

УДК 523.94

Волокна различных типов и особенности окружающего их магнитного поля

В.Г. Файнштейн¹, Н.Н. Степанян², Н.И. Штерцер², Г.В. Руденко¹, Я.И. Егоров¹

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Россия, 664033

²ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
natalystepanyan@gmail.com

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Мы анализировали магнитное поле, связанное с протяженными и кольцевыми волокнами. Использовались наблюдения пяти волокон в хромосферных и корональных линиях. Для протяженных волокон показано, что участки утончения и уменьшения потемнения волокон располагаются внутри и в окрестности биполярных участков магнитного поля, через которое волокна проходят. Для протяженных волокон оценена также средняя высота участков основного тела волокна и средний угол наклона этих участков к радиальному из центра Солнца направлению. Показано, что кольцевые волокна – более сложные и менее устойчивые образования, чем протяженные волокна. За время существования кольцевых волокон в них заметно меняются структурные образования и фотосферное магнитное поле, связанное с ними.

FILAMENTS OF VARIOUS TYPES AND PECULIARITIES OF THEIR SURROUNDING MAGNETIC FIELD, *by V.G. Fainshtein, N.N. Stepanian, N.I. Shtertser, G.V. Rudenko, Ya.I. Egorov.* We have analyzed the magnetic field associated with extended and ring filaments. The observations of five filaments in chromospheric and coronal lines were used. For extended filaments it was shown that areas of attenuation and decrease in darkening of filaments are located inside and in the neighborhood of bipolar regions of the magnetic field the filaments pass across. For extended filaments we estimated the average height of regions of the filament’s main body and the average inclination angle of these regions to the radial from the center of the Sun direction. The ring filaments were shown to be more complex and less stable formations than the extended filaments. Over the time of existence of ring filaments the structural formations and photospheric magnetic field associated with them noticeably change.

Ключевые слова: Солнце, волокна, магнитное поле

1 Введение

Солнечные волокна (протуберанцы) – магнитоплазменные структуры, плотность и температура вещества в которых характерны для этих параметров в хромосфере, но при этом такие структуры проникают достаточно высоко в корону, где оказываются окруженными горячей разреженной корональной плазмой (см. обзоры Мартин, 1998; Паренти, 2014). Термин “волокно” используется для обозначения этих структур, наблюдаемых на солнечном диске, термин “проту-

Волокна различных типов...

беранец” – для таких структур, наблюдаемых над лимбом Солнца. Волокна наблюдаются в различных спектральных диапазонах излучения хромосферы, переходной области и короны и, прежде всего, в таких спектральных линиях и каналах как H_{α} , HeII 304 Å, HeI 10830 Å, FeIX 171 Å и некоторых других. Выделяют волокна в спокойных областях Солнца, а также волокна активных областей. В среднем волокна первого типа более длинные, более высокие и более долгоживущие, чем волокна второго типа. Наблюдения с высоким пространственным разрешением показывают, что в волокнах существует тонкая структура: тело волокна состоит из тонких нитей или петель (Маккей и др., 2010).

Особенностью расположения волокон относительно структур окружающего магнитного поля является вытянутость основного тела волокна вдоль нейтральной линии – линии раздела полярности (ЛРП) продольной компоненты фотосферного поля. Волокна располагаются в *каналах волокон* – в особых областях солнечной атмосферы или в особых магнитных структурах вокруг ЛРП. Считается, что каналы волокон простираются вплоть до короны. Обычно каналы волокон выделяются по расположению хромосферных фибрилл, которые оказываются вытянутыми практически вдоль расположенной ниже ЛРП с обеих сторон от нее.

При наблюдении волокон под определенными углами становятся видными отростки или зубцы (*barbs* в англоязычной литературе), выходящие из волокна (Мартин, 1998). Они простираются в хромосферу и, возможно, доходят до фотосферы. Магнитное поле этих зубцов оказывается под углом к локальной нормали к поверхности Солнца. Есть основание считать, что концы зубцов при их проекции на фотосферу находятся в участках поля с полярностью, противоположной преимущественной полярности поля, прилегающего к ЛРП в данном месте (Паренти, 2014).

Измерения показали, что волокна содержат магнитное поле (см. обзоры Палетоу, 2008; Маккей и др., 2010). Характерные значения поля в спокойных волокнах (протуберанцах) составляют 8–10 Гс, хотя в локализованных участках могут достигать несколько десятков Гс. В некоторых участках протуберанцев активных областей интенсивность поля достигает 600–700 Гс. В основном теле волокна поле направлено почти горизонтально и лежит в плоскости, которая формирует угол примерно 35° с осью волокна (Трухильо Буэно и др., 2002). В то же время следует отметить, что различные измерения магнитного поля в волокнах (протуберанцах) дают несогласующиеся значения интенсивности поля, распределения поля в пределах тела волокна и направления поля, что означает необходимость продолжения измерения поля в волокнах (Паренти, 2014).

