

УДК 523.987

Движения и магнитные поля в области волокон

Р.К. Жигалкин¹, В.Г. Руденко², Н.Н. Степанян¹, В.Г. Файнштейн², Н.И. Штерцер¹

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

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

Поступила в редакцию 14 февраля 2008 г.

Аннотация. На основе разработанной методики совместного использования данных о магнитных полях и яркостях волокон и корональных дыр на разных высотах в атмосфере Солнца, а также о скоростях в фотосфере, получены следующие результаты:

- Для каналов волокон в виде ярких полосок, часто окружающих волокна при наблюдении в линии HeI 1083 нм, характерен подъем вещества.
- Каналы волокон, наблюдаемые одновременно в H-альфа и в HeI 1083 нм, отличаются размерами, эмиссионными характеристиками и другими параметрами. Сделан вывод, что одновременное исследование каналов волокон в двух спектральных диапазонах позволит продвинуться в понимании физики их формирования и эволюции.
- Большинство волокон, наблюдаемых в линии HeI 1083 нм, состоит из темных узлов с разным распределением скоростей в них. Предложена возможная интерпретация этих узлов.
- Высота распространения мелкомасштабного магнитного поля в окрестности отдельных темных узлов волокон в атмосфере Солнца варьируется от 3 до 20 тысяч км.
- Нулевая поверхность, разделяющая крупномасштабные структуры магнитного поля в короне и рассчитанная в потенциальном приближении, меняет с высотой наклон к поверхности Солнца и смещается за время одних-двух суток.
- Наблюдавшееся возникновение волокна в КД сопровождалось существенным изменением магнитного поля в области КД на высотах от 0 до 30 тыс. километров, вплоть до изменения преимущественного знака поля по всей площади КД. Высказано предположение, что это происходит на стадии исчезновения дыры.

MOTIONS AND MAGNETIC FIELDS IN FILAMENTS, *by R.K. Zhigalkin, V.G. Rudenko, N.N. Stepanian, V.G. Fainshtein, N.I. Shtertser.* On the basis of developed method of the joint use of data about magnetic fields and brightness of filaments and coronal holes at different altitudes in the solar atmosphere as well as about velocities in the photosphere we obtained the following results:

- The upward motion of matter is typical for filament channels in the form of bright stripes which envelope filaments during the observation in the HeI 1083 nm line.
- Filament channels observed simultaneously in H-alpha and in HeI 1083 nm differ in size, emission characteristics and other parameters. It was concluded that the simultaneous investigation of filament channels in two spectral ranges allows us to make progress in understanding physics of their formation and evolution.
- Most filaments observed in the HeI 1083 nm line consist of dark nodes with different velocity distribution in them. A possible interpretation of these nodes is suggested.

- The altitude of distribution of the small-scale magnetic field in the vicinity of individual dark nodes of filaments in the solar atmosphere varies within 3 to 20 thousand kilometers.
- The zero surface separating the large-scale magnetic field structures in corona and calculated in potential approximation changes inclination to the solar surface with an altitude and shifts over 1-2 days.
- Observed emergence of a filament in the coronal hole (CH) was accompanied by the significant magnetic field variation in the CH region at the altitude within 0 to 30 square kilometers up to the change of predominant sign of the field over the whole area of CH. There is an assumption that it occurs at the stage of the CH extinction.

Ключевые слова: Солнце, волокна, корональные дыры, магнитные поля, движения

1 Наблюдения

Мы начинаем серию работ по комплексному исследованию волокон и корональных дыр с использованием одновременных наблюдений в линиях HeI 1083 нм (далее линия HeI), H-альфа и в корональных линиях, а также данных о магнитных полях и движениях. Представляемая первая часть этой работы носит в основном методический характер. Ее цель – разработать методику совместного использования разнородных данных, определить интервалы количественных изменений изучаемых параметров и по возможности выявить особенности в связях изучаемых параметров волокон и корональных дыр.

В работе были использованы следующие материалы:

- Изображения Солнца в линии HeI, полученные на телескопе БСТ-2 НИИ “КрАО” с Универсальным спектрофотометром.
- Карты радиальной компоненты магнитного поля с величиной индукции от 5 до 150 Гс, построенные в ИСЗФ СО РАН по данным обсерватории Китт Пик.
- Данные MDI SOHO из сети ИНТЕРНЕТ.
- H-альфа наблюдения мировой сети, взятые из баз данных в сети ИНТЕРНЕТ.
- Наблюдения в линии 171 Å на SOHO.

Остановимся кратко на методах получения этих данных и их совместной обработке.

Изображения Солнца в линии HeI 1083 нм получены на телескопе БСТ-2 путем сканирования изображения Солнца на щели спектрографа. На выходе спектрографа интенсивность в центре линии HeI записывалась с помощью Универсального спектрофотометра с инфракрасным ФЭУ в качестве приемника излучения, системой усиления и персональным компьютером. Описание прибора в работе Степанян и др.(2000). Пространственное разрешение при получении изображений полного диска Солнца составляет 10'' x 10''. При получении изображений участков диска – 2'' x 2''. Входная щель спектрофотометра вырезает участок спектра шириной 0.12 Å. Время записи полного диска 15–20 минут. На рис. 1 приведен пример изображения Солнца в линии HeI, полученного по описанной выше схеме.

Для анализа использовалось магнитное поле, рассчитанное над поверхностью Солнца в рамках модели “потенциальное поле – поверхность источника” на основе Vd-технологии (Руденко, 2001). Ее суть заключается в том, что при решении задачи Лапласа для потенциала магнитного поля в качестве граничного условия на всей видимой поверхности Солнца используется “мгновенное” (усредненное лишь за время измерения магнитограммы) распределение измеряемой продольной компоненты магнитного поля фотосферы (Vd-компоненты). При этом используются магнитограммы высокого пространственного разрешения. До сентября 2003 г. в основном это были магнитограммы, получаемые в Национальной солнечной обсерватории/Китт Пик – Kitt Peak (NSO). В данной работе

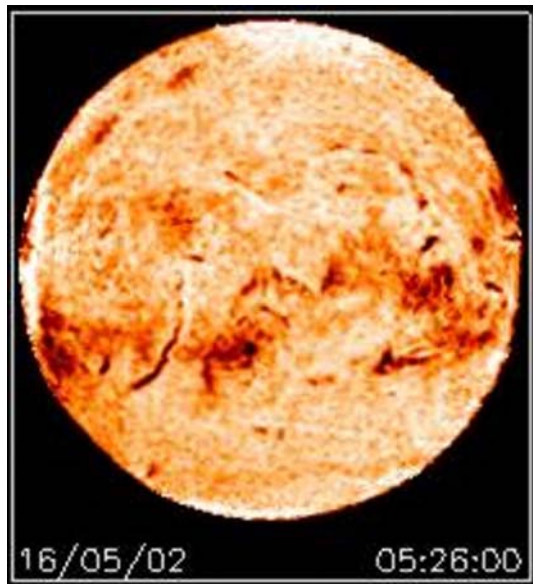


Рис. 1. Изображение Солнца в линии HeI 1083 нм, полученное с Универсальным спектрофотометром на телескопе ВСТ-2 НИИ “КрАО”

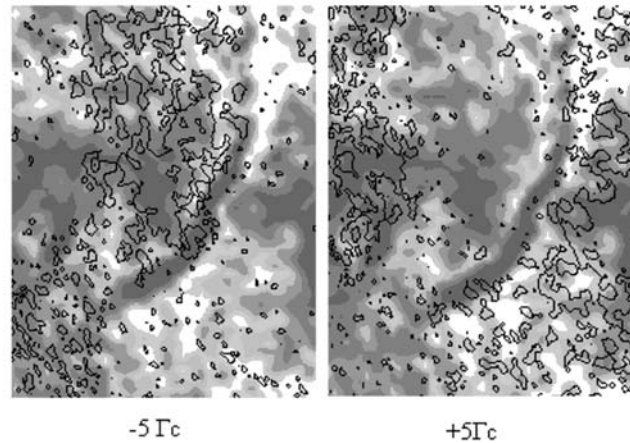


Рис. 2. Участок изображения Солнца в линии HeI с нанесенными на уровне измерения магнитного поля изолиниями $B_r = -5$ Гс и $+5$ Гс

расчеты проводились также с использованием магнитограмм SOHO/MDI. Этот метод позволяет получать “мгновенные” распределения магнитного поля над видимой поверхностью Солнца до поверхности источника. Радиус поверхности источника в данных расчетах поля $R_S = 2.5R_0$ (R_0 – радиус Солнца).

