

УДК 520.3, 520.8, 523.982

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

I. Методы наблюдений и анализа солнечных изображений, зарегистрированных в различных спектральных диапазонах излучения

О.И. Бугаенко¹, В.В. Гречнев², Р.К. Жигалкин³, И.А. Житник⁴, А.П. Игнатьев⁴, С.В. Кузин⁴, И.М. Лившиц⁵, В.П. Максимов², В.Н. Обридко⁵, А.А. Перцов⁴, Г.В. Руденко², В.С. Слемзин⁴, Н.Н. Степанян³, А.Ф. Харшиладзе⁵

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 Крымская Астрофизическая Обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

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. Предлагаемая серия работ основана на анализе изображений Солнца в различных диапазонах спектра совместно с данными о продольном магнитном поле.

Изображения Солнца получены в 2001 – 2003 гг. в результате координированных наблюдений телескопа-спектрогелиографа СПИРИТ на орбитальной станции (ОС) КОРОНАС-Ф в диапазоне 8.4 – 335 Å, наземного телескопа БСТ-2 НИИ КрАО в линии HeI 10830 Å и радиотелескопа ССРТ. Эти изображения соответствуют разным температурам плазмы и высотам в солнечной атмосфере, от верхней хромосферы до нижней короны. Для расчетов магнитного поля на разных высотах использованы данные регулярных измерений на обсерваториях WSO и Kitt Peak. В статье описаны основные параметры приборов, с помощью которых проводились наблюдения, характеристики полученных данных, методики обработки изображений с учетом особенностей использованных солнечных инструментов и теоретические подходы, применяемые при совместном анализе изображений и карт магнитного поля.

STUDY OF SOLAR FEATURES USING COMPLEX GROUND-BASED AND CORONAS-F OBSERVATIONS: I. OBSERVATION TECHNIQUES AND ANALYSIS OF SOLAR IMAGES OBTAINED IN VARIOUS SPECTRAL RANGES OF EMISSION, *by O.I. Bugaenko, V.V. Grechnev, R.K. Zhigalkin, I.A. Zhitnik, A.P. Ignatiev, S.V. Kuzin, I.M. Livshits, V.P. Maksimov, V.N. Obridko, A.A. Pertsov, G.V. Rudenko, V.S. Slemzin, N.N. Stepanian, A.F. Kharshiladze.* We propose a series of papers based on the analysis of solar images in various spectral ranges combined with magnetic field data. The solar images were obtained during 2001 – 2003 as a result of coordinated observations with the SPIRIT telescope-spectroheliograph on board the CORONAS-F mission (8.4 – 335 Å), the CrAO/BST-2 ground-based

telescope (HeI 10830 Å) and the SSRT radio telescope. The images under consideration correspond to different plasma temperatures and height scales in the solar atmosphere, from the upper chromosphere to the lower corona. The magnetic field at different heights was calculated using data of the WSO and Kitt Peak routine measurements. The article describes the main parameters of the observation equipment, characterizes the data obtained, describes the image-processing methods with allowance for the particular features of the solar instruments, as well as the theoretical approaches to the joint analysis of solar images and magnetic charts.

Ключевые слова: Солнце, методы наземных и космических наблюдений

1 Введение

Для изучения фундаментальных физических процессов, происходящих в солнечной атмосфере, необходим комплексный анализ структур, наблюдаемых с помощью различных реализованных в настоящий момент методов. Каждый из этих методов имеет определенные преимущества и ограничения. С помощью оптических наземных телескопов, расположенных на уровне моря, наблюдаются нижние слои атмосферы Солнца – фотосфера и нижняя хромосфера. Только наблюдения в инфракрасной линии HeI 10830 Å позволяют увидеть с Земли верхние хромосферные слои Солнца, соответствующие высотам около 2500 км и температурам 10000 К. Наблюдения в мягком рентгеновском (МР) диапазоне и в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) дают информацию об относительно горячих солнечных структурах, соответствующих высотам от переходного слоя до нижней короны. Тонкие плазменные структуры, наблюдаемые в линиях многозарядных ионов этого диапазона, ассоциируются с магнитными полями в средней части солнечной атмосферы. Излучение в этих линиях имеет, в основном, тепловую природу, в то время как радионаблюдения дают возможность изучать тепловые и нетепловые процессы, измерять напряженность магнитных полей в короне.

Настоящая серия работ основана на анализе изображений Солнца в различных диапазонах спектра совместно с данными о магнитном поле.

Данная статья посвящена методическим вопросам, связанным с особенностями аппаратуры, а также получаемым с ее помощью экспериментальным данным, методам их обработки и анализа.

В следующих статьях серии предполагается провести количественный анализ различных солнечных структур: корональных дыр, волокон, петельных структур и корональных выбросов масс и т.п., зарегистрированных в результате координированных наблюдений телескопа-спектрогелиометра СПИРИТ на (Собельман, 2003) орбитальной станции КОРОНАС-Ф (Ораевский, Собельман, 2002) в диапазоне 8.4 – 335 Å, радиотелескопа ССРТ (Гречнев, Лесовой, 2003) и наземного телескопа БСТ-2 НИИ КраО в линии HeI 10830 Å (Степанян, Долгополова, 2000). Полученные данные сопоставляются с характеристиками магнитного поля, радиоизлучения и солнечного ветра.

2 Аппаратура и наблюдения

2.1 Наблюдения на КОРОНАС-Ф

Эксперимент СПИРИТ по рентгеновской спектроскопии Солнца проводится с августа 2001 года (Житник, 2002; <http://www.xras.lebedev.ru>). В состав аппаратуры СПИРИТ входят: комплекс рентгеновских телескопов-коронোগрафов на диапазоны 171, 175, 195, 284 и 304 Å; спектрогелиографы на диапазон 177 – 207 и 285 – 335 Å; кристаллический спектрогелиограф на диапазон 8.41 – 8.43 Å (см. табл. 1).