И, наконец, приведем характерные значения некоторых параметров плазмы для ядра волокна – наиболее плотной, холодной и оптически толстой для излучения в различных спектральных диапазонах области волокна. Концентрация электронов составляет 10^9 – 10^{11} см⁻³, температура ядра варьируется в диапазоне 7500° – 9000° , газовое давление примерно равно 0.02–1 дин см⁻².

Таким образом, за многие десятилетия исследования солнечных волокон получен большой объем информации об их свойствах. Тем не менее, этой информации оказывается недостаточно для ответа на многие вопросы, касающиеся волокон (Паренти, 2014). В частности, нет исчерпывающей информации, касающейся особенностей окружающего волокна магнитного поля, в том числе для волокон различной конфигурации. В данной работе приведены результаты исследования особенностей магнитного поля, окружающего протяженные и так называемые “кольцевые” волокна.

2 Наблюдательный материал и методы анализа данных

Были использованы наблюдения Солнца в линиях H_{α} (BBSO, Концельхое, КрАО), HeI 1083 нм (КрАО), Fe XII 19.3 нм (SDO/AIA) и измерения магнитного поля инструментами SOLIS и SDO/HMI. Анализировались 6 волокон двух типов: протянувшиеся вдоль долготы или мериди-

ана (протяженные волокна) и, согласно используемой нами терминологии, кольцевые, ось которых сильно искривлена и может напоминать часть окружности или эллипса (см. ниже таблицу 1, взятую из работы Барановского и др., 2016).

Таблица 1. Анализируемые волокна

№ п/п	Даты наблюдений	Тип волокна	Характер изменений
1	24 авг. – 1 сент. 2015 г.	протяженное вдоль меридиана	За время прохождения по диску почти не меняло форму и яркость
2	24 апр. – 5 мая 2015 г.	протяженное вдоль параллели	За время прохождения по диску мало меняло форму и яркость
3	19 янв. – 28 янв. 2015 г.	кольцевое	Северная часть кольца менялась по яркости, временами исчезала. Два дня внутри имелись флоккулы
4	10 нояб. – 18 нояб. 2015 г.	кольцевое	Большое кольцо $20^\circ \times 20^\circ$ с флоккулом и АО внутри. Она слабеет и со временем исчезает. Наблюдаются разрывы волокна в разных местах
5	16 июня – 25 июня 2016 г.	кольцевое	Небольшое волокно, слабое в H_α , к которому с двух сторон примыкают корональные дыры. В канале 19.3 нм внутри области, ограниченной волокном, существует яркая спиральная структура. В H_α яркость часто меняется.

Для определения характеристик магнитного поля вблизи волокон использовался оригинальный пакет программ, позволяющий рассчитывать характеристики магнитного поля над видимой поверхностью Солнца в промежутке от фотосферы (точнее, от места измерения магнитного поля) до поверхности источника – сферы радиусом $R = 2.5 R_\odot$ с центром в центре Солнца (R_\odot – радиус Солнца). Такие расчеты проводились в рамках потенциального приближения с использованием Vd-технологии (Руденко, 2001), а в качестве исходных данных использовались измерения магнитного поля одним из телескопов SOLIS. Этот пакет позволяет определить в расчетной области ($R = R_\odot - 2.5 R_\odot$) три компоненты и модуль магнитной индукции, а также построить силовые линии магнитного поля и определить различные параметры силовых линий на различных удалениях от поверхности Солнца. В число таких параметров входят значения компонент и величины магнитной индукции в разных точках силовых линий, длина участков петли от фотосферы до любой точки петли, высота вершины петли вдоль радиального направления, асимметрия петли и др.

Предложен метод нахождения средней высоты основного тела волокна, связанный с нахождением высот вершин силовых линий поля, наиболее близко охватывающих волокно, т. е. примыкающих к внешней границе волокна. Высота вершины каждой такой петли принималась за высоту волокна вдоль радиального направления из центра Солнца. Это означает, что под высотой волокна мы понимаем расстояние от точки волокна до поверхности Солнца вдоль отрезка, лежащего в плоскости волокна, которая может быть наклонена к радиальному направлению. Угол наклона волокна (или плоскости волокна) находится из соотношения, связывающего высоту волокна и отклонение вершины волокна (или участка волокна) по широте от связанной с волокном нейтральной линии (см. раздел Результаты). Для волокон, расположенных преимущественно вдоль меридиана, угол наклона волокна может находиться также путем определения долготы, при которой волокно вдоль луча зрения становилось наиболее узким (см. Филиппов, 2007).