Для каждого дня наблюдений на изображение Солнца в линии HeI наносились распределения радиальной компоненты магнитного поля с учетом полярности поля. Положительная полярность (+) соответствует направлению от Солнца, отрицательная полярность (-) – к Солнцу. При этом учитывалась поправка координат из-за разных моментов наблюдений в HeI и измерений магнитных полей. Использовались данные с интервалом в 5 Гс от 0 до ± 100 Гс. На рис. 2 показан участок изображения в линии HeI с нанесенными изолиниями радиальной компоненты рассчитанного фотосферного магнитного поля B_r с величиной индукции -5 Гс и +5 Гс.

Кроме того, были рассчитаны положения нулевой линии (линии инверсии полярности) радиальной компоненты магнитного поля на высотах от 3 до 30 тысяч километров над уровнем измерения магнитных полей для нескольких дней наблюдений корональной дыры с возникшим в ней волоконном и одного протяженного волокна.

Лучевые скорости получены на приборе MDI SOHO. Коррекция скорости с учетом вращения Солнца проводилась по методике, описанной в работе Жигалкина (2007). На рис. 3 приведена карта лучевых скоростей на Солнце после учета вращения Солнца. На карте видна ячеистая структура и увеличение контраста с переходом от центра изображения Солнца к краям.

При дальнейшей обработке распределений скорости по солнечному диску из средней за час скорости в каждом исследуемом участке диска Солнца вычиталась средняя за час скорость по всему диску.

Изображения Солнца в линиях H-альфа и 171 Å, взятые из сети ИНТЕРНЕТ, приводились к размеру изображений в линии HeI. Пространственное разрешение этих изображений 1”–2”.

После того, как изображения всех видов были приведены к одному размеру, моменту наблюдений и системе координат, дальнейшая обработка проводилась с помощью многофункционального блока программ IDL, описанного в работе Степанян и др. (2000).

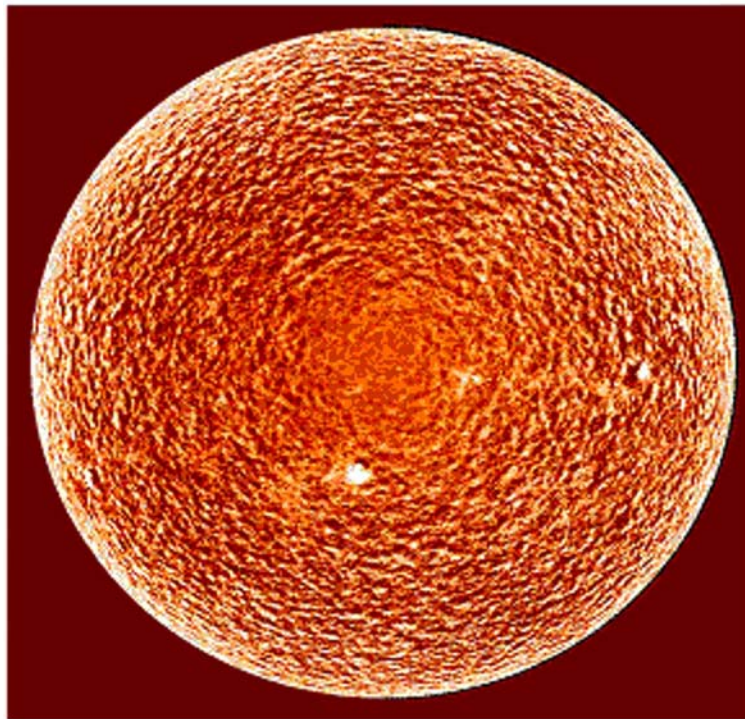


Рис. 3. Карта лучевых скоростей на Солнце, полученная на приборе MDI SOHO. Вращение Солнца учтено

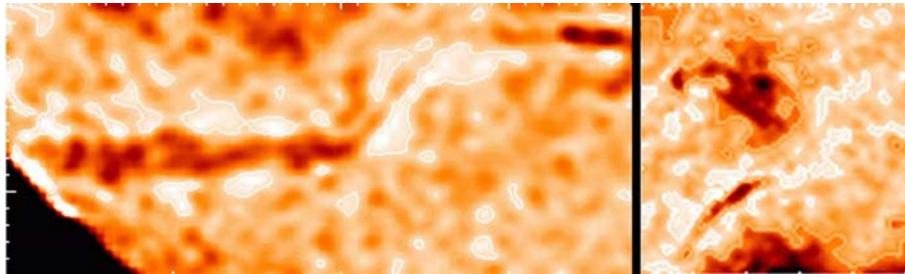


Рис. 4. Изображения двух участков Солнца в линии HeI 1083 нм с волокнами, окруженными яркими полосками – каналами волокон.

Отработка методики совместного анализа данных проводилась на материале наблюдений 10–26 мая 2002 г. Мы проследили судьбу 22 волокон по изображениям Солнца в линии HeI с наложенными на них наблюдениями магнитных полей и скоростей. Привлекались наблюдения в линиях 171 Å и H-альфа. В таблице приведен список этих волокон за все дни наблюдений с краткими примечаниями.

При наблюдениях в линии HeI все волокна можно грубо разделить на три класса по их связям с окружающими солнечными образованиями:

1. волокна, разделяющие структуры фоновых магнитных полей противоположных знаков;
2. волокна, связанные с активными областями (соединяющие активные области, кольцевые, сигмовидные и др.);
3. волокна, связанные с корональными дырами (расположенные целиком внутри КД, один конец волокна внутри КД или на границе, волокно пересекает КД).

Таблица 1. Волокна, наблюдаемые в линии HeI 10–26 мая 2002 г.

Дата №	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	22	23	24	26	Примечания
1		+	+	+	+	+									Сигмоидное
2	+	+	+	+	+	+	+								Протяженное EW
3	+	+	+	+	+	+	+	+							Возникло в КД
4	+	+	+	+	+	+	+								У-образное
5	+	+	+	+	+	+									Изогнутое
6	+	+	+	+	+	+									Изогнутое
7	+	+	+	+	+	+									На границе АО
8	+	+	+	+	+										Протяженное NS
9	+	+	+	+	+										Протяженное NS
10	+	+	+	+	+										Изогнутое
11	+	+	+	+	+										На границе АО
12	+			+	+	+	+	+	+						Протяженное NS
13				+	+	+	+	+	+						На границе АО
14						+	+	+	+						Короткое EW
15							+	+	+						Короткое NS
16							+	+	+	+	+	+	+		Протяженное NS
17										+	+	+	+		Протяженное EW
18										+	+				Протяженное NS
19											+	+	+	+	Протяженное EW
20												+	+	+	Короткое EW
21												+	+	+	Протяженное NS
22													+	+	Короткое NS

Большинство этих волокон видны и в линии H-альфа, но есть случаи, когда в линии HeI есть волокно, в H-альфа его нет.

