

УДК 523.9-337

“ЛОЖНЫЕ” СИГМОИДЫ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

© 2019 г. Б. П. Филиппов*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.; после доработки 26.04.2019 г.; принята к публикации 29.04.2019 г.

Сигмоидальные структуры солнечной короны, то есть структуры, имеющие вид латинской буквы S или ее зеркального отображения, как правило, рассматриваются как свидетельства скрученности силовых линий магнитного поля и присутствия электрических токов в короне. Однако такие образования могут существовать и в потенциальном поле. S-образная форма солнечных волокон, например, определяется распределением фотосферных магнитных полей, которое не зависит от корональных токов. Сигмоидальные силовые линии появляются в достаточно сложном потенциальном поле в окрестностях нулевых особых точек. Причем такие линии могут демонстрировать сдвиг, тоже часто принимаемый за проявление непотенциальности поля. Таким образом, следует относиться с осторожностью к некоторым свидетельствам непотенциальности магнитного поля в короне и исключать иные причины появления “подозрительных” структур.

DOI: 10.1134/S0004629919090020

1. ВВЕДЕНИЕ

Отдельная изолированная активная область на Солнце обычно демонстрирует в крайнем ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении систему ярких петель, очень похожую на силовые линии диполя. Когда фотосферные магнитные поля перемешаны сильнее, корональные структуры становятся сложнее. На рентгеновских изображениях короны, полученных спутником “Yohkoh” [1], были найдены короткоживущие (транзиентные) S-образные и зеркально отображенные образования, названные “сигмоидами” [2–4]. Эти уярчения довольно быстро эволюционировали или в аркады петель, или в диффузные облака. Довольно часто они были связаны с корональными выбросами вещества. Наблюдались также и долгоживущие сигмоидальные структуры, существовавшие в течение дней и недель [5]. В активных областях, в которых наблюдаются сигмоиды, чаще происходят эруптивные явления [6], а возмущения межпланетного магнитного поля, регистрируемые после эрупции сигмоидов, часто отражают их магнитную структуру до эрупции. В сигмоидальных активных областях встречаются и волокна, имеющие вид прямых или обратных S [7–10].

S-образные сигмоиды чаще встречаются в южном полушарии, а обратные S образные — в северном, хотя исключения не так уж редки [2, 6, 11]. Северо-южная избирательность характерна

также для направления вихревой закрученности суперполутени солнечных пятен и тонкой структуры волокон. Волоконца (фибриллы) суперполутени образуют циклонический вихрь, закрученный против часовой стрелки, в северном полушарии и по часовой стрелке в южном [12, 13], а зубчики волокон отклоняются от оси по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки в южном [14, 15]. Поскольку обе характеристики связаны со спиральностью магнитного поля [16], можно ожидать, что и сигмовидные формы должны отражать закрученность магнитного поля. В работе [2] было высказано предположение, что транзиентные сигмоиды в мягком рентгене демонстрируют винтовую (kink) неустойчивость магнитных жгутов. Однако изгиб оси жгута при развитии такой неустойчивости имеет такое же направление вращения, что и закрученность силовых линий внутри жгута [17]. В проекции на солнечную поверхность выгнутая вверх винтовая петля имеет вид S-образной (обратной S) структуры для левого (правого) винта [18, 19]. Доминирование правовинтовой (левовинтовой) закрученности магнитного поля в южном (северном) полушарии противоречит преимущественно S-образной (обратной S) форме наблюдаемых здесь сигмоидов.

Для разрешения противоречия было предложено считать транзиентные сигмоиды не проекцией самих магнитных жгутов с винтовой осью, а проекцией токовых слоев, образующихся под жгутами [18, 20–22]. Эти слои изгибаются в противоположную сторону, в соответствии с наблюде-

*E-mail: bfilip@izmiran.ru

ниями. Кроме того, если винтовая петля выгнута вниз, то она сама соответствует правилу северо-южной предпочтительности [18]. Когда винтовая неустойчивость в таком случае достигает насыщения, может возникнуть долгоживущая магнитная структура, в которой может накапливаться плотная плазма, образующая волокно.