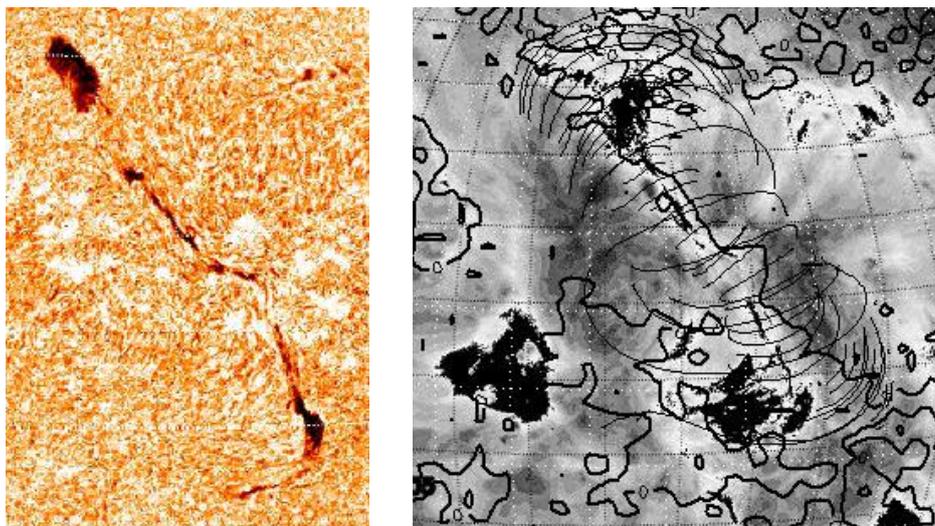


Рис. 1. Протяженное волокно № 1, зарегистрированное 28.08.2015. На левой панели показан фрагмент изображения Солнца в линии с волокном в виде темной структуры. На правой панели дано изображение волокна по наблюдениям Солнца в линии 19.3 нм, а также показаны ЛРП продольной компоненты поля и силовые линии, охватывающие волокно

3 Результаты

Для всех анализируемых волокон по данным SOLIS были построены карты радиальной компоненты магнитной индукции B_r с нанесенными изолиниями этой характеристики поля. Нулевые линии B_r (ЛРП) выделены более жирной линией. Кроме того, были построены силовые линии магнитного поля, охватывающие волокна.

На рис. 1–5 представлены изображения фрагментов Солнца с волокнами в линии H_α и в канале 19.3 нм с нанесенными на одно или оба типа изображений ЛРП поля и, в некоторых случаях, изолиниями B_r , а также силовые линии, охватывающие волокна.

Из рис. 1 (правая панель) следует, что плоскости, в которых находятся охватывающие волокно силовые линии, для протяженных волокон, расположенных под относительно небольшим углом к меридиану, отклоняются в северном направлении в северной половине волокна и в южном направлении в южной половине волокна.

Мы также определили высоты вершин (расстояние вдоль радиального направления из центра Солнца от вершины петли до фотосферы) двух типов силовых линий поля, охватывающих волокно. В первом случае речь идет о магнитных петлях, вершина которых оказывается наиболее близкой к волокну (H_{min}). Во втором случае находилась высота самых высоких петель (H_{max}), концы которых оказывались в униполярных областях поля, примыкающих с двух сторон к ЛРП. Высота вершины петли в обоих случаях варьируется в пределах основного тела волокна, поэтому приведем средние значения для этих высот: $\langle H_{min} \rangle = 0.054 R_\odot$, $\langle H_{max} \rangle = 0.55 R_\odot$. Знание $\langle H_{min} \rangle$ позволяет оценить средний угол β наклона вершины волокна к радиальному направлению: $\sin \beta = \Delta_{F-PIL} / \langle H_F \rangle$. Здесь Δ_{F-PIL} – разность расстояний между проекцией вершины волокна на поверхность Солнца и ЛРП, $\langle H_F \rangle$ – средняя высота вершины волокна. Предполагается, что $\langle H_F \rangle$ близка к $\langle H_{min} \rangle$. Для $\langle \Delta_{F-PIL} \rangle \approx 36424$ км (3 гелиографических градуса), $\langle H_{min} \rangle = 0.054 R_\odot = 37584$ км имеем $\langle \beta \rangle \approx 75.7^\circ$.

Рисунок 2 иллюстрирует протяженное волокно (вдоль параллели волокно занимает около 90°), зарегистрированное 2 мая 2015 г. Особенностью этого волокна является его утончение в нескольких местах и уменьшение в этих местах потемнения в основном теле волокна. Оказалось, что эти утончения происходят в участках волокна, расположенных вблизи биполярных

областей повышенных значений поля и проходящих через эти области. Эти утончения отмечены отрезками прямых линий на средней панели рис. 2. Наиболее сильная биполярная область расположена примерно в центре и является активной областью NOAA 12334. В этой области волокно оказалось самым тонким. Менее сильная биполярная область отмечена левым отрезком. Здесь волокно утончено, но в меньшей степени, чем в активной области. И, наконец, правый отрезок указывает на еще одну биполярную область, еще более слабую, чем область слева. Здесь утончение волокна тоже наблюдается, но оно выражено еще слабее, чем в левой биполярной области.