2 Каналы волокон в линии HeI 1083 нм

Остановимся сначала на некоторых особенностях волокон по наблюдениям в линии HeI. Первое, что бросается в глаза – это яркие полосы, вытянутые вдоль волокон и наблюдающиеся вблизи большинства волокон (пример таких полосок на рис. 4). Известно, что такие полосы в линии HeI формируют каналы волокон (Харви и Гайзаускас, 1998) – структуры в солнечной атмосфере, в пределах которых располагаются волокна. Каналы могут не содержать волокон, но являются необходимым условием их возникновения. Такие каналы располагаются вдоль линий инверсии полярности фотосферного магнитного поля (Харви и Гайзаускас, 1998). Заметим, что свойства каналов, наблюдаемых в линии HeI, пока изучены довольно слабо, и проведение таких исследований является актуальной задачей.

Встречается нескольких видов ярких полосок в окрестности волокна. Иногда полосы видны с одной стороны от волокна, иногда с обеих сторон. Концы волокон вне активных областей часто окружены яркой областью. С развитием волокон вид полосок меняется. Яркие области у концов волокон иногда превращаются в корональные дыры. Яркость полосок в линии HeI такая же, как в корональных дырах, т. е. яркость излучения в них $I > 1.0I_{невом.}$ (Маланушенко, Степанян, 1996). Чаще всего в полосках на уровне измерения магнитного поля радиальная компонента поля B_r близка к 0. Это отражает упоминавшийся выше факт, что каналы волокон располагаются вдоль линий инверсии фотосферного магнитного поля. В среднем скорость вещества в области полосок на уровне измерения скорости инструментом SOHO/MDI направлена вверх. В то же время измерения скорости в самом волокне (монография Филлипова (2007)) дают сложную картину поля скоростей. В отдельных нитях, составляющих волокно, наблюдаются дви-

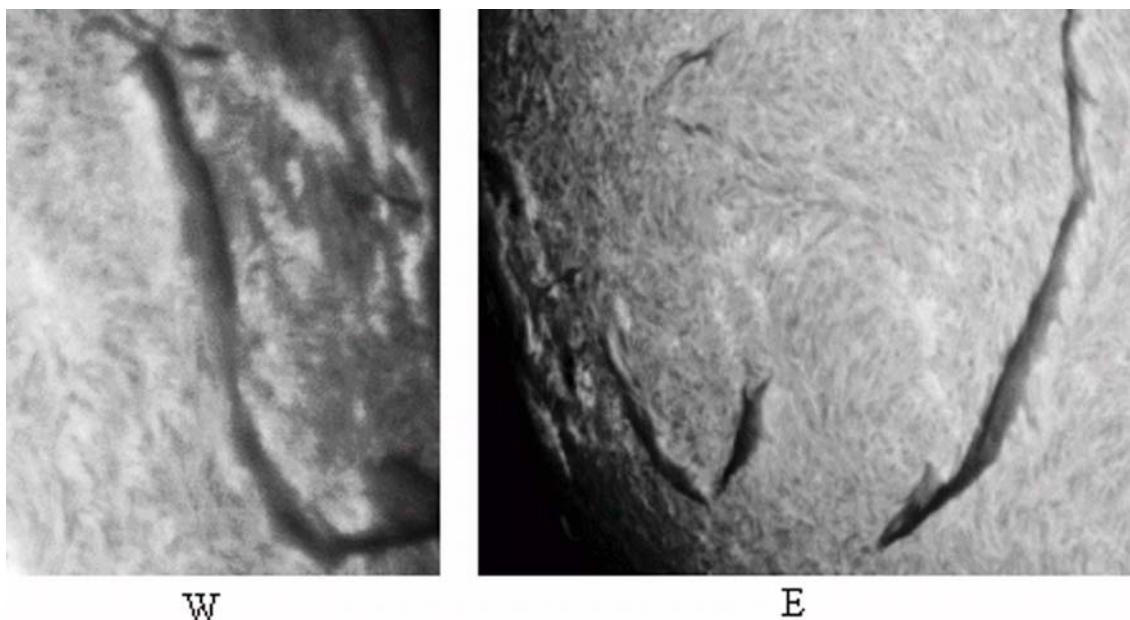


Рис. 5. Одно и то же волокно вблизи западного (W) и восточного (E) лимбов при наблюдении в линии Н-альфа

жения вверх, вниз и в горизонтальном направлениях. Наблюдаются также колебания скорости и даже вращательные движения.

Рассмотрим три протяженных вдоль меридиана спокойных волокна, разделяющих фоновые поля разного знака, и их связь с яркими полосками. Эти волокна имеют в таблице 1 номера 9, 12 и 16. При прохождении по диску характерным для них является изменение вида прилегающих к ним ярких полосок со временем.

Волокно № 9 с 12 по 14 мая находилось в западной полусфере. К нему с восточной стороны примыкает яркая полоска.

Волокно № 12 хорошо видно на диске с 13 по 20 мая. В первые дни наблюдений, когда волокно находилось на востоке, оно имело яркую полоску с западной стороны, в центре диска – с двух сторон, а в западной полусфере полоска примыкала к волокну с востока. Аналогичная картина наблюдается для волокна № 16 с 16 по 24 мая.

Этим данным можно дать следующую интерпретацию. Волокно является более плотным, чем канал волокна, и оптически толстым. Вследствие заметной радиальной протяженности волокно перекрывает свечение восточной части канала, когда оно находится к востоку от центрального меридиана, и западную часть – когда оно расположено к западу от центрального меридиана.

Обратимся к наблюдениям этих волокон в линии Н-альфа. При расположении волокон вблизи лимба около них видны яркие полоски: с запада, когда волокно в восточном полушарии, и с востока – в западном полушарии. В центре диска яркие полоски не видны. Картина аналогична той, что наблюдается в линии HeI (рис. 5).

Из приведенных иллюстраций следует, что ширина каналов волокон в Н-альфа меньше, чем в HeI. Оказывается, что существенно более широкими, чем в линии Н-альфа, каналы волокон наблюдаются также в коротковолновой части коронального излучения – в линиях крайнего ультрафиолета (Оланье, Шмидер, 2002). Отметим, что в Н-альфа наблюдениях яркость каналов волокон близка к яркости флоккул.

Напомним еще одно хорошо известное и, по-видимому, фундаментальное свойство каналов волокон, наиболее ярко проявляющееся при их наблюдениях в линии Н-альфа. Внутри каналов фиб-

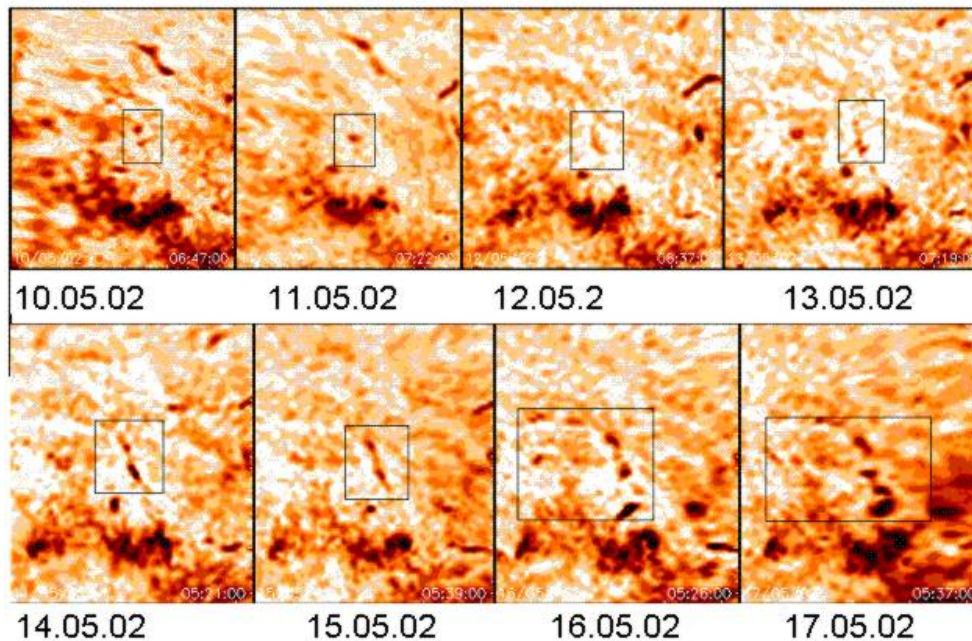


Рис. 6. Изменение со временем волокна, зарегистрированного в линии HeI, которое возникло в КД или в ее ближайшей окрестности. Изображение дано в гелиографических координатах

риллы располагаются практически вдоль нулевой линии магнитного поля (или линии инверсии полярности поля) и никогда их не пересекают (Мартин, 1998; Гайзаускас, 1998).