Основной задачей аппаратуры СПИРИТ являются одновременное получение изображений Солнца в нескольких спектральных диапазонах мягкой рентгеновской и XUV области спектра с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением.

Таблица 1. Спектральные интервалы аппаратуры СПИРИТ и характерные температуры возбуждения ионов солнечной плазмы, излучающих в этих интервалах

Канал	Спектральный интервал, Å	Поле зрения, > 60	Угловой масштаб на ячейку	Ионы	T, 10 ⁶ К
двухканальный спектрогелиограф MgXII	8.418–8.423 Å	> 60	4''2	MgXII	10
двухканальный спектрогелиограф XUV диапазона	177 – 207 Å	> 60	5''2 × 93''	OIV, FeIX–XXIII FeXXIV	0.3 – 16
	285 – 335 Å		7''5 × 140''	CaXIV–CaXVII HeII, SiXI FeXV–FeXVI MgVIII, NiXVII, CaXVII	0.5 – 5
4-х канальный телескоп Ричи-телескоп Гершеля	171 ± 3 Å	45 × 50	2''6	FeIX–FeX	1.3
	304 ± 15 Å	корона на 2–5 R _{sun}		HeII, SiXI	0.05; 1.6
4-канальный телескоп Ричи-Кретьена	175 ± 5 Å	42 × 48	2''5	FeX–FeXI	1.3
	195 ± 6 Å			FeXII	1.6
	284 ± 8 Å			FeXV	2
	304 ± 8 Å			HeII, SiXI	0.05; 1.6

Для построения изображений в рентгеновских телескопах используются рентгеновские зеркала с многослойным покрытием Mo-Si и брэгговские кристаллические зеркала. Изображения в этих каналах регистрируются с помощью детекторов изображений на основе ПЗС-матриц. Благодаря использованию в этих детекторах электронно-оптических усилителей изображения (ЭОП), динамический диапазон регистрируемых яркостей в рентгеновских каналах составляет порядка 10⁵. Изменение коэффициента усиления ЭОПа в сочетании с большим диапазоном используемых экспозиций (от 0.01 до 600 с) позволяет регистрировать солнечные структуры в широком диапазоне яркости.

Текущее управление экспериментом СПИРИТ осуществляется по командам группы управления ФИАН, передаваемым на борт 3 – 5 раз в неделю с помощью диалоговой линии. Команды управления могут содержать исполняемые команды, вызывать записанные в память бортового компьютера циклограммы управления. Оперативное управление аппаратурой осуществляется бортовыми компьютерами, выполняющими следующие функции:

1. прием от бортовых систем спутника команд на задание режима работы и выполнение программ наблюдений;
2. управление всеми электронными и механическими узлами приборов;
3. прием данных от детекторов и служебной информации от исполняющих устройств;
4. сжатие, кодирование информации и упаковку ее для передачи по телеметрической системе на Землю.

Наблюдения Солнца с помощью аппаратуры СПИРИТ проводятся регулярно с 15 августа 2001 г. Программа эксперимента включает рутинные наблюдения и сеансы наблюдений по специальным программам. Рутинные наблюдения выполняются регулярно с частотой не менее 1 раза в сутки. Их продолжительность во всех спектральных каналах от 10 до 48 минут. Специальные программы включают наблюдения динамики активных областей с временным разрешением до 10 секунд, наблюдения солнечной короны на расстояниях до 5 солнечных радиусов, долговременные (до 20 суток) наблюдения на бестеневых орбитах с временным разрешением 50 – 100 секунд, наблюдения вспышек с временным разрешением 7 секунд, спектроскопические наблюдения, и т.д.

На аппаратуре СПИРИТ в совместных наблюдениях с БСТ-2 проводились, в основном, синоптические наблюдения. Данные ССРТ привлекаются при анализе динамики активных областей (АО) и синоптических наблюдений. Одна пара изображений Солнца (параметры Стокса I и V) в день, полученных на ССРТ, оперативно выставляется на сайтах <http://ssrt.iszf.irk.ru/ssrt>, <http://www.eastsib.ru/~ssrt/>, <http://www.ssrt.org.ru/>.

Поступающая с борта спутника телеметрическая информация проходит первичную обработку и дешифровку, после чего выделенные кадры изображений и спектров сохраняются в базе данных ФИАН в формате FITS.

2.2 Наземные наблюдения на телескопе БСТ-2 НИИ КрАО

В НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” для проведения фотоэлектрических спектральных наблюдений создан Универсальный спектрофотометр (УСФ), установленный на башенном солнечном телескопе БСТ-2. С помощью УСФ можно получать изображения всего Солнца, или отдельных участков диска, в разных спектральных линиях, а также регистрировать спектры солнечных образований. Сканирование УСФ осуществляется по двум координатам изображения Солнца на щели спектрографа. В качестве приемного устройства на выходе спектрографа можно использовать фотоумножитель ФЭУ-83 или ПЗС-камеру Sony SSC-M254CE. Достаточно высокая чувствительность этих приемников позволяет применять УСФ для исследования Солнца в близкой инфракрасной области, в частности, в линии HeI 10830 Å.

При наблюдении с эквивалентным фокусом телескопа $f = 14\text{ м}$ во втором порядке спектра и установке ФЭУ на выходе камеры спектрографа $f = 16\text{ м}$, общие характеристики системы телескоп–УСФ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики системы БСТ-2-УСФ

Пределы смещения изображения на щели спектрографа	$\pm 1000''$
Минимальный шаг сканирования изображения	$1''64$
Максимальная скорость сканирования изображения	$286'' \cdot \text{с}^{-1}$
Точность возврата изображения после скана длиной 2000 угл. сек.	$1''64$
Время съёма информации	23 мс
Максимальные колебания зеркала при съёме информации	$0''5$
Дисперсия	$0.5 \text{ Å} \cdot \text{мм}^{-1}$
1 элементарный шаг по спектру	0.008 мм

Аппаратура управления сканером и вводом информации с ФЭУ выполнена в стандарте КА-МАК. Крейтом управляет разработанный в НИИ КрАО программный комплекс. Для достижения требуемого быстродействия программные модули реального времени написаны с использованием Ассемблера. Программа-координатор написана на языке Паскаль.

Наблюдения в линии HeI 10830 Å проводятся регулярно с 1999 года и оперативно выставляются на www-странице НИИ КрАО <http://www.crao.crimea.ua/Projects/solar/Helium/>

3 Методы обработки данных

Использование разнородного, как в данном случае, экспериментального материала требует применения разнообразных методов его обработки и анализа с учетом различных характеристик аппаратуры, на которой эти данные получены, и физических причин, обуславливающих существенные различия этих данных.

Предварительная, до этапа совместного анализа, обработка предполагает преобразование формы данных, коррекцию искажений, вносимых в ходе эксперимента и т. д. Решение этой задачи

невозможно без детальной информации о характеристиках инструмента, на котором получены данные. Поэтому измерение и уточнение калибровочных характеристик инструмента является одной из основных задач предварительной обработки данных.

Целями анализа инструментальных характеристик являются:

1. Выяснение реального пространственного разрешения инструментов. Привязка изображений по трём координатам с точностью, соответствующей разрешению инструмента.
2. Точная временная привязка данных; информация об интервале получения кадров в данной серии, времени экспозиции.
3. Измерение возможных масштабных и геометрических искажений инструмента.
4. Определение фотометрических аддитивных (фона, “нагара” фотоприёмника) и мультипликативных (неравномерность чувствительности) характеристик. Выяснение линейности характеристик, их привязка к наблюдаемым величинам.

Практически все эти задачи могут быть решены на этапе калибровочных испытаний инструмента. Полученные характеристики могут уточняться на этапе эксплуатации, или по данным сопутствующих измерений. Их решение, кроме определения пространственных характеристик прибора, не имеет общих алгоритмов и индивидуально для каждого из приборов. Для выяснения пространственных характеристик применяются различные алгоритмы центрирования изображений, с последующим приведением к единой ориентации и масштабу.

Изображения, прошедшие предварительную обработку, сохраняются в едином формате. В качестве общего формата данных, используемых в данной работе, принят FITS (Flexible Image Transport System).

Следующим этапом является совместный анализ данных из различных источников, включающий отождествление и сравнение пространственных структур, наблюдаемых в разных диапазонах, и сопоставление временных вариаций измеряемых параметров. Для этого приведённые к единому масштабу, ориентации и центру изображения интерполируются и совмещаются. В случае, если есть значимый временной сдвиг между моментами регистрации анализируемых данных, приходится решать задачу по так называемой “реротации” изображений, то есть компенсации поворота Солнца вокруг его полярной оси. Реротация производится с помощью пересчёта гелиографических координат всех точек изображения на заданный момент времени. Этот метод используется также для повышения чувствительности усреднением многих кадров на продолжительном интервале времени и слежения за развитием исследуемых объектов на Солнце (Черток, Гречнев, 2003).

Сопоставить или наложить два или более изображений для идентификации соответствующих объектов на этих изображениях, полученных в разных диапазонах, можно несколькими способами: сопоставлением небольших фрагментов изображений: наложением контуров одного изображения поверх другого, представленного в полутоновом или псевдоцветном виде; поочередным «мерцанием» изображений на экране; комбинацией нескольких цветных изображений (Гречнев, Накаджима, 2002). Для реализации описанных выше алгоритмов в настоящее время практически нет альтернативы использованию в качестве программного средства интерактивного языка для работы с данными IDL. На этом языке созданы библиотеки по обработке данных, полученных в ходе наблюдений аппаратуры СПИРИТ, телескопа БСТ-2 НИИ КраО и ССРТ. Они постоянно пополняются и расширяются. Библиотеки широко используют элементы специализированных библиотек SolarSoft и Astrolib.

3.1 Обработка экспериментальных данных СПИРИТ

Для обработки данных эксперимента СПИРИТ в ФИАНе в настоящее время формируется пакет программ начальной подготовки данных, с помощью которых выполняются вычитание фона, проведение калибровок, приведение изображений к солнечным координатам, построение синоптических карт и другие операции, необходимые для проведения дальнейшего фотометрического анализа и сопоставления с данными других наблюдений. При разработке программного обеспечения используется библиотека SolarSoft, а также оригинальные программы для обработки солнечных изображений,

разработанные в НИИ КраО, ИСЗФ, ИЗМИРАН и других институтах, участвующих в обработке данных эксперимента СПИРИТ.

Инструментальные характеристики аппаратуры СПИРИТ определяются с помощью данных ориентации, получаемых с оптических датчиков, а также по авто- и кросс-калибровочным данным.

Вследствие особенностей системы ориентации орбитальной станции КОРОНАС-Ф, изображения Солнца, получаемые в эксперименте СПИРИТ, имеют разворот относительно полярной оси Солнца на некоторый угол и центровку, меняющиеся во времени. Для приведения изображений к стандартному положению (ось NS вертикальна) используются данные об углах ориентации спутника. Эти углы находятся из сравнения изображений звездного неба, получаемых звездными датчиками прибора СПИРИТ с картой звездного неба по данным каталога Hipparcos. В результате формируется и постоянно обновляется файл, содержащий значения углов разворота в течение всего полета. Точность значений углов разворота относительно солнечной оси – не хуже $1'$, дискретность – $3 - 4$ на виток при максимальной угловой скорости до $2 - 3^\circ$ в сутки.

Начальный угол привязки определен по результатам совмещения изображений, полученных в каналах телескопов Гершеля и Ричи-Кретьена, с данными телескопа EIT на космической станции SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov>) и спектрогелиометра MgXII с изображениями SXT на орбитальной станции YONKON.

Для определения центра диска Солнца на изображениях, полученных в телескопических каналах, используются, в частности, следующие алгоритмы:

1. Отражение и вычитание. Этот метод заключается в вычитании отражённого, например, по вертикали, изображения из исходного изображения Солнца. В результате вычитания проявятся ошибки вертикальной центровки в виде темной (отрицательные значения) и светлой (положительные значения) верхнего и нижнего краев диска. Чем больше сдвиг центра диска относительно центра кадра, тем больше сумма абсолютных величин этого разностного изображения. Точно таким же способом можно найти центр изображения по горизонтали. Для повышения точности производится по крайней мере два повтора процедуры, поскольку при первом проходе, например, по горизонтали, неточность вертикальной центровки может значительно исказить результат. После грубой центровки выполняется более точная, при которой на изображение накладывается маска, исключая вклад деталей вдали от края диска. Ограничение этого метода – изображение должно быть достаточно симметричным относительно вертикальной и горизонтальной осей.
2. Центрирование с помощью кросс-корреляционной функции. Если в изображении хорошо просматривается солнечный диск (как в канале 304 \AA), но непросто выделить область вне диска, используется кросс-корреляция с модельным диском: вычисляется коэффициент корреляции между центрируемым изображением и модельным диском, сдвигая модель шаг за шагом, и, когда коэффициент корреляции принимает максимальное значение, модельный диск оказывается в точном положении, которое занимает наблюдаемое Солнце (Ханаока, Шибасаки, 1994).

3.2 Обработка наземных наблюдений с Универсальным спектрофотометром НИИ КраО

Остановимся на обработке изображений диска Солнца в линии HeI 10830 \AA , получаемых на УСФ с фотоумножителем в качестве приемника излучения.

Первый этап обработки – учет погрешностей, вносимых неравномерным ведением телескопа и изменением яркости в течение записи изображения. При пространственном разрешении $9.8''$ пиксел запись полного диска Солнца представляет из себя массив из 204 сканов по 204 точки в каждом скане. Время записи полного диска около 20 минут.

Из-за неравномерности ведения телескопа изображение Солнца получается в виде некоторой вытянутой фигуры. В процессе обработки эта фигура аппроксимируется эллипсом, который затем преобразуется в окружность с радиусом, равным полусумме осей эллипса. Как правило, разность длин полуосей эллипса составляет $3 - 5$ пиксел.

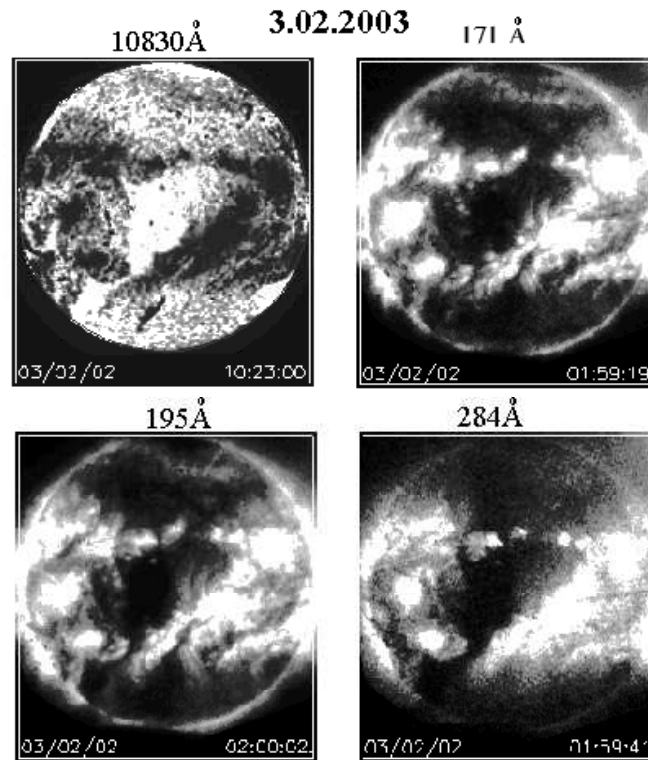


Рис. 1. Изображения Солнца в линиях 10830, 171, 195, 284 Å

Второй этап – учет потемнения изображения Солнца к краю диска. Одновременно с этим устраняется в линейном приближении изменение яркости диска из-за изменения прозрачности земной атмосферы за время записи. Этот эффект заметен в утренние часы, когда высота Солнца над горизонтом быстро меняется.

Потемнение диска Солнца к краю меняется с длиной волны (λ). Обычно оно представляется в виде многочлена 3-ей степени от r со своими коэффициентами для каждой длины волны λ , где r – расстояние точки от центра диска в долях радиуса. Учет потемнения состоит в делении интенсивностей каждого пиксела на значение функции потемнения на том же расстоянии от центра диска, что и данный пиксел. В линии HeI 10830 Å потемнение учитывалось с помощью аппроксимирующей функции, приведенной Макаровой, Харитоновым и др. (1991).

Затем проводится нормирование путем деления яркости всех точек изображения на яркость, соответствующую абсциссе максимума гистограммы по яркости. Это приводит к тому, что яркость невозмущенных областей Солнца на всех изображениях равна 1. В составе разработанного программного пакета имеются процедуры, обеспечивающие различные преобразования изображений, требуемые для их анализа и сопоставления с данными других спектральных диапазонов; построение синоптических карт; процедуры фотометрического анализа изображений.

Например, при совмещении изображений, полученных аппаратурой СПИРИТ, с изображениями Солнца в линии 10830 Å выполняются операции вычитания фона, зеркального отражения, сдвига начала координат и приведения к одинаковому угловому масштабу.

Результат такой обработки приведен на рис. 1. На нем представлены наблюдения в один и тот же день в линиях 171, 195, 284 и 10830 Å.

4 Трехмерное моделирование магнитного поля

В предлагаемой серии работ наблюдения солнечных образований сравниваются с магнитным полем, наблюдаемом на уровне фотосферы в обсерватории Китт Пик (<ftp://140.252.1.21>) и рассчитанным для различных высот в атмосфере Солнца.

4.1 Общая теория. Методика, применяемая в ИСЗФ

В качестве исходной физической модели, используемой для расчета магнитного поля, принимается модель potential field-source surface (PFSS) (Шаттен, Вилкоккс и др., 1966; Альтшулер, Ньюкирк, 1969). В области между фотосферой ($r = R_0$) и поверхностью источника ($r = R_s \equiv 2.5 R_0$) магнитное поле представляется сферическим разложением магнитного потенциала

$$\Psi(r, \theta, \phi) = R \sum_{l=1}^N \sum_{m=-l}^l c_l^m f_l(r) P_l^{|m|}(\cos\theta) e^{im\phi}; \quad (1)$$

$$f_l(r) = \frac{1}{(R_s/R)^{2l+1}} [(R_s/R)^{2l+1} (r/R)^{-l-1} - (r/R)^l]; \quad (2)$$

где N – главный индекс разложения, варьируемый в зависимости от используемого в анализе пространственного разрешения магнитного поля; (r, θ, ϕ) – переменные выбранной сферической системы координат; $P_l^m(\cos\theta)$ – функции Лежандра. Задание коэффициентов c_l^m разложения (1) полностью описывает некоторую конфигурацию магнитного поля. Нахождение разложения (1), удовлетворяющего на фотосфере определенному граничному распределению магнитного поля, является основной частью задачи экстраполяции коронального магнитного поля.

В настоящей работе используются три типа задания граничных условий, соответствующих трем крайним задачам Лапласа: задание фотосферного распределения радиальной компоненты магнитного поля $B_r(R, \theta, \phi)$, задание «синоптической», т.е. измеренной вблизи центрального меридиана Солнца, компоненты магнитного поля по лучу зрения $B_l(R, \theta, \phi)$, где $B_l = B_r \sin\theta + B_\theta \cos\theta$, и задание компоненты поля по лучу зрения на момент измерения $B_d(R, \theta, \phi)$.

Первая крайняя задача является классической задачей Неймана. В этом случае нахождение коэффициентов c_l^m сводится к известным простым поверхностным интегралам произведений $B_r(R, \theta, \phi)$ со сферическими функциями. Использование этого типа граничных условий, получаемых непосредственно по данным «продольных» (т.е. по лучу зрения) $B_l(R, \theta, \phi)$ или $B_d(R, \theta, \phi)$ магнитных измерений, является не вполне корректным, поскольку требует дополнительного предположения о радиальности полного магнитного вектора на всей солнечной поверхности. При такой постановке задачи разложение (1) позволяет нам вернуться к задаваемому распределению $B_r(R, \theta, \phi)$, но не к измеряемому распределению продольной компоненты. Тем не менее, для получения крупномасштабной структуры по данным магнитных наблюдений низкого пространственного разрешения в линии 5250.2 \AA используют приближение радиальности. Это приближение обосновывается тем, что уровень наблюдения находится на высотах, где потенциальное приближение магнитного поля неприемлемо, т.е. выше этого слоя еще существуют токи. Согласно гипотезе Ванг и Шилли (1992) этот токовый слой организует зонтичную (CANOPY) структуру магнитного поля (силовые линии концентрируются в тонких радиально ориентированных трубках, которые очень быстро расширяются в диапазоне высот порядка 100 – 200 километров). Предполагая далее (в приближении бесконечно тонкого токового слоя), что радиальная составляющая поля непрерывна, можно использовать данные наблюдений для решения первой краевой задачи. В данной работе используются магнитные измерения высокого разрешения Китт-Пик на длине волны 8688 \AA , соответствующей высотам, на которых поле можно считать свободным от токов (потенциальным). Поэтому магнитные данные должны рассматриваться в этом случае как компоненты вдоль луча зрения. Первую крайнюю задачу мы используем только как вспомогательную в общей схеме экстраполяции магнитного поля.

Вторая постановка краевой задачи традиционно применяется для восстановления магнитных полей по синоптическим картам (или синоптическим магнитограммам). Еще раз подчеркнем, что в

данном случае компонента поля B_i направлена по лучу зрения наблюдателя в момент пересечения точкой измерения центрального меридиана. Эта краевая задача применяется здесь тоже как вспомогательная для задания информации на невидимой стороне Солнца с целью уменьшения искажений, связанных с краевыми эффектами. Расчет коэффициентов проводится с помощью известного метода, подробно описанного в работе Хоексема (1984).

Проводимые нами расчеты распределения радиальной компоненты поля на различных высотах основываются на решении краевой задачи третьего типа. Решение этой задачи проводится в несколько этапов.

а) В сферической системе координат с осью z , направленной вдоль луча зрения для выбираемой ежедневной магнитограммы, формируется распределение $B_d(R, \Theta, \phi)$. Видимая полусфера ($0 \leq \Theta < \pi/2$) на равномерной Θ, ϕ сетке полностью заполняется интерполированными значениями магнитных измерений в картинной плоскости ежедневной магнитограммы. Вторая полусфера ($\pi/2 \leq \Theta \leq \pi$) заполняется рассчитываемым распределением $B_d(R, \Theta, \phi)$ из синоптической магнитограммы каррингтоновского оборота, включающего в себя момент измерения обрабатываемой ежедневной магнитограммы. Для получения B_d -распределения на обратной стороне Солнца проводится “ B_i -восстановление” магнитного поля по синоптической карте в обычной гелиографической системе координат (находится разложение (1), 2-я краевая задача). Затем, по найденному магнитному потенциалу (1) проводится расчет сеточных значений $B_d(R, \Theta, \phi)$ на обратной стороне.

б) По заданному полному распределению $B_d(R, \Theta, \phi)$ решается 3-я краевая задача и рассчитывается сеточное распределение радиальной компоненты $B_r(R, \Theta, \phi)$ в гелиографической системе координат.

в) Решается 1-я краевая задача на компоненту $B_r(R, \Theta, \phi)$ и находится окончательное разложение магнитного потенциала в гелиографической системе координат.

д) Найденное окончательное разложение магнитного потенциала (1) используется для расчета радиальной компоненты магнитного поля на нужной высоте.

Со строгим математическим обоснованием третьей краевой задачи и более подробными деталями метода ее решения можно ознакомиться в работе Руденко (2001). В частности, в этой работе показано, что при условии задания на поверхности Солнца распределения B_d компоненты магнитного поля, отвечающей постоянно по всей поверхности выбранному направлению, краевая задача Лапласа имеет единственное решение.

В качестве примера на рис. 2 приведено изображение участка Солнца в линии HeI 10830 Å с наложенной картой магнитного поля на уровне фотосферы (высота 0 км).

4.2 Методика расчетов магнитного поля, применяемая в ИЗМИРАН

Методическая основа расчетов, проводимых в ИЗМИРАН та же, что и в Станфорде (Ванг, Шилли, 1992) и в Иркутске (Руденко, 2001). Основное отличие состоит в том, что при нахождении решения применяется метод наименьших квадратов, а не метод ортогональных функций. Это существенно улучшает согласие с наблюдениями на низких высотах при малом числе используемых гармоник (до 10), но при повышении числа гармоник требует значительных затрат машинного времени. В настоящей работе нами приводятся только расчеты выполненные на основе синоптических Станфордских карт <http://sun.stanford.edu/~wso/wso.html>, то есть во второй краевой задаче, пользуясь терминологией раздела 4.1. Нами проведено специальное исследование расчетов в приближениях радиального и продольного поля при разных гипотезах относительно расположения поверхности источника. Оказалось, что все приближения дают сходные результаты. Поэтому для общей оценки ситуации оказалось вполне возможным использовать «классическое» приближение на основе синоптических карт, полученных в обсерватории Джона Вилкокса в Станфорде. Более сложной является проблема временного и пространственного разрешения. Рентгеновские и оптические данные получают с разрешением несколько секунд дуги ежедневно или несколько раз в день. Магнитные данные Китт Пик (<ftp://140.252.1.21/>) имеют разрешение около 2 секунд дуги и получают в линии 8688 Å. Станфордские данные имеют пространственное разрешение 3 минуты дуги, наблюдаются

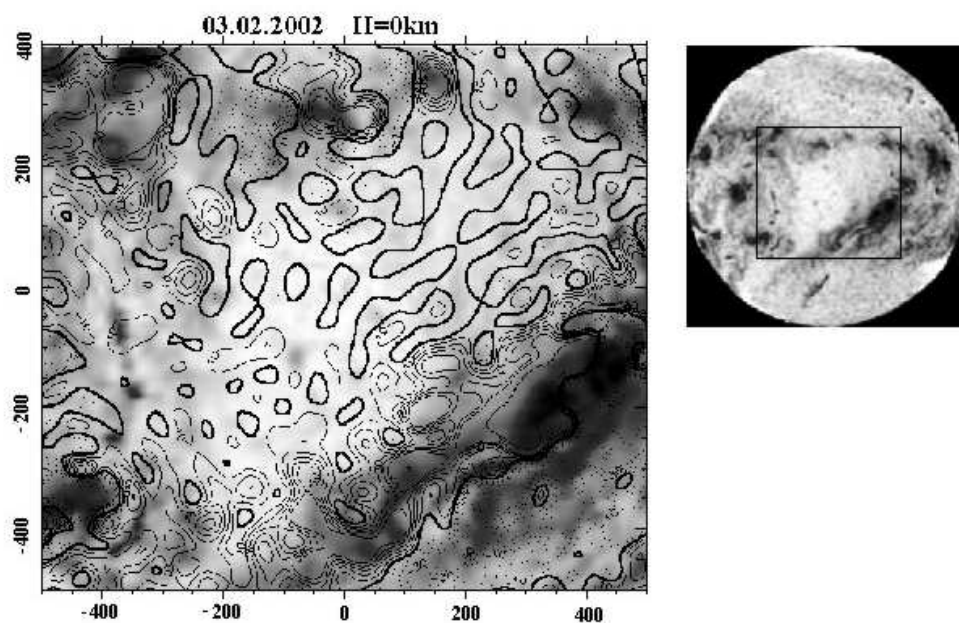


Рис. 2. Слева – изображение участка Солнца в линии HeI 10830 3.02.2002 с наложенной картой магнитного поля на уровне фотосферы (высота 0 км); справа – изображение всего Солнца в линии HeI 10830 3.02.2002