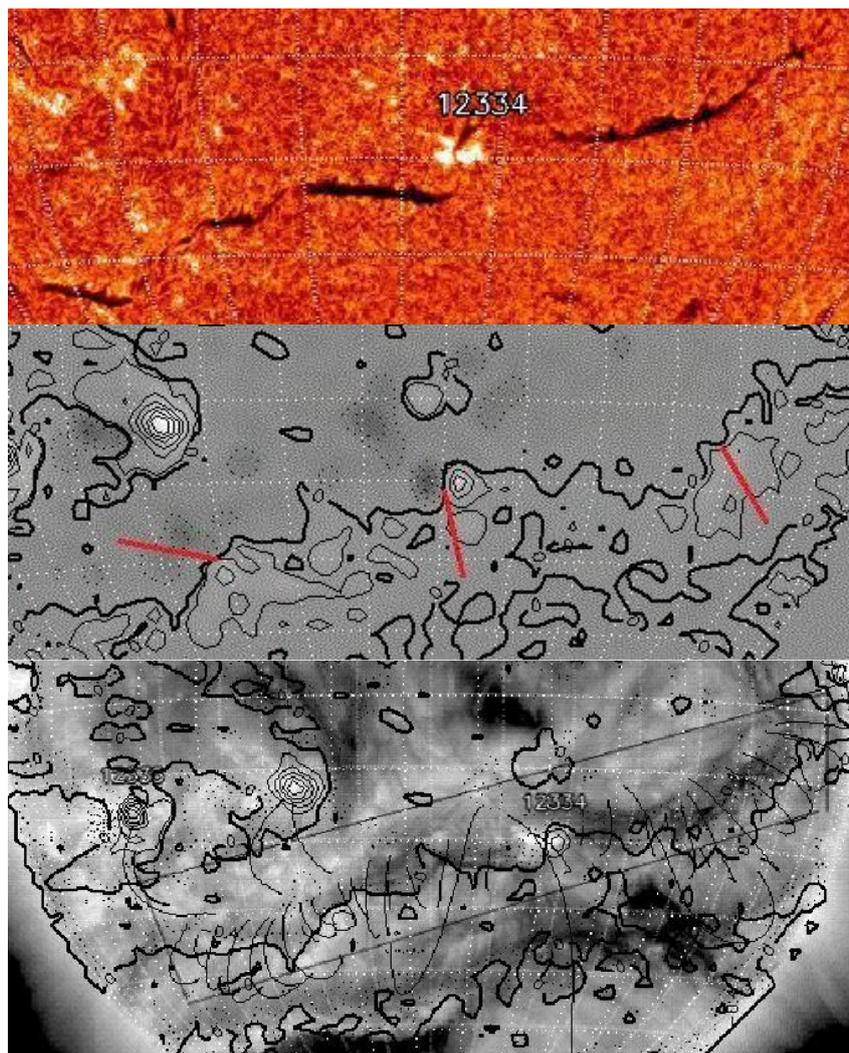


Рис. 2. Протяженное вдоль параллели волокно № 2, зарегистрированное 2 мая 2015 г. Верхняя панель – волокно по наблюдениям в линии H_{α} , вторая сверху панель – фотосферное магнитное поле под волокном и в ближайшей окрестности от связанной с волокном ЛРП. Сплошные тонкие линии – изолинии поля положительной полярности, пунктирные линии – изолинии поля отрицательной полярности. Нижняя панель – силовые линии поля, охватывающие волокно, нанесенные на изображение фрагмента Солнца в канале 19.3 нм. Толстыми сплошными линиями показана ЛРП поля.

Приведем наши оценки высоты и угла наклона волокна. Так как эти параметры сильно меняются в пределах волокна, приведем для них средние значения. По наблюдениям в линии H_{α} : $\langle H_{\min} \rangle = 0.021 R_{\odot}$, $\langle H_{\max} \rangle = 0.145 R_{\odot}$, $\langle \Delta_{F-PIL} \rangle \approx (0.017-0.021) R_{\odot}$ (1–1.24 гелиографических

Волокна различных типов...

градуса), $\langle\beta\rangle \approx 57.5^\circ\text{--}90^\circ$. Величина $\langle\Delta_{F-PIL}\rangle = 0.021 R_\odot$ выбрана условно. Для нее отношение $\langle\Delta_{F-PIL}\rangle/\langle H_{min}\rangle = 1$ и оно не может быть больше, т. к. равно $\sin\langle\beta\rangle$. В данном случае эту неопределенность нужно учитывать, т. к. значение $\langle\Delta_{F-PIL}\rangle$ мало. Неопределенность нахождения $\langle\Delta_{F-PIL}\rangle$, по-видимому, отражает влияние неточности определения конфигурации ЛРП при расчетах магнитного поля в потенциальном приближении. Этим мы также объясняем сильные искажения ЛРП над некоторыми небольшими участками волокна.