Итак, мы получили:

- По наблюдениям в линии HeI большинство волокон окружены яркими полосками – каналами волокон.
- Яркость каналов сопоставима с яркостью корональных дыр.
- Характер изменения каналов при смещении волокна с востока на запад свидетельствует о том, что каналы волокон перекрываются по лучу зрения волокном на востоке и на западе от центрального меридиана.
- Радиальная компонента фотосферного магнитного поля в каналах волокон имеет значение индукции (по модулю) ≤ 5 Гс. Это согласуется с тем, что каналы волокон располагаются вдоль нулевых линий фотосферного магнитного поля. В то же время нужно иметь в виду, что в каналах волокон при их наблюдениях в хромосфере и в нижней короне магнитное поле сильно не потенциальное (Мартин, 2007). По высоте каналы волокон оказываются довольно протяженными и, согласно (Оланье, Шмидер, 2002), проникающими в корону.
- В большинстве случаев в области каналов волокон на уровне измерения скорости прибором MDI наблюдается подъем вещества. В линии H-альфа подобные яркие полоски (каналы волокон) также видны около протяженных волокон, расположенных вдоль меридиана, и имеют яркость флоккул $\approx (1.10-1.15)I_{\text{невозм}}$.

Из вышесказанного следует также, что каналы волокон не являются такими известными структурами солнечной атмосферы, как флоккулы. Их отличает от флоккула не только соотношение яркости в H-альфа и в HeI, но и близкая к нулю в области канала напряженность радиальной компоненты магнитного поля на уровне фотосферы. Это согласуется с почти параллельным линии раздела полярности магнитного поля расположением фибрилл в каналах волокон. Во флоккулах же измеренное по лучу зрения магнитное поле больше 5 Гс.

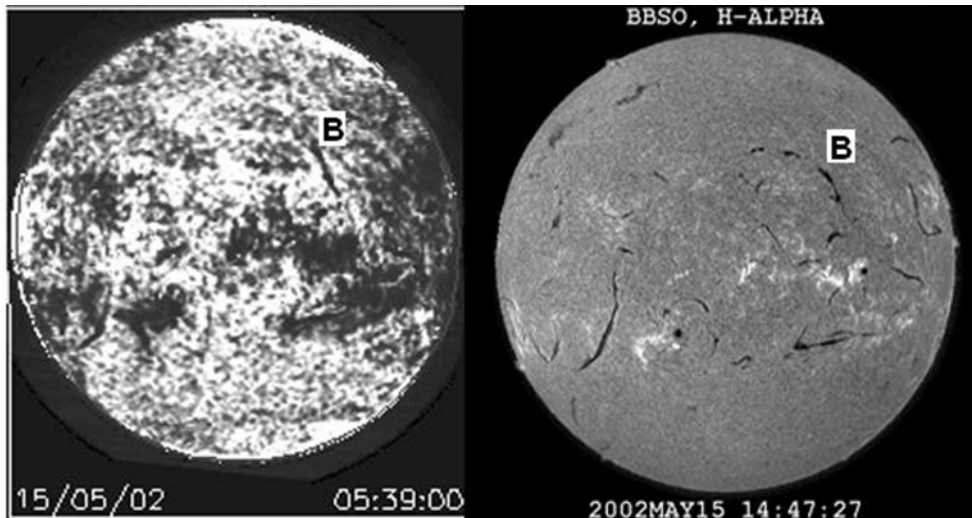


Рис. 7. Волокно № 3 (отмечено буквой “В”) по наблюдениям в линиях HeI 1083 нм и H-альфа 15.05.02 г.

3 Эволюция волокна, возникшего в корональной дыре

Рассмотрим подробнее волокно № 3 из таблицы, возникшее либо внутри корональной дыры (КД), либо в канале, примыкающем к северной границе КД. Его изменение в течение нескольких дней в линии HeI представлено в гелиографических координатах на рис. 6. На рис. 7 видно расположение этого волокна на диске Солнца 15.05.02.

10.05.02 в небольшой корональной дыре или рядом с ней видны две темные точки. 12.05.02 на их месте возникло небольшое волокно, которое выглядит как целиком расположенное в КД.

В последующие дни волокно растет за счет появления новых узлов и соединения их со старыми узлами. К 14.05.02 волокно подошло к северной границе КД и 15.05 соединилось со средней частью волокна № 2, лежащего за северной границей КД. В месте соединения произошло заметное изменение структуры волокон и наблюдалось опускание вещества.

На следующий день западная часть волокна № 2 разрушилась, а восточная соединилась в волокно № 3 вне КД и значительно усилилась. 17.05 волокно осталось в виде цепочки темных узлов. Примерно та же картина наблюдалась на изображениях Солнца в линии H-альфа. Для иллюстрации “похожести” волокна при его наблюдении в различных хромосферных линиях на рис. 7 показаны изображения Солнца 15.05.02 г. в линиях HeI (KpAO) и H-альфа (BBSO).

Узлы волокна, возникавшие в процессе описанных событий, представляли собой небольшие биполярные магнитные области, выход которых сопровождался изменением направлений движения вещества. В большинстве случаев на концах узлов направления движений противоположны.

Корональная дыра, в пределах которой развивалось волокно № 3, – это особая КД. Согласно работе Бугаенко и др. (2004) данная дыра характеризуется уменьшением ее площади SCH с высотой. Это следует из сравнения SCH-дыры, наблюдаемой в линии HeI, с площадью КД, регистрируемой в различных линиях крайнего ультрафиолета по данным инструмента SOHO/EIT. Эта дыра не является местом локализации оснований открытых линий магнитного поля, что характерно для “нормальных” дыр. Она также не является источником быстрого квазистационарного потока солнечного ветра на орбите Земли.

