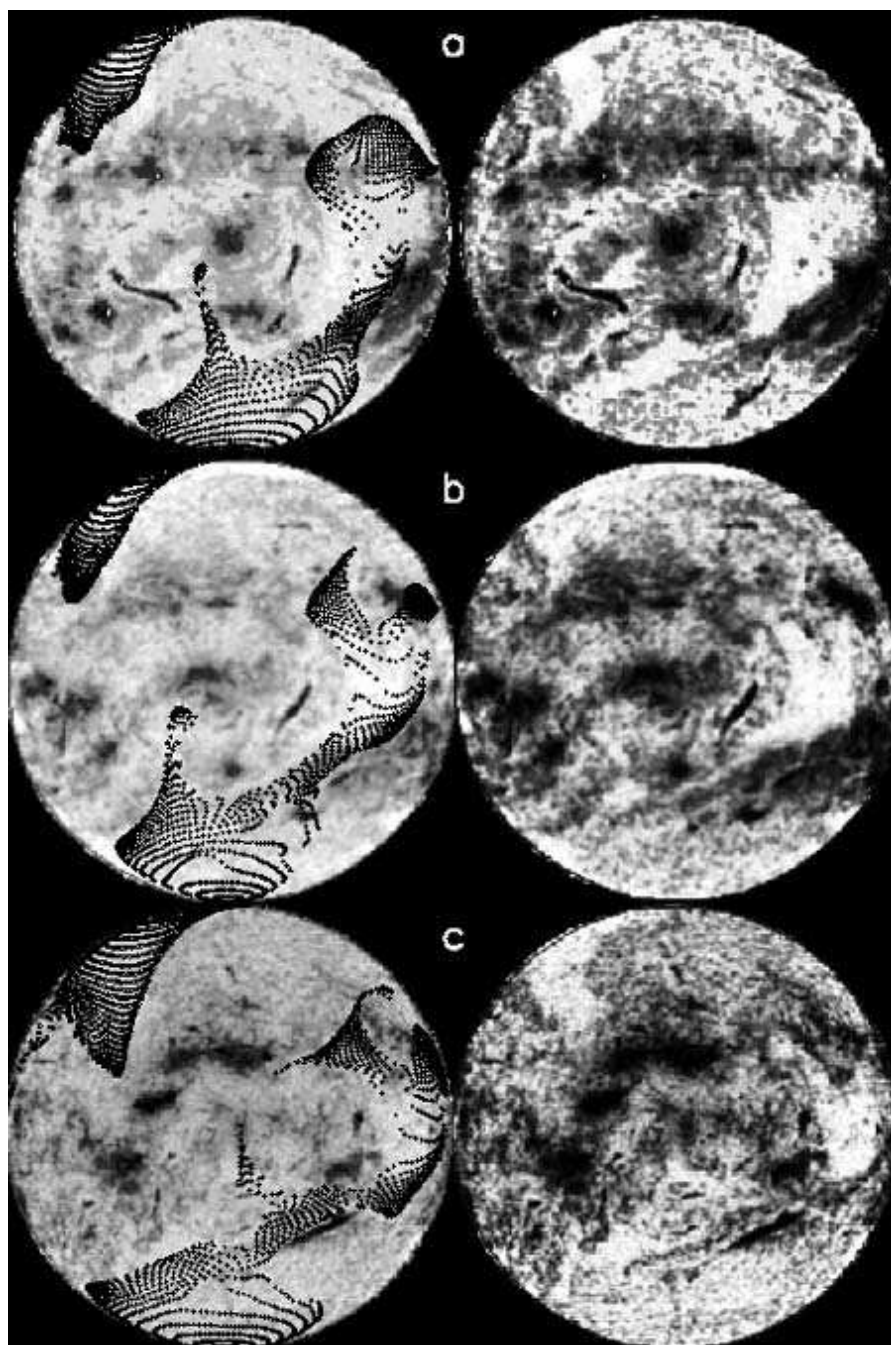
По определению, КД расположена в преимущественно униполярной структуре фонового магнитного поля. Тем не менее, это не исключает наличия в КД вкраплений магнитных элементов с противоположной полярностью поля. Интересно получить ответы на следующие вопросы: (1) какую долю площади КД эти вкрапления занимают; (2) варьируется ли площадь таких вкраплений (или доля площади КД, которую они занимают) в разных КД; (3) чем определяется площадь вкраплений в конкретной КД; (4) и, наконец, как она меняется с высотой. В данной работе мы попытаемся получить предварительные ответы на вопросы (1) и (4).