По наблюдениям в канале 19.3 нм: $\langle H_{min}\rangle = 0.075 R_\odot$, $\langle H_{max}\rangle = 0.215 R_\odot$, $\langle\Delta_{F-PIL}\rangle \approx 42495$ км (3.5 гелиографических градуса), $\langle\beta\rangle \approx 54.5^\circ$. Обратим внимание на то, что высота волокна зависит от спектрального диапазона, в котором наблюдается волокно. Высота волокна больше при его наблюдении в канале 19.3 нм по сравнению с наблюдением в линии H_α . В литературе уже отмечали такой факт (см. обзор Паренти, 2014 и цитируемую в нем литературу). Но вопрос о том, насколько велико различие высот по наблюдениям волокна в двух рассмотренных спектральных диапазонах, требует дополнительного исследования с использованием больших объемов данных наблюдений. По нашим данным, это различие может достигать нескольких раз. Возможно, предложенный нами способ нахождения высоты волокна с использованием силовых линий не совсем корректный и требует усовершенствования.

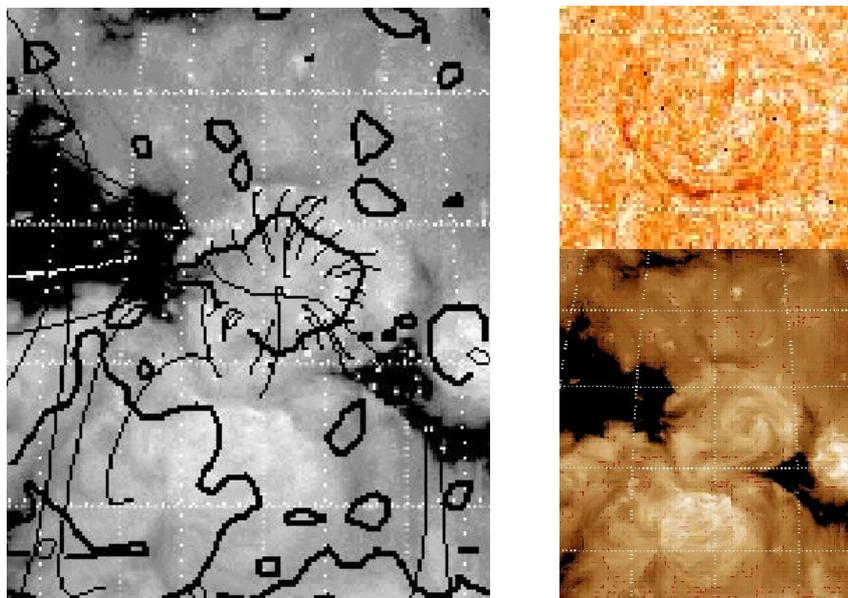


Рис. 3. Кольцевое волокно № 5, зарегистрированное 19.06.16. На левой панели показаны ЛРП магнитного поля (толстые сплошные линии) и силовые линии поля (сплошные более тонкие линии), нанесенные на изображение фрагмента Солнца в канале 19.3 нм, на котором видно волокно. На правой панели вверху показано волокно, наблюдаемое в линии H_α , внизу – в линии 19.3 нм

Далее рассмотрим особенности магнитного поля, связанного с так называемыми кольцевыми волокнами (см. рис. 3–5). ЛРП, связанная с волокном, представляет собой либо полностью замкнутую кривую, либо часть таковой.

Анализ таких волокон начнем с практически полностью замкнутого волокна, наблюдавшегося 19.06.2016. Волокно по наблюдениям в линии 19.3 нм почти полностью располагается вдоль замкнутой нейтральной линии, а волокно, наблюдаемое в линии H_α , простирается вдоль примерно половины ЛРП. Из изображений Солнца в линии 19.3 нм видно, что к волокну с противоположных сторон примыкают корональные дыры. Это приводит к тому, что некоторые силовые линии, охватывающие волокно, начинаются в граничных участках корональных дыр.