Для наблюдений с 12 по 16 мая, кроме распределения в области корональной дыры радиальной компоненты фотосферного магнитного поля (B_r), о чем говорилось в разделе Наблюдения, были рассчитаны положения нулевых линий (линий изменения полярности) мелкомасштабного магнитного поля на разных высотах в области этой КД. Расчеты проводились для высот 3, 5, 10, 15, 20 и 30 тысяч километров в предположении потенциального поля. На рис. 8 и 9 нулевые линии на этих

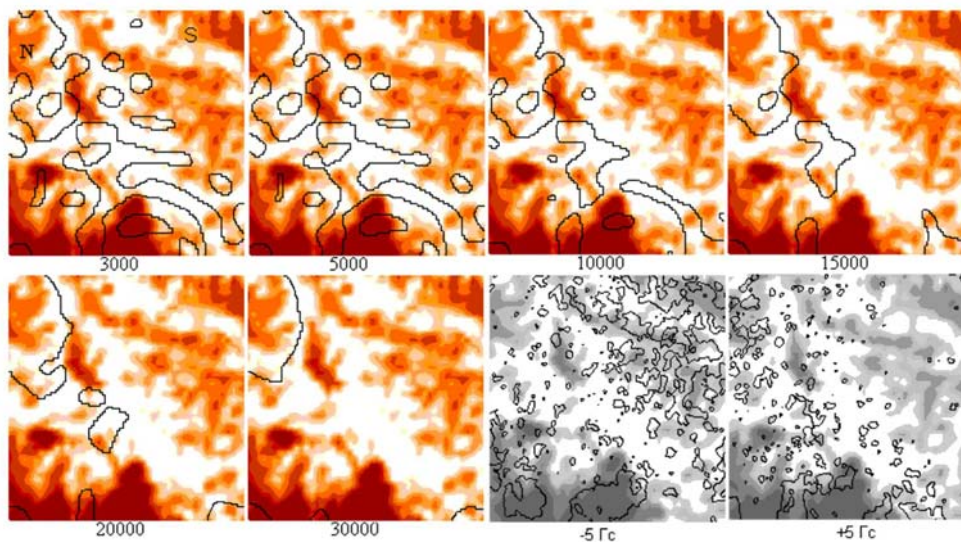


Рис. 8. Нулевые линии на высотах от 3000 до 30000 км, наложенные на изображение Солнца в линии HeI 12 мая 2002 г. Справа внизу – изолинии радиальной компоненты магнитного поля с напряженностью -5 Гс и +5 Гс на нулевой высоте

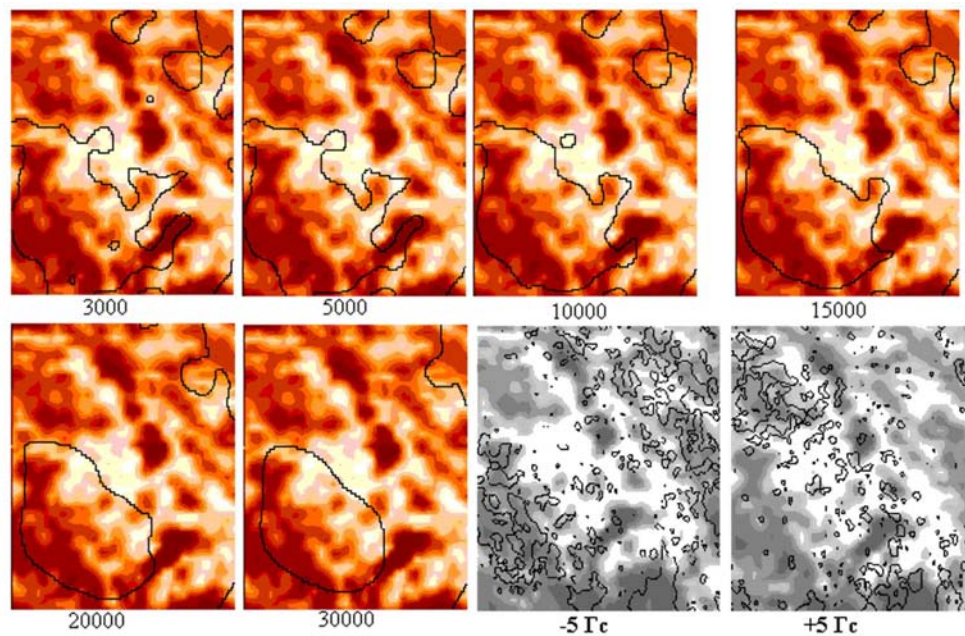


Рис. 9. То же, что на рис. 8, для 16 мая 2002 г.

уровнях наложены на исходные изображения КД в линии HeI для 12 и 16 мая. Два изображения в нижнем ряду справа – изолинии радиальной компоненты поля $B_r = -5$ Гс и $+5$ Гс на “нулевой” высоте – в месте измерения магнитного поля в фотосфере.

За рассматриваемый период характер магнитного поля в корональной дыре существенно менялся на всех высотах.

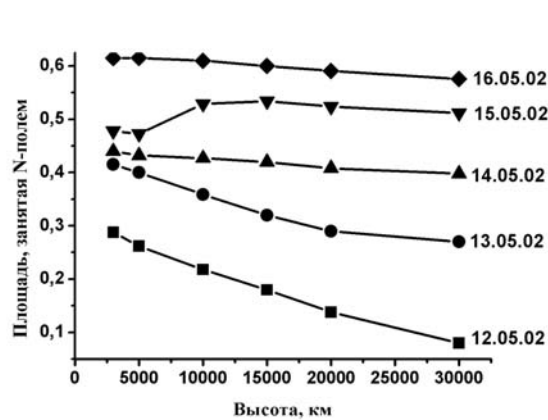


Рис. 10. Изменение с высотой доли выделенной площадки, занимаемой N-полем. Каждая кривая для одного дня наблюдений

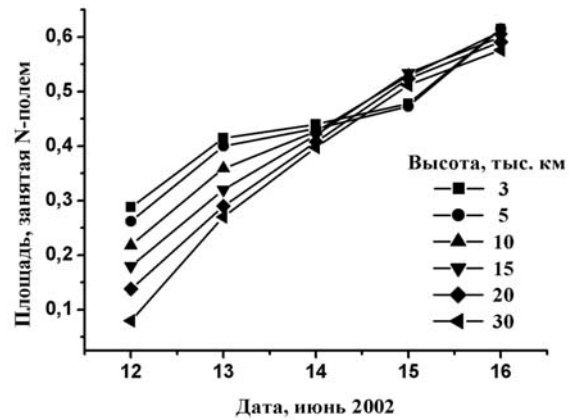


Рис. 11. Изменение со временем доли выделенной площадки, занимаемой N-полем. Каждая кривая для одной высоты

12 мая вся КД покрыта вкраплениями N-поля в фоновое S-поле. Нулевая линия на высотах до 10000 км несколько раз пересекает волокно. Это свидетельствует о том, что волокно состоит из нескольких биполярных образований, большинство из которых простирается до высот 10000 км, а некоторые и до 20000 км. Только на 30000 км над волокном наблюдается S-поле без вкраплений противоположной полярности. Аналогично ведут себя вкрапления N-поля над всей КД. Число вкраплений уменьшается с высотой, и на высоте 30000 км N-поле видно только на северо-восточной границе КД.

Для всех дней наблюдений и всего набора высот были определены отношения площадей, занятых N-полем, к общей площади выделенных площадок даны на рис. 10, 11.

На рис. 10 видно, что доля площади, занимаемой N-полем, на всех высотах растет, и к 16 мая занимает более половины площади выделенных участков и практически всю КД (см. также рис. 8). Соотношение площадей N-поля на разных высотах (рис. 11) день ото дня меняется. Если 12 мая на высоте 3000 км площадь N-поля почти в 4 раза больше, чем на высоте 30000 км, то 16 мая доля N-поля практически одинакова для всех высот.