Для КД и промежуточных областей, приведенных в Таблице 1, были рассчитаны магнитные поля на следующих высотах  $H$  в атмосфере Солнца: 0, 3, 10, 15, 20, 30 тыс. км.  $H = 0$  км в данном случае соответствует условному уровню измерения магнитного поля в фотосфере в линии  $\text{FeI } \lambda 8688 \text{ \AA}$  (<ftp://140.252.1.21>). На рис. 5 представлено изображение КД1 (3 февраля 2002 г.) с наложенной на него картой изолиний радиальной компоненты магнитного поля на  $H = 0$  км. Карты магнитного поля для других указанных выше высот  $H$  приведены на рис. 6. Отметим, что максимальная напряженность радиальной компоненты магнитного поля на высотах 0 – 30000 км в КД порядка 15 Гс, а в промежуточных областях – около 5 Гс.

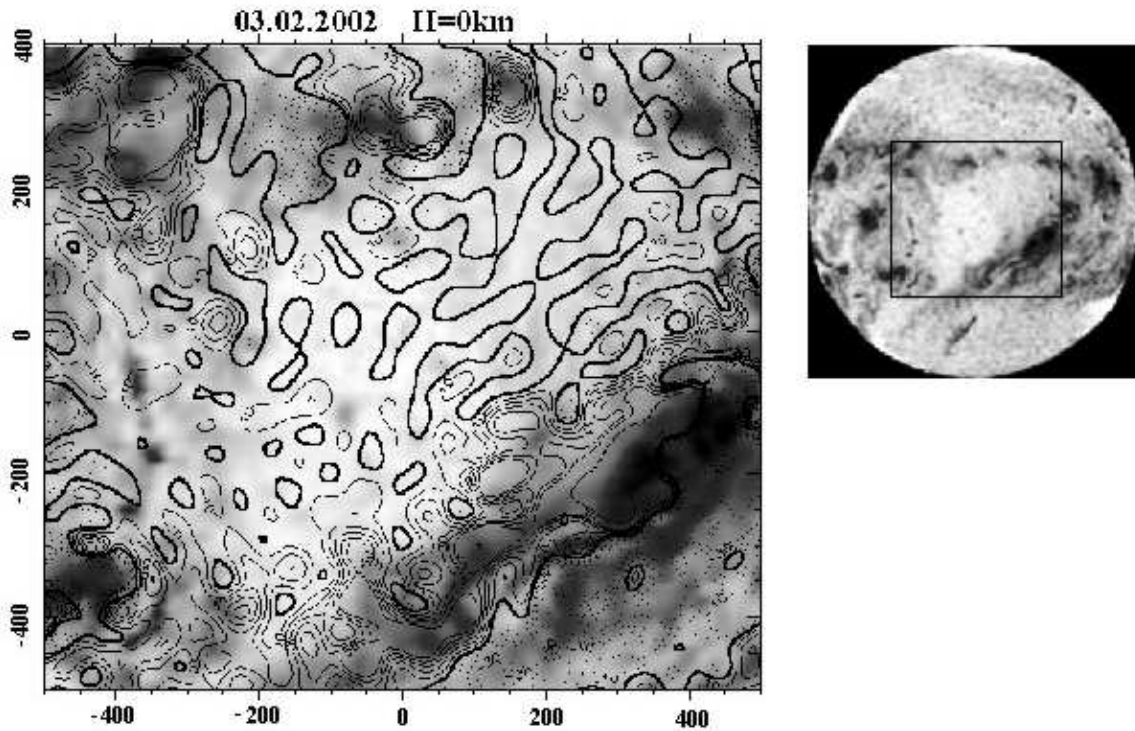
Для всех рассмотренных нами КД были определены площади вкраплений областей, знак поля в которых противоположен преимущественному знаку поля фоновой структуры, в которой находится КД. Оказалось, что во всех рассмотренных КД вкрапления составляют 20 – 25% площади КД при  $H = 0$ . С ростом высоты площадь вкраплений уменьшается, и на высоте 15 – 20 тыс. км поле становится униполярным. Для промежуточных областей доля вкраплений на высоте  $H = 0$  заметно больше (до 40% площади). Но на высоте 20000 км все они практически становятся униполярными. На рис. 7 представлено изменение площади вкраплений  $S(-)$  для КД1 и расположенной рядом с ней промежуточной области 3.02.02. С уменьшением КД и ростом промежуточной области площади вкраплений в процентном отношении выравниваются (в КД относительная площадь вкраплений растет, в промежуточной области уменьшается).