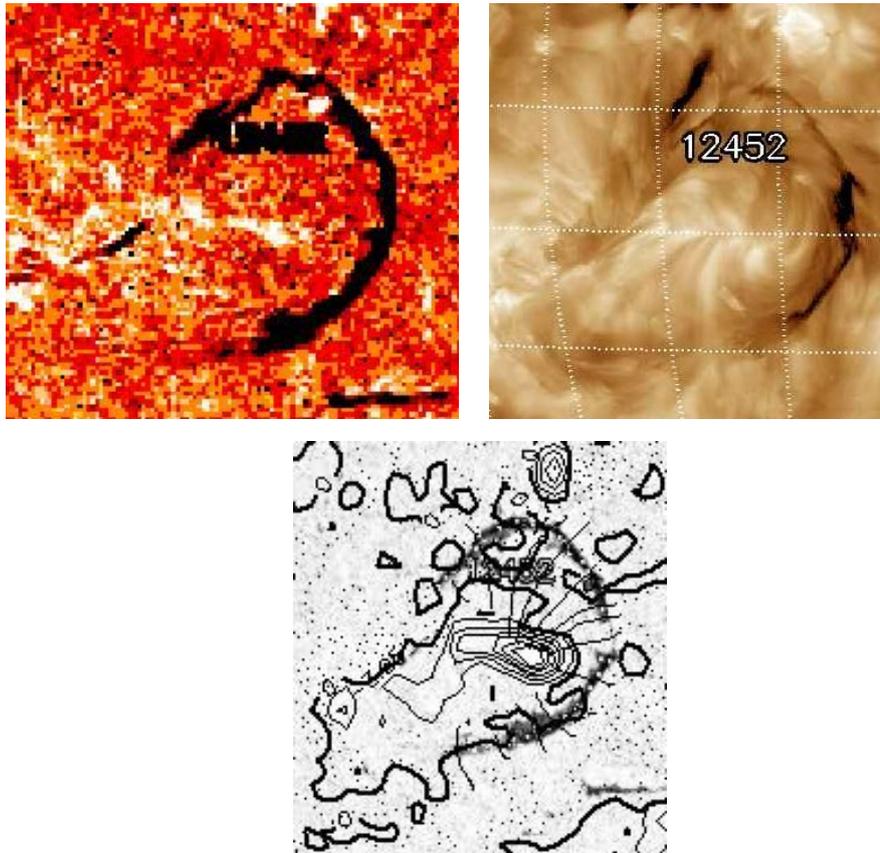


Рис. 4. Волокно № 4, зарегистрированное 13.11.2015. Верхние левая и правая панели – волокно по наблюдениям в линии H_{α} и в канале 19.3 нм. Нижняя панель – изображение фрагмента Солнца в канале 19.3 нм с волокном № 4 и с нанесенными ЛРП поля (сплошные жирные линии), а также силовыми линиями поля (тонкие сплошные линии)

Обратим внимание, что на изображении волокна в линии 19.3 нм (т. е. в нижней короне) видны вихревые структуры. Силовые линии магнитного поля также демонстрируют следы завихрения.

Рассмотрим еще одно кольцевое волокно, зарегистрированное 13.11.2015 в линии H_{α} (левая панель в верхнем ряду на рис. 4) и в линии 19.3 нм (нижняя панель на рис. 4). На правой панели в верхнем ряду на рис. 4 показана ЛРП и нанесенное на магнитограмму волокно в линии H_{α} , а на правой панели показано волокно по наблюдениям в канале 19.3 нм с нанесенными ЛРП и силовыми линиями поля. Видно, что волокно в линии H_{α} охватывает часть замкнутой ЛРП, а волокно в линии 19.3 нм, по-видимому, охватывает всю замкнутую ЛРП. Точно это сказать невозможно, т. к. некоторые фрагменты волокна в этой линии трудно выделить. С использованием нашей методики оценки высоты и угла наклона волокна к радиальному направлению мы приходим к выводу, что северная часть волокна наклонена к радиальному направлению более сильно, чем предыдущее кольцевое волокно, и является более высоким. В то же время значительная часть юго-западного участка волокна близка к ЛРП. Это означает относительно небольшую высоту и маленький угол наклона к радиальному направлению.

По нашим оценкам для северной дуги волокна $\langle H_{\min} \rangle = 0.019 R_{\odot}$. Для этого участка волокна мы не оцениваем угол $\langle \beta \rangle_{\text{ha}}$, т. к. ЛРП в этом месте фрагментарная. Ее отдельные участки практически находятся на волокне, а в других местах расстояние между волокном и ЛРП вели-

Волокна различных типов...

ко. Пока неясно, могут ли отдельные участки волокна быть радиальными, а другие участки находиться к радиальному направлению под большим углом. Для юго-западной части волокна $\langle N_{\min} \rangle = 0.006 R_{\odot}$, $\langle \beta \rangle_{\text{ha}} = 0^{\circ} - 15^{\circ}$ (здесь отмечена неопределенность, с которой находится этот угол, которая, по-видимому, в основном определяется погрешностью расчетов ЛРП). В пределах этого участка волокна также наблюдаются фрагменты ЛРП, которые сильно отклоняются от волокна. Эти фрагменты ЛРП не учитывались при оценке $\langle \beta \rangle_{\text{ha}}$. По наблюдениям волокна в канале 19.3 нм имеем $\langle N_{\min} \rangle = 0.029 R_{\odot}$ для северной части волокна и $\langle N_{\min} \rangle = 0.019 R_{\odot}$ и $\langle \beta \rangle_{\text{ha}} = \leq 30^{\circ}$ для юго-западной части волокна. Обратим внимание на то, что и кольцевое волокно в линии 19.3 нм в 1.5–3 раза (зависит от места сравнения – северная или юго-западная части волокна) выше, чем по наблюдениям в канале 19.3 нм. Это согласуется с полученными ранее результатами (см. обзор Паренти, 2014 и цитируемую в нем литературу). Пока неясно, насколько в действительности может быть велико такое различие. Одна из будущих задач по исследованию волокон – сравнить высоты этих или похожих волокон при их наблюдении на лимбе, чтобы проверить полученные результаты.