Сигмоидальная форма корональных образований считается индикатором корональных электрических токов, хотя уже в одной из первых работ, посвященных их исследованию [23], отмечалась возможность существования S-образных силовых линий в потенциальных полях. В данной работе мы покажем, что некоторые структуры в короне, имеющие сигмоидный вид, наблюдаются в условиях, предполагающих близость поля к потенциальному. Форма этих структур определяется распределением источников магнитного поля в фотосфере.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для изучения геометрических свойств волокон использовались изображения полного диска Солнца в линии $H\alpha$, полученные на обсерватории Биг Бэр (Big Bear Solar Observatory) из архива <http://www.bbso.njit.edu/>. Форма корональных петель анализировалась по изображениям в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, получаемым комплексом телескопов Atmospheric Imaging Assembly (AIA; [24]) на борту аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO). Магнитное поле в короне рассчитывалось в потенциальном приближении по измерениям продольного компонента поля в фотосфере инструментами Michelson Doppler Imager (MDI; [25]) на борту Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) и Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; [26, 27]) на борту SDO.

Поскольку нас интересует поле в относительно небольших областях, из магнитограммы полного диска вырезалась прямоугольная площадка, значения поля из которой затем преобразовывались в массив, используемый как граничное условие для решения краевой задачи. При этом мы пренебрегаем вкладом участков фотосферы за пределами выбранной площадки. Это оправданно, если размеры области намного больше, чем высота, до которой ведутся расчеты, или если основные источники поля (активные области) находятся в пределах вырезанной площадки. В областях, заметно удаленных от центра диска, отдельные пиксели магнитограммы соответствуют участкам с различной площадью из-за проектирования сферической поверхности фотосферы на картинную плоскость. Чтобы воспользоваться методикой интегрирования, предложенной в работе [28], данные преобразовывались в массив с одинаковыми квадратными ячейками.

Так эта область выглядела бы, если бы находилась в центре солнечного диска. За нормальный к поверхности компонент поля, необходимый для решения краевой задачи, принимается проекция продольного (вдоль луча зрения) поля на нормаль. Подробности методики расчетов описаны в работах [29, 30].

Линии раздела северной и южной полярностей фотосферного продольного поля (ЛРП) находились усреднением по гауссовому закону на масштабе, достаточном для подавления вклада мелко-масштабных полей и шумов магнитограммы. Такое сглаживание дает в результате форму ЛРП, очень близкую к форме ЛРП потенциального поля на некоторой высоте, того же порядка величины, что и масштаб сглаживания [31, 32].

3. СИГМОИДАЛЬНЫЕ ВОЛОКНА

Солнечные волокна следуют более или менее строго ЛРП фотосферного продольного поля, называемым также нейтральными линиями [33–36]. Многие волокна выглядят как прямые отрезки, так как они расположены в крупномасштабном магнитном поле. Оси других волокон искривлены и даже замыкаются в кольца, поскольку они окаймляют сравнительно небольшие участки с полярностью противоположной полярности окружающей крупномасштабной области. Иногда ось волокна имеет вид латинской буквы S или ее зеркального отображения. Они могут рассматриваться как сигмоиды, но их форма не является проявлением электрического тока, а определяется распределением фотосферного поля, которое может быть близко к потенциальному. Вообще-то вещество волокон поддерживается высоко в короне взаимодействием электрического тока с окружающим магнитным полем, но этот ток не обязательно определяет форму оси волокна.

На рис. 1а показано волокно в линии $H\alpha$, наблюдавшееся 13 июня 2013 г. Его ось имеет вид обратной S. Однако эта форма обусловлена не непотенциальностью поля в короне, а отражает изгибы ЛРП в фотосфере. Черные сплошные линии на рис. 1 демонстрируют ЛРП с гауссовым сглаживанием на масштабе $50''$. На рис. 1б приведена магнитограмма этой же области с теми же ЛРП и силовыми линиями потенциального поля, показанными тонкими серыми линиями. Конечно, среди них нет такой, которая совпадала бы с изогнутой осью волокна или с направлением коротких нитей, составляющих его внутреннюю тонкую структуру. Принято считать, что эти нити отражают структуру магнитного жгута, служащего магнитным каркасом волокна [37–41]. Плотное вещество волокна скапливается в нижних частях винтовых силовых трубок жгута. Все силовые линии потенциального