Отметим, что по яркости и тонкой структуре вкрапления поля противоположного знака не отличаются от элементов с полем основного знака в КД.





**Рис. 4.** Сравнение КД с основаниями открытых магнитных трубок (ОМТ). Рисунки слева: на изображения Солнца в линии HeI 10830 Å наложены полученные из расчетные основания открытых линий поля. Справа – для удобства сравнения КД с расчетами ОМТ даны оригинальные изображения Солнца в линии HeI 10830 Å. Первая пара рисунков (сверху вниз) соответствует моменту времени 06.02.2002 UT 07:34. Вторая – 05.03.2002. UT 09:44. Третья – 02.04.2002 UT 07:37

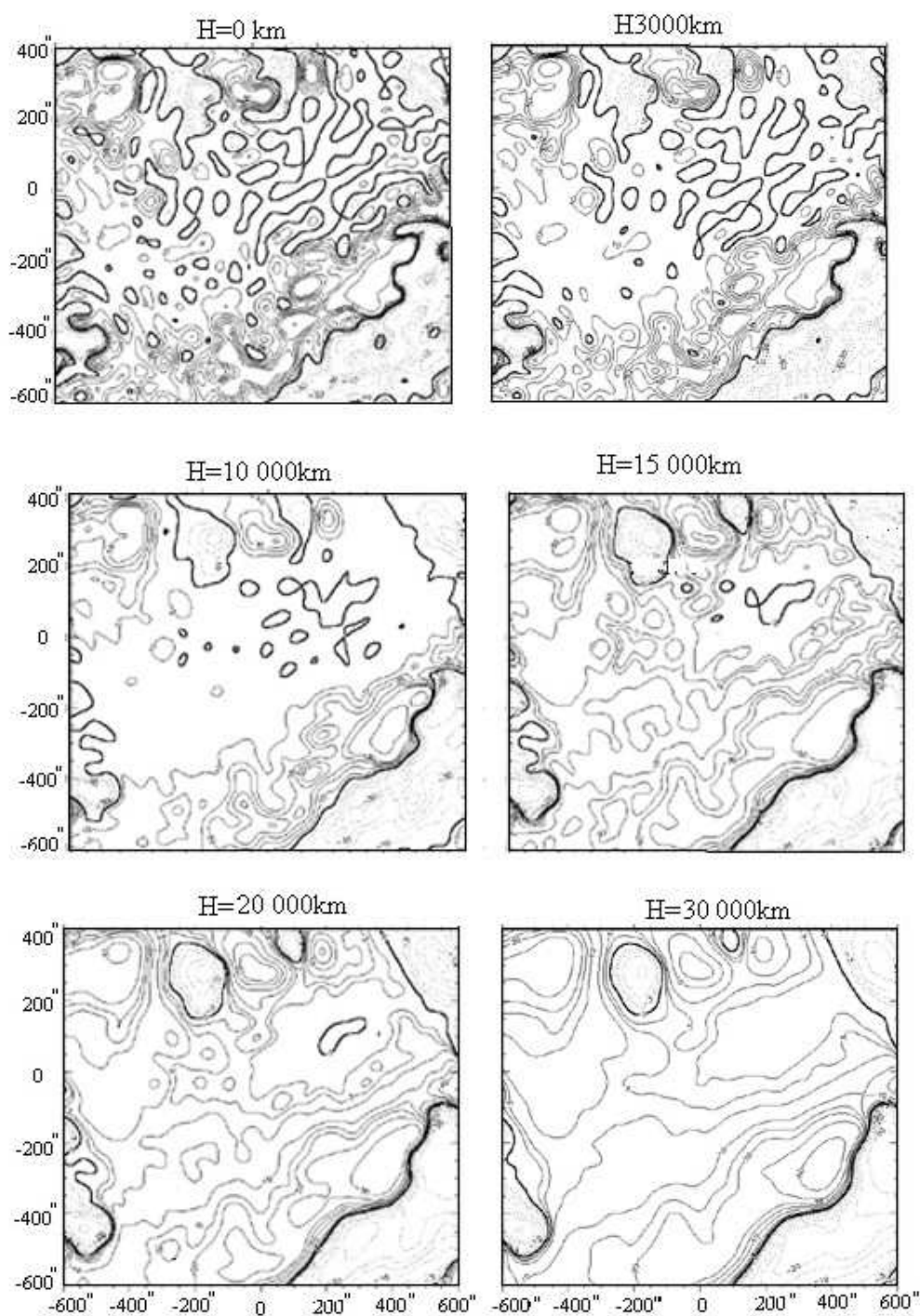


**Рис. 5.** Изображение КД1 в линии 10830 Å 4 февраля 2002 г с наложенной на него картой радиальной компоненты магнитного поля (BR) на высоте  $H = 0$  км. На карте представлены изолинии  $BR(\text{Гс})/1.46$ : -500, -100, -50, -40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 500

В данном случае при определении доли площади КД, которую занимают магнитные элементы противоположной полярности, использовались расчеты поля с разложением потенциала поля по 90 сферическим гармоникам. Это соответствует своего рода усреднению измеряемого поля по площадкам с угловым размером  $\sim 2^\circ \times 2^\circ$  (в гелиографической системе координат). Здесь  $2^\circ$  – угловой размер половины длины волны самой коротковолновой гармоники.