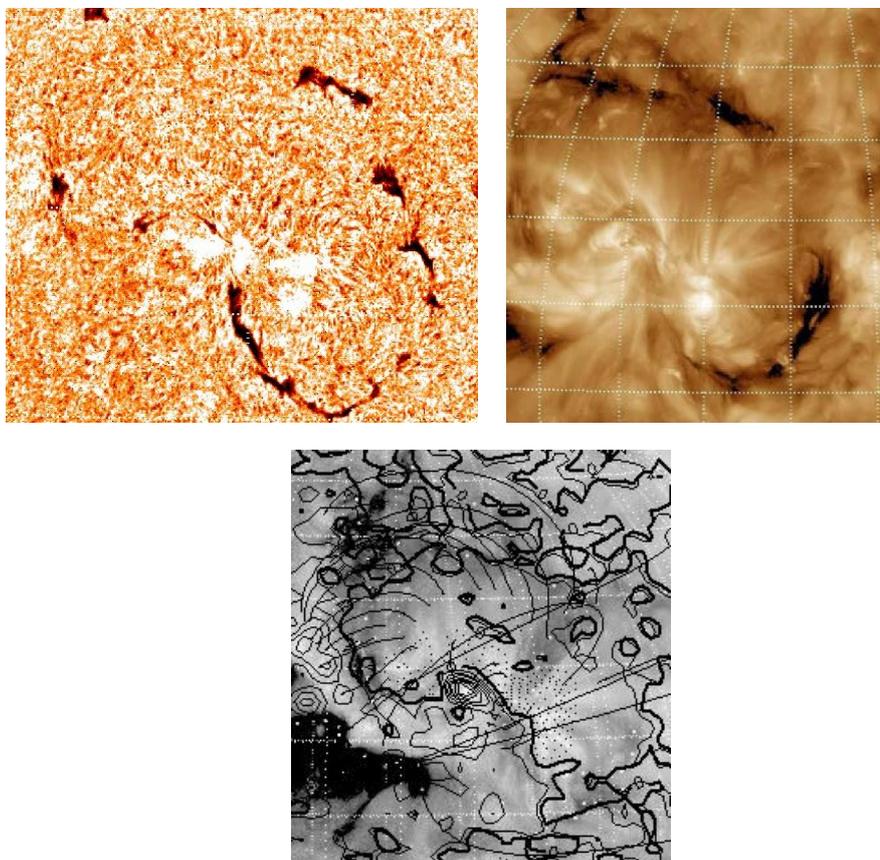


Рис. 5. Волокно, наблюдавшееся 2 июля 2016 г. На верхней панели слева – изображение фрагмента Солнца в линии H_{α} . Справа приведено изображение Солнца в канале 19.3 нм. Внизу на изображение Солнца в линии 19.3 нм нанесены ЛРП поля (толстые сплошные линии) и силовые линии поля, охватывающие волокно (тонкие сплошные линии)

Еще одно кольцевое волокно, зарегистрированное 2 июля 2016 г., показано на рис. 5. Его основная часть, которая “смотрит” в юго-западном направлении, наблюдается как в линии H_{α} , так и в канале 19.3 нм. По-видимому, фрагментом этого волокна является волокно, наблюдаемое к северу от основной части волокна, хотя оно располагается вблизи участка ЛРП поля, не

связанного с участком ЛРП, в окрестности которой расположена основная часть волокна. Особенностью этого волокна является расположение его основной части вблизи овалоподобного выступа ЛРП, которая в целом является сложной и замыкается, скорее всего, на обратной стороне Солнца. Волокно, расположенное к северу от основного волокна, оказывается вблизи фрагмента замкнутой ЛРП, которая не связана с овалоподобным выступом ЛРП.

Для основного волокна мы оценили его высоту $\langle H_{\min} \rangle$ и угол наклона к радиальному направлению $\langle \beta \rangle$ для различных участков волокна в случае наблюдения волокна в линии H_{α} и в канале 19.3 нм. Средняя высота H_{α} -волокна ($\langle H_{\min} \rangle_{ha} = 0.0046 R_{\odot}$) оказалась меньше высоты волокна по наблюдениям в канале 19.3 нм ($\langle H_{\min} \rangle_{193} = 0.016 R_{\odot}$). Для углов наклона волокна при их наблюдении в двух спектральных диапазонах имеем: $\langle \beta \rangle_{ha} = 0^{\circ} - 15^{\circ}$; $\langle \beta \rangle_{193} \leq 20^{\circ}$. Различие углов $\langle \beta \rangle_{ha}$ и $\langle \beta \rangle_{193}$, скорее всего, связано с погрешностью нахождения ЛРП и с погрешностью нашего метода нахождения этих углов.