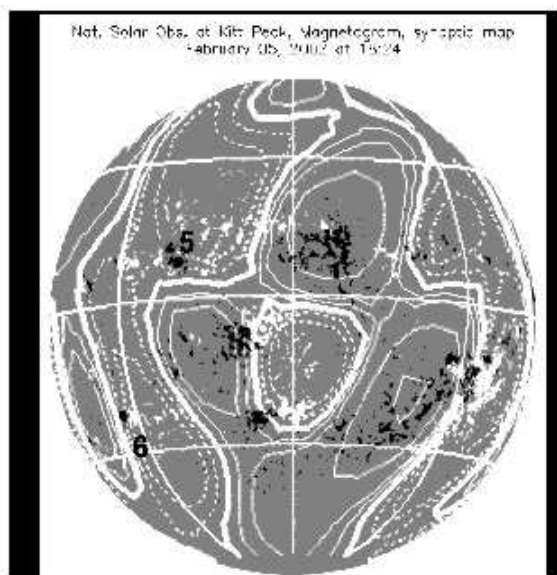


Рис. 3. Карта магнитного поля, полученная в Китт Пик с высоким разрешением, на которую наложена карта изолиний продольного магнитного поля, вычисленная по Станфордской синоптической карте

в линии 5250.2 \AA и поступают в анализ в виде синоптических карт. Наконец, еще более важным является разрешение рассчитанных карт, которое зависит от числа учитываемых гармоник.

Оказалось, однако, что эти ограничения не так существенны при оценке общей структуры магнитного поля. На рис. 3 показана карта магнитного поля, полученная в Китт Пик с высоким разрешением (<ftp://140.252.1.21/>), на которую наложена карта изолиний продольного магнитного поля, вычисленная по Станфордской синоптической карте (<http://sun.stanford.edu/wso/wso.html>) по 10 гармоникам.

Видно, что обе системы согласуются довольно хорошо. Двумя важными исключениями являются области, отмеченные цифрами 5 и 6. Здесь за время, прошедшее между составлением синоптической карты в Станфорде и моментом наблюдения в Китт Пик (5 февраля 2002 года в 18 часов 24 минуты), произошли изменения, в частности, в области точки 5 возникло большое униполярное пятно северной полярности.

Разработанная в ИЗМИРАН программа (Обридко, Харшиладзе и др., 1994; Могилевский, Обридко и др., 1999; Ванг, Ву и др., 1998; Обридко, Фомичев и др., 2000; Обридко, Харшиладзе и др., 1996) доведена до пользовательского уровня и позволяет указанием курсора на экране дисплея за несколько секунд проводить следующие операции:

1. Построение карт в прямоугольной развертке или сфере. Эти карты могут быть построены для радиальной, тангенциальной, меридиональной и широтной составляющих. По желанию пользователя может быть построена и карта продольной составляющей, как вычисленная для любой высоты по гармоническим коэффициентам, так и для поверхности фотосферы непосредственно по исходным наблюдательным данным без пересчета. В центр карты может быть поставлен меридиан любой даты с точностью до минут времени.
2. Вид сферы из любой точки пространства (то есть сферу можно развернуть так, чтобы смотреть на нее не только с Земли, но и, например с полюса).
3. Расчеты выполняются для любого уровня от поверхности фотосферы до поверхности источника. Подбор градаций изолиний может проводиться автоматически или из специального файла.
4. Для каждого оборота вычисляется наклон гелиосферного токового слоя.
5. На каждую карту могут быть нанесены также данные геомагнитного индекса – аа, данные межпланетной среды (магнитное поле B и любые его компоненты, скорость и плотность солнечного ветра), положение вспышек, пятен, волокон и корональных выбросов массы.
6. На каждом уровне может быть вычислена карта скалярного потенциала.
7. Построение схемы силовых линий. Эти схемы строятся в двух вариантах. В первом – отслеживаются все силовые линии, исходящие из фиксированного уровня. Во втором – отслеживаются вниз все силовые линии с поверхности источника (по постановке задачи все такие линии считаются открытыми). Такие рисунки часто называют “волосатые шары” (haired sphere) “волосоиды”. Мы называем такие схемы “волосоид-ап” и “волосоид-даун”. При этом можно ограничить набор силовых линий по напряженности сверху и снизу или изменить начальную сетку концов силовых линий. На произвольно выбранной сфере можно нанести основания открытых и закрытых силовых линий. В данном случае открытыми считаются силовые линии, выходящие за пределы поверхности источника. Пример такого построения дан на рис. 4.
8. Нанесение основания открытых и закрытых силовых линий на произвольно выбранную сферу. Открытыми считаются силовые линии, выходящие за пределы поверхности источника.
9. Построение карт сепаратрисного параметра и сепаратрис. Под сепаратрисным параметром понимается величина отношения расстояния между концами двух начинающихся из соседних точек силовых линий к расстоянию между начальными точками. Области, где этот параметр достигает максимума, называются сепаратрисами, поскольку разделяют изолированные системы полей. Очевидно, что могут быть сепаратрисы разного уровня. Так, полюс Солнца дает самую мощную сепаратрисную точку, поскольку силовые линии, исходящие из него уходят, очень далеко. Сепаратрисные линии часто располагаются на границах корональных дыр, пересекают сложные активные области. Сепаратрисной точкой может быть ядро крупного униполярного пятна. На рис. 5 показана карта сепаратрисного параметра в прямоугольной развертке. Меридиан 180°

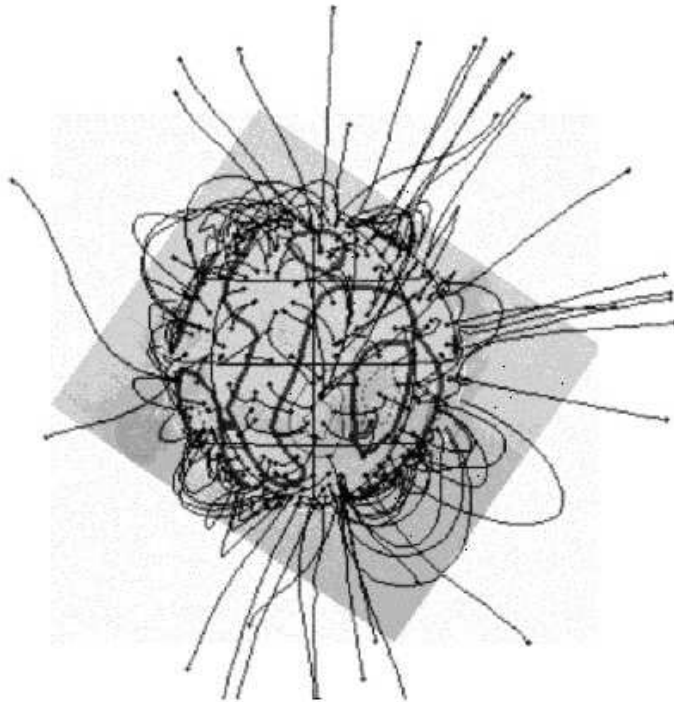


Рис. 4. Пример построения “волосоида”

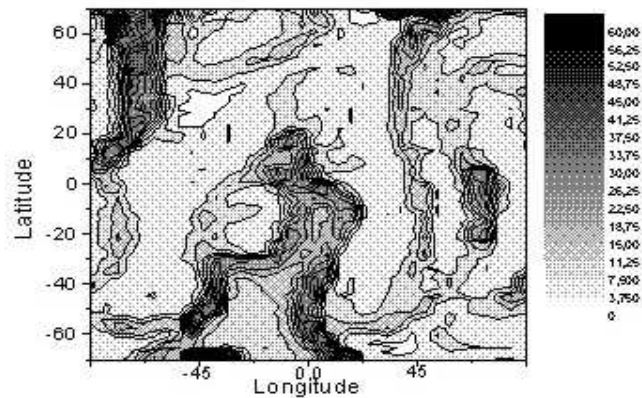


Рис. 5. Карта сепаратрисного параметра

соответствует центральному меридиану Солнца 3 февраля 2002 года в 15 часов UT, восточный лимб соответствует отметке 90° , западный – 180° , широта 0 соответствует экватору Солнца. Виден очень мощный экстремум сепаратрисного параметра вблизи границ корональной дыры.

Более тонкие сопоставления отдельных объектов и деталей на Солнце выполняются уже с помощью расчетов, опирающихся на наблюдения с высоким разрешением.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 02-02-17272 и НШ-477.2003.2., IN-

TAS 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

- Альтшулер, Ньюкирк (Altschuler M.D., and Newkirk G.) // *Solar Phys.* 1969. V. 9. P. 131.
- 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.*
- Ванг, Шилли (Wang Y.M., Sheeley N.R., Jr.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310.
- Гречнев, Лесовой и др. (Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya. et al.) // *Solar Phys.* 2003. (в печати).
- Гречнев, Накаджима (Grechnev V.V., Nakajima H.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 566. P. 539.
- Житник, Бугаенко и др. (Zhitnik I.A., Bugaenko O.I. et al.) // *ESA SP-506. 2002. V. 2. P. 915.*
- Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. // *Поток солнечного излучения. 1991. С. 353.*
- Могилевский Э.И., Обридко В.Н., Шилова Н.С. // *Астрон. журнал. 1999. V. 79. N. 4. P. 299.*
- Обридко, Фомичев и др. (Obridko V., Fomichev V., Kharshiladze A.F., Zhitnik I., Slemzin V., Wu S.T., Ding J., and Hathaway D.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 2000. V. 18. N. 6. P. 819.
- Обридко В.Н., Харшиладзе А.Ф., Шельтинг Б.Д. // В: *Сб. Магнитные поля Солнца и гелиосейсмология. СПб. ФТИ. 1994.*
- Ораевский В.Н., Собельман И.И. // *Письма в Астрон. журнал. 2002. Т. 28. N. 6. С. 457.*
- Руденко (Rudenko G.V.) // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 5.
- Обридко, Харшиладзе и др. (Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Shelting B.D.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 1996. V. 11. P. 65.
- Собельман И.И., Житник И.А., Игнатъев А.П. и др. // *Письма в Астрон. журнал. 2003. (в печати).*
- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2000. Т. 96. С. 194.*
- Ханаока, Шибасаки (Hanaoka Y., Shibasaki K., Nishio M. et al.) // *Nobeyama Radio Observatory Report. 1994. N. 357. P. 35.*
- Черток И.М., Гречнев В.В. // *Астрон. журнал. 2003. Т. 80. N. 2. С. 162.*
- Хоексема (Hoecksema J.T.) // *Structure and evolution of the large scale solar and heliospheric magnetic fields. 1984. Ph. D. Diss. Stahford Univ.*
- Шаттен, Вилкоккс и др. (Schatten K.H., Wilcox J.W., and Ness N.F.) // *Solar Phys.* 1966. V. 6. P. 442.