Нетрудно убедиться, что полученный выше масштаб высоты, на котором поле становится униполярным, вполне ожидаем. Действительно, этот масштаб должен соответствовать высоте, на которой затухают самые коротковолновые возмущения магнитного поля, т.к. только они могут приносить в область корональной дыры магнитные поля с противоположной (по сравнению с преобладающей) полярностью. Половина длины волны самой высокой гармоники в нашем случае составляет  $\sim 2$  градуса, что в единицах длины приблизительно равно 24000 км. Близкое к этому значение мы и получили из своего анализа. Можно ожидать, что изменение в расчетах числа используемых сферических гармоник приведет к изменению доли площади КД, занимаемой магнитными элементами с противоположной полярностью поля и к изменению масштабов высоты, на которых исчезают вкрапления магнитных полей с противоположной полярностью.

В действительности для оценки масштаба высоты, на котором исчезают вкрапления полей с противоположной полярностью, физически наиболее обоснованным представляется использование расчетов поля с разложением потенциала по 90 и более сферических гармоник, как в нашем случае. Согласно существующим представлениям, магнитные поля в нижних слоях солнечной атмосферы формируются на границах супергранул. С увеличением высоты открытые (или замкнутые, но уда-



03.02.02

Рис. 6. Карты магнитного поля в области КД1 4.02.2002 для высот 0, 3, 10, 15, 20, 30 тысяч км