Завершая наш анализ кольцевых волокон, заметим, что внутри области, охватываемой волокном, магнитное поле может превышать 100 Гс, т. е. быть больше, чем в спокойных областях вне волокна.

4 Заключение

Исследованы свойства магнитного поля, окружающего волокна двух типов: протяженных вдоль направления, близкого либо к параллели, либо к меридиану, а также кольцевых, основное тело которых оказывается криволинейным, близким по форме к овалу или его части.

1. Для обоих типов волокон показано, что их основное тело располагается вдоль ЛРП продольной компоненты фотосферного магнитного поля, а концы волокон оказываются в областях поля с различной полярностью. Это согласуется с известным свойством волокон (Паренти, 2014), но менее исследовано для кольцевых волокон.
2. Протяженное волокно по наблюдениям в H_{α} может состоять из более толстых и тонких видимых участков, а также более и менее темных. Показано, что утончение волокна и одновременное уменьшение его потемнения происходит при прохождении волокна через биполярные области магнитного поля и их ближайшие окрестности. При этом, чем больше величина поля в каждой униполярной области, тем тоньше и менее темным становится участок волокна, проходящий через биполярную область. Здесь в качестве характеристики фотосферного поля использовалась продольная компонента фотосферного поля.
3. Обнаружено, что плоскости, в которых находятся охватывающие волокно силовые линии, для протяженных волокон, расположенных под относительно небольшим углом к меридиану, отклоняются в северном направлении в северной половине волокна и в южном направлении в южной половине волокна.
4. Предложен метод оценки высоты волокна и угла наклона участка волокна к локальному радиальному направлению. Для пяти рассмотренных волокон (двух протяженных и трех кольцевых) определены эти характеристики волокна. Так, например, для протяженного волокна, зарегистрированного 28.08.2015, средняя высота вдоль основного тела волокна равна примерно $0.054 R_{\odot} = 37584$ км, средний угол наклона $\langle \beta \rangle \approx 44^{\circ}$.
5. Подтвержден известный вывод о том, что высота волокон, наблюдаемых в канале 19.3 нм, больше, чем наблюдаемых в линии H_{α} . Новым является то, что этот вывод справедлив и для кольцевых волокон.
6. Углы наклона плоскости силовых линий к радиусу Солнца в кольцевых волокнах оказались меньшими, чем в протяженных волокнах.
7. Внутри области поля, охваченной кольцевыми волокнами, могут наблюдаться сильные (интенсивностью более 100 Гс) магнитные поля.

Волокна различных типов...

8. Внутреннее пространство кольцевых волокон по наблюдениям в канале 19.3 нм (т. е. на уровне короны) часто имеет вихревую структуру, яркость элементов которой близка к яркости подложки возле волокна.

Отсюда можно сделать вывод, что кольцевые волокна – более сложные и, как показывает анализ их эволюции, менее устойчивые образования, чем протяженные волокна.

За время существования кольцевых волокон в них и в их ближайшей окрестности заметно меняются структура и окружающее волокна магнитное поле. Полученные результаты согласуются с результатами работы (Барановский и др., 2016), в которой изучались температура в хромосфере и плотность в короне этих же волокон и был сделан вывод об устойчивости физических условий протяженных волокон и изменчивости кольцевых.

Мы благодарим команды SOLIS, SDO/AIA, BBSO за возможность свободного использования данных этих телескопов. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 15-02-01077-а и № 16-32-00315.

Литература

- Барановский Э.А., Степанян Н.Н., Тарашук В.П., Штерцер Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2016. Т. 112. № 2.
- Маккей и др. (MacKay D.H., Karpen J.T., Ballester J.L., Schmieder B. and Aulanier G.) // Space Sci. Rev. 2010. V. 151. P. 333.
- Мартин (Martin S.F.) // Solar Phys. 1998. V. 182. P. 107.
- Палетоу (Paletou F.) // The magnetic field of solar prominences. / Eds Charbonnel C., Combes F., Samadi R. 2008. SF2A. Paris. P. 559.
- Паренти (Parenti S.) // Living Rev. Solar Phys. 2014. V. 11. P. 1.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
- Трухильо Буэно и др. (Trujillo Bueno J., Landi Degl’Innocenti E., Collados M., Merenda L., Manso Sainz R.) // Nature. 2002. V. 415. P. 403.
- Филиппов Б.П. // Эруптивные процессы на Солнце. Москва: Физматлит. 2007.