Итак, мы получили, что за 5 дней жизни КД менялось соотношение площадей, занятых N и S магнитными полями на разных высотах, практически приведшее к смене преимущественного знака поля на высотах от 0 до 30000 км. Это, по-видимому, отражает наблюдаемую эволюцию КД. Выше уже отмечалось, что начиная с 13.05.02 г. эта дыра становится особенной: ее площадь уменьшается с высотой, она не является источником быстрого потока солнечного ветра. В то же время 12.05.02 г. и ранее эта дыра была еще “стандартной”: ее площадь возрастала с высотой. В это время по смыслу в дыре должна преобладать определенная полярность магнитного поля – в данном случае отрицательная полярность, т. к. “стандартная” КД является преимущественно областью открытых линий поля. Преобладание в области данной КД поля отрицательной полярности до 13.05.02 г. подтверждает подборка синоптических карт радиального магнитного поля, рассчитанного методом Руденко (2001) в области его измерения (рис. 12). В то же время видно, что в окрестности центра дыры область, занимаемая отрицательной полярностью поля, уменьшается между 10 и 17 мая. Визуальный анализ яркости вокруг центра КД показывает, что площадь области повышенной яркости на изображениях Солнца в линии HeI 10830 Å несколько уменьшается со временем с 13 до 17 мая 2002 г. Частично это отражает уменьшение яркости дыры, возникающее при ее продвижении к лимбу. Но в основном это связано с разрушением КД, ее исчезновением. Косвенным подтверждением этого является отсутствие этой КД 10.06.02 г. через один солнечный оборот начиная с 13.05.02 г. Заметим, что по измерениям в линии крайнего ультрафиолета в нижней короне площадь дыры со временем

уменьшается и 16.05.02 г. дыра практически исчезает. В то же время волокно, развившееся в области этой дыры, наблюдается и 10.06.02 г.

Таким образом, мы приходим к выводу, что уменьшение доли площади КД, занимаемой полем с преимущественной полярностью, в данном случае отражает разрушение КД, а развитие волокна в области дыры является либо следствием этого разрушения, либо триггером для его начала.

Что касается резкого уменьшения 12 и 13 мая 2002 г. относительной площади, занимаемой полем положительной полярности, с высотой, то это можно объяснить следующим образом. В указанный период рассматриваемая КД только начала терять свойства, характерные для “классической” КД. А значит, на больших пространственных масштабах она продолжала оставаться областью преимущественно с униполярным магнитным полем. Поэтому на рассмотренных относительно больших высотах (больше 10000 км) доля площади с полем с неосновной (положительной) полярностью мала. Но внизу, вблизи высоты, на которой магнитное поле измеряется, мелкомасштабное поле имеет как отрицательную, так и положительную полярность и доля площади с положительной полярностью увеличивается.

При анализе лучевых скоростей в области этой КД и волокна в ней было найдено, что распределение областей подъема и опускания менялось ото дня ко дню.

Таким образом, наблюдения показали, что процесс возникновения волокна в области КД затронул все слои атмосферы Солнца. В фотосфере изменились магнитные поля, распределение скоростей. В хромосфере выходили новые магнитные потоки, менялась яркость КД и высотная стратификация магнитного поля в ней. На всех высотах от 0 до 30000 км существенно менялось распределение крупномасштабных магнитных полей.

4 Магнитные поля и движения в области волокон

Если рассматривать крупномасштабную картину распределения структур фоновых магнитных полей и расположения волокон относительно них, то можно увидеть следующие особенности.

Для волокон, разделяющих фоновые магнитные поля разного знака, напряженность магнитного поля B_{θ} на уровне фотосферы под волокном большей частью не равна нулю и преобладает мелкомасштабное поле одного знака. Величина B_{θ} под волокнами этого типа порядка (5–10) Гс. Часто наблюдаются стабильные протяженные волокна, у которых магнитные поля на концах волокна отличаются по знаку, а в центральной зоне напряженность нулевая или близкая к нулю (Мартин, 1998). Это было видно на рис. 2.

Довольно частым явлением в эволюции волокна бывает разветвление волокна, переход в V-образную форму. При этом меняется связь волокна с магнитными полями и вид ярких полосок возле них.

Картина распределения фотосферных движений вещества в области волокон весьма пестрая.

При детальном рассмотрении волокон в HeI оказывается, что в большинстве случаев волокна представляют собой цепочку отдельных темных узлов. Сравнение структуры волокон с распределением радиальной компоненты фотосферного магнитного поля позволяет, на первый взгляд, сделать вывод, что каждый узел – это маленькая петлеобразная структура (или маленький жгут), “ноги” которой упираются в участки магнитного поля с противоположной полярностью (биполярная структура). Но, возможно, такая интерпретация природы темных узлов является упрощенной или даже неточной. Сравнение волокон, наблюдаемых в линии HeI с этими же волокнами, наблюдаемыми в линии H-альфа, позволяет сделать вывод, что, по крайней мере в некоторых случаях, темные уплотнения – это места в волокне, откуда отходят своеобразные ответвления – зубцы (barbs). Об этих структурах волокна см., например, Мартин (1998). Эти ответвления уходят из волокна в хромосферу и, как считают некоторые исследователи (Мартин, Эколс, 1994), своими концами оказываются в областях магнитного поля с неосновной для соответствующего участка (паразитной) полярностью поля. Наблюдения волокон нередко интерпретируются таким образом, что волокно представляет собой совокупность петлеобразных сегментов. Согласно модели Мартен, Цваан (2001), такой вид волокна возникает с участием магнитного пересоединения некоторых исходных магнитных жгутов в короне.

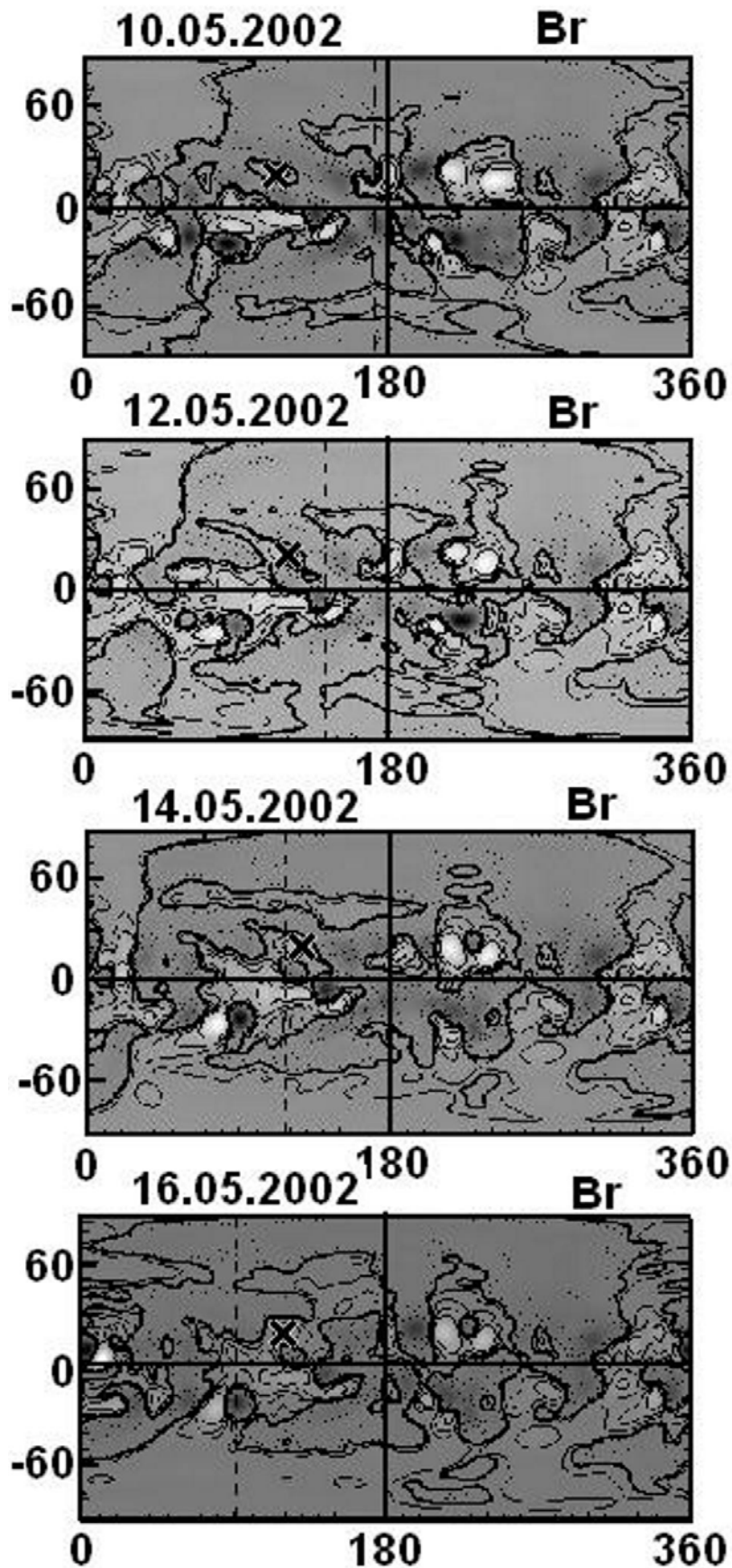


Рис. 12. Подборка синоптических карт, иллюстрирующая изменение со временем распределения крупномасштабного магнитного поля в области корональной дыры: 10.05.2002, 12.05.2002, 14.05.2002, 16.05.2002. Крестиками указаны геометрические центры дыры

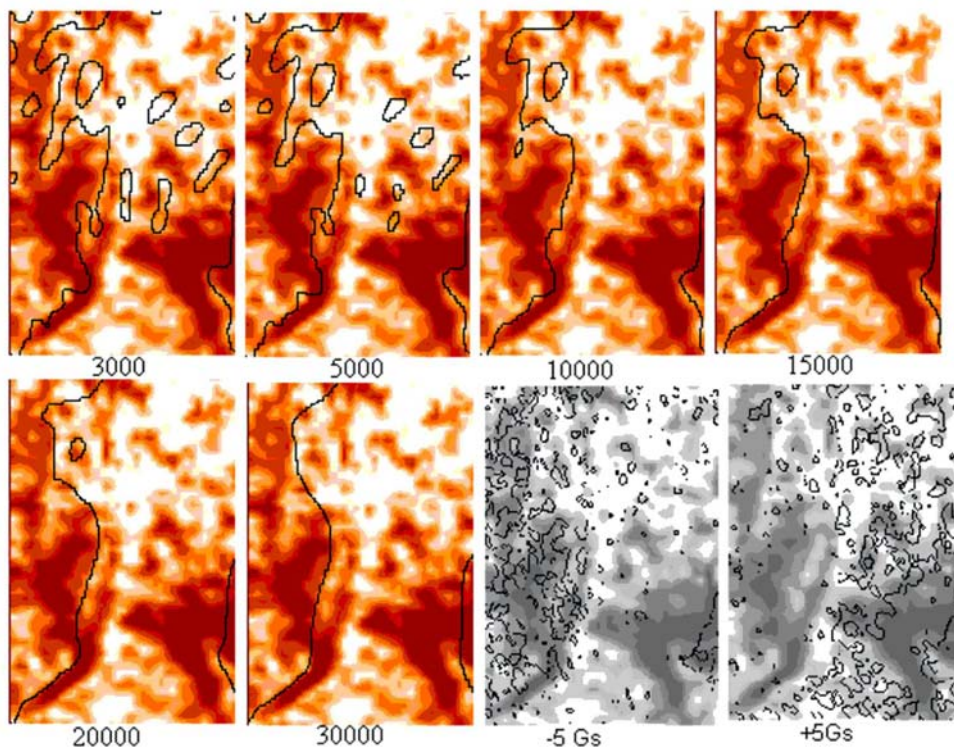


Рис. 13. Положение нулевой линии на разных высотах в области волокна 15.05.2002 г.

Рассмотрим подробнее изменение магнитного поля с высотой в области протяженного волокна, лежащего первоначально вблизи границы структур фоновых полей противоположного знака (волокно № 12 из таблицы 1). С 15 по 16 мая волокно вытягивалось на север и становилось более компактным. Затем оно разделилось на отдельные узлы, а 20 мая осталась только средняя часть волокна. С востока к волокну примыкал флоккул, с запада от волокна наблюдалась яркая полоска, на севере переходящая в небольшую корональную дыру.

Аналогично тому, как это было сделано для КД, на изображения волокна накладывались рассчитанные нулевые линии магнитного поля на разных высотах от 3 до 30 тысяч километров. Анализировались наблюдения волокна в течение пяти дней с 15 по 18 и 20 мая. На рис. 13 приведены данные для 15 мая, а на рис. 14 для 20 мая.

Для развития магнитного поля в области волокна с 15 по 20 мая характерны два процесса: смещение нулевой линии, разделяющей крупномасштабные структуры фонового поля вблизи волокна, и возникновение и исчезновение темных узлов, составляющих волокно. Эти процессы по-разному проходили в северной и южной частях волокна.

15 мая на нулевой высоте (высота, на которой измерялось магнитное поле) волокно и флоккул лежат в S-поле. Но уже на высоте 3000 км нулевая линия проходит между ними, и над волокном находится N-поле. Такое положение нулевой линии сохраняется до высот 30000 км.

Со временем ситуация постепенно менялась. Нулевая линия сдвигалась на запад, и 17 мая южная часть волокна с высоты 10000 км уже находилась в S-поле. К 20 мая южная часть волокна исчезла, а северная часть отошла от флоккула. Помимо возможного изгиба нулевой поверхности с высотой, наблюдается и реальное ее смещение в течение двух-трех суток.

Такое изменение относительного положения нулевой линии и волокна может быть объяснено следующим образом. Здесь, по-видимому, накладывается два эффекта. С одной стороны, нулевая поверхность, которая проходит через нулевую фотосферную линию и во всех точках которой по-

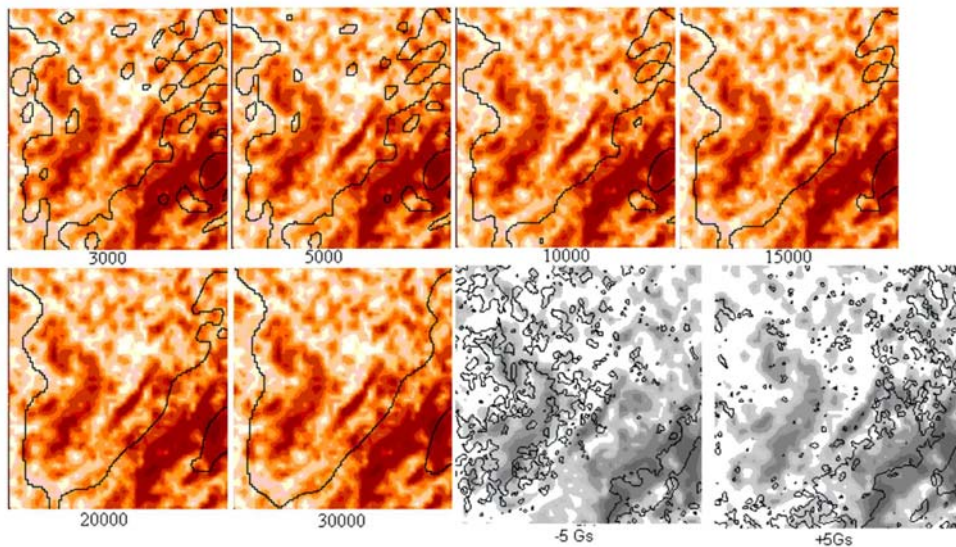


Рис. 14. То же, что и на рис. 13, для 20.05.2002 г.

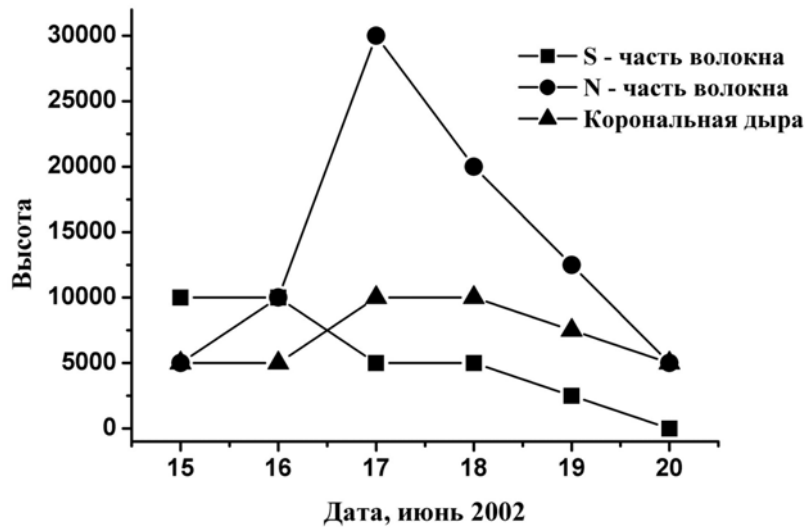


Рис. 15. Высоты (км), до которых распространялись магнитные поля биполярных структур в двух частях волокна и в корональной дыре с 15 по 20 мая 2002 г.

лученная из расчетов в потенциальном приближении компонента $B_r = 0$, не является радиальной. Именно на такой поверхности оказываются рассчитанные в данной работе нулевые линии магнитного поля на различных высотах и показанные на рис. 13 и 14. При этом нулевая поверхность не просто отклоняется от радиального направления, но и искривляется вблизи поверхности Солнца, в том числе по долготе (Еселевич и др., 1999). Это приводит к тому, что проекция нулевой линии с различных высот на изображение Солнца в линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ может оказаться, например, восточнее волокна, как на рис. 13.

Этот эффект может работать и 20.05.02 г. Но в этом случае наблюдаемый результат может быть обусловлен еще одним явлением. Известно, что плоскость (или более сложная поверхность) в ко-

торой находится волокно, для большинства волокон не радиальная. Это приводит к тому, что при вращении Солнца видимая толщина волокна становится минимальной не на центральном меридиане, а, как правило, к востоку от него (Д'Азамбужа и др., 1948). Отсюда следует, что расположенное примерно вдоль меридиана волокно наклонено к западу. В работе Загнетко и др. (2005) показано, что поверхность, вблизи которой в основном концентрируется вещество волокна, близка к нулевой поверхности. Это еще один аргумент в пользу того, что нулевая поверхность не является радиальной. Но в этом случае эта поверхность отклоняется от радиального направления к западу. 15.05.02 г. волокно находилось к востоку от центрального меридиана и, судя по рис. 13, вблизи долготы, на которой волокно достигает минимальной толщины. В этом случае с ростом высоты проекция нулевой линии на диск Солнца должна оказаться вблизи проекции волокна, лишь ненамного смещаясь от нее к западу. Но, по-видимому, из-за преобладания первого эффекта проекции нулевых линий с различных высот на изображение Солнца обусловили смещение этих проекций к востоку от волокна.

20.05.02 г. волокно оказалось западнее центрального меридиана. В этом случае определяющим оказался, по-видимому, второй эффект. Мы видим, что проекции нулевых линий на изображение Солнца в линии HeI оказались заметно западнее, чем волокно.

О высотах, до которых распространяются биполярные структуры, можно судить по извилистости нулевой линии, проходящей по волокну, и вкраплениям поля противоположного знака в рассматриваемой области (см. рис. 13 и 14). Результаты такого анализа представлены на рис. 15 отдельно для двух частей волокна и КД, в которой находилась северная часть волокна.

Как видим, высоты проникновения магнитного поля существенно меняются день ото дня и различны для разных точек одного волокна.

Что касается расположения волокна на границе между крупномасштабными структурами фонового поля, то и здесь картина очень изменчива.

5 Заключение

Сопоставление данных нескольких видов, рассмотренных нами, показало, что принятый нами подход позволяет комплексно исследовать процессы, происходящие вблизи волокон на разных уровнях в атмосфере Солнца от фотосферы до короны.

Подтверждение этого – согласие многих наших выводов с полученными ранее результатами других авторов. Это повышает достоверность новых результатов, полученных в данной работе: морфология возникновения волокна в КД и выхода из нее, подробная картина изменения крупномасштабного поля на разных высотах над КД, изменение высотной стратификации магнитного поля в области протяженного волокна.

На основе использованных нами данных получены следующие результаты:

- Для каналов волокон в виде ярких полосок, часто окружающих волокна при наблюдении в линии HeI 1083 нм, характерен подъем вещества.
- Каналы волокон, наблюдаемые одновременно в H-альфа и в HeI, отличаются размерами, эмиссионными характеристиками и другими параметрами. Сделан вывод, что одновременное исследование каналов волокон в двух спектральных диапазонах позволит продвинуться в понимании физики их формирования и эволюции.
- Большинство волокон, наблюдаемых в линии HeI 1083 нм, состоит из темных узлов с разным распределением скоростей в них. Предложена возможная интерпретация этих узлов.
- Высота распространения мелкомасштабного магнитного поля в окрестности отдельных темных узлов волокон в атмосфере Солнца варьируется от 3 до 20 тысяч км.
- Нулевая поверхность, разделяющая крупномасштабные структуры магнитного поля в короне и рассчитанная в потенциальном приближении, меняет с высотой наклон к поверхности Солнца и смещается за время одних-двух суток.
- Наблюдавшееся возникновение волокна в КД сопровождалось существенным изменением магнитного поля в области КД на высотах от 0 до 30 тыс. километров, вплоть до изменения знака

поля по всей площади КД. Высказано предположение, что это происходит на стадии исчезновения дыры.

Литература

- Гайзаускас (Gaizauskas V.) // IAU Colloquium 167. ASP Conferences Series. / Eds Webb D., Rust D., and Schmieder B. 1998. V. 150. P. 257.
- Д'Азамбужа и др. (d'Azambuja M. et al.) // Ann. Obs. Paris. Medudon. 1948. V. 6. Fasc. VII.
- Еселевич и др. (Eselevich V.G., Fainshtein V.G., and Rudenko G.V.) // Solar Phys. 1999. V. 188. P. 277.
- Жигалкин Р.К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 104. (в печати).
- Житник И.А., Жигалкин Р.К., Игнатьев А.П. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 128.
- Загнетко А.М., Филипов Б.П., Ден О.Г. // Астрон. журн. 2005. Т. 82. С. 474.
- Маланушенко, Степанян (Malanushenko E.V., Stepanian N.N.) // Proc. Solar and Heliospheric plasma Physics. Thessaloniki. Greece. 1996. P. 18
- Мартен, Цваан (Marten Ps., Zwaan C.) // Astrophys. J. 2001. V. 558. P. 872.
- Мартин (Martin S.) // Solar Phys. 1998. V. 182 P. 107.
- Мартин, Эколс (Martin S.F., Echols C.R.) // Solar Surface Magnetism. / Eds Rutten R.J., Schrijver C.J. Kluwer Academic Publ. Dordrecht. Holland. 1994. P. 339.
- Оланье, Шмидер (Aulanier G., Schmieder B.) // Astron. Astrophys. 2002. V. 386. P. 1106.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В., Елизаров А.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2000. Т. 96. С. 194.
- Филипов Б.П. // Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит. 2007.
- Харви и Гайзаускас (Harvey K.L., and Gaizauskas V.) // IAU Colloquium 167. ASP Conferences Series. / Eds Webb D., Rust D., and Schmieder B. 1998. V. 150. P. 269.