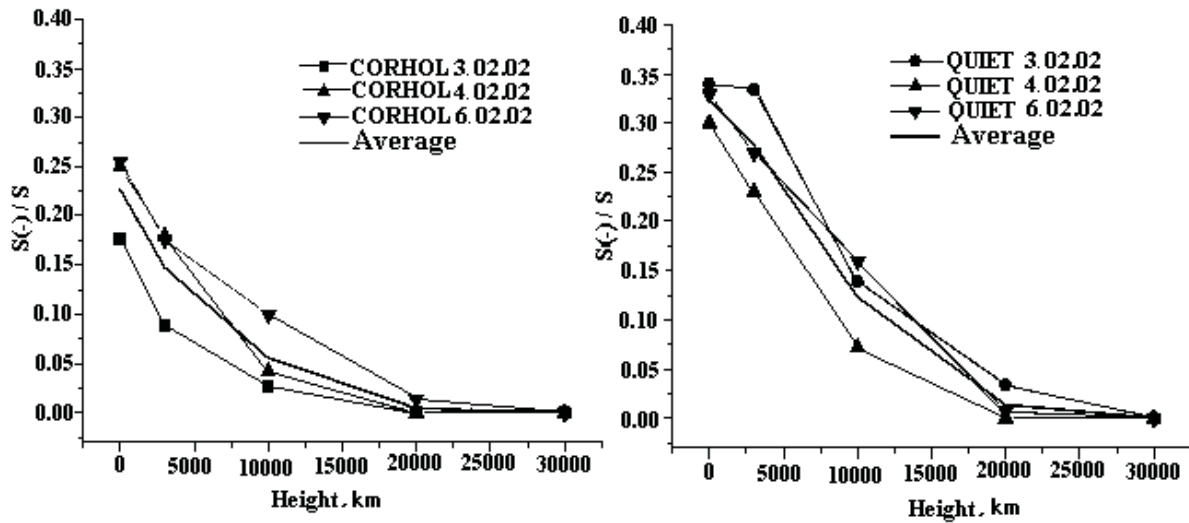


Рис. 7. Изменение площади вкраплений поля  $S$  – полярности с высотой 3.02.02. а) для КД1 и б) для промежуточной области вблизи КД1

ляющиеся на относительно большие расстояния от поверхности Солнца) силовые линии поля расходятся, формируя похожие на опахала структуры и оказываясь над мелкомасштабными замкнутыми линиями поля (Стенфло, 1994). Начиная именно с этой высоты и исчезают мелкомасштабные вкрапления поля противоположной полярности. Естественно считать, что этот масштаб по высоте в рамках указанной модели формирования магнитного поля должен быть порядка характерного размера супергранулы, т.е. составлять примерно 30000 км. Мы, используя расчеты магнитного поля в солнечной атмосфере с разложением потенциала по 90 гармоникам, получили близкий результат.

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.

## Литература

- Боровик В.Н., Медарь В.Г. и др. // Письма в Астрон. Ж. 1998. Т. 25. С. 299.  
 Бугаенко О.И., Гречнев В.В. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 100. (в печати).  
 Ванг, Ву и др. (Wang A.H., Wu S.T., Dryer M., Hathaway D., Obridko V., Fomichev V., Kharshiladze A.F., Zhitnik L., and Slemsin V.) // Proceedings of the third SOLTIP Symposium, Beijing, China, October 14–18. 1996. Beijing, 1998. P. 41.  
 Еселевич, Файнштейн (Eselevich V.G. and Fainshtein V.G.) // Planet Space Sci. 1989. V. 37. N. 9. P. 1027.  
 Зиркер (Zirker J.B.) // Coronal holes and high-speed wind streams. Reviews of Geophysics and Space Physics. 1977. V. 15. P. 257.  
 Максимов В.П., Просоветский Д.В. (Maksimov V.P., Prosovetsky D.V.) // Proc. 10<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting “Solar Variability: From Core to Outer Frontiers”. Prague. ESA SP-506. 2002. P. 689  
 Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1995. Т. 89. С. 22.

- Маланушенко Е.В., Степанян Н.Н. (Malanushenko E.V., Stepanian N.N.) // IV Russ. Symp. "Mathematical Models of the Sun–Earth Environment". eds. Kropotkin. A.P., Antonova A.E., Veselovsky I.S., Moscow: MSU. 1996. P. 41.
- 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., Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 76.
- Степанян Н.Н., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 8
- Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // Изв. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 218.
- Уисброу (Withbroe G.L.) // Astrophys. J. 1988. v. 325. p. 442.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar Magnetic Fields. Polarized Radiation Diagnostics. 1994. Kluwer Academic Publishers.
- Черток И.М. и др. (Chertok I.M., Hudson H.S., Mogilevsky E.I., Obridko V.N., Shilova N.S.) // Astrophys. J. 2002. V. 567. P. 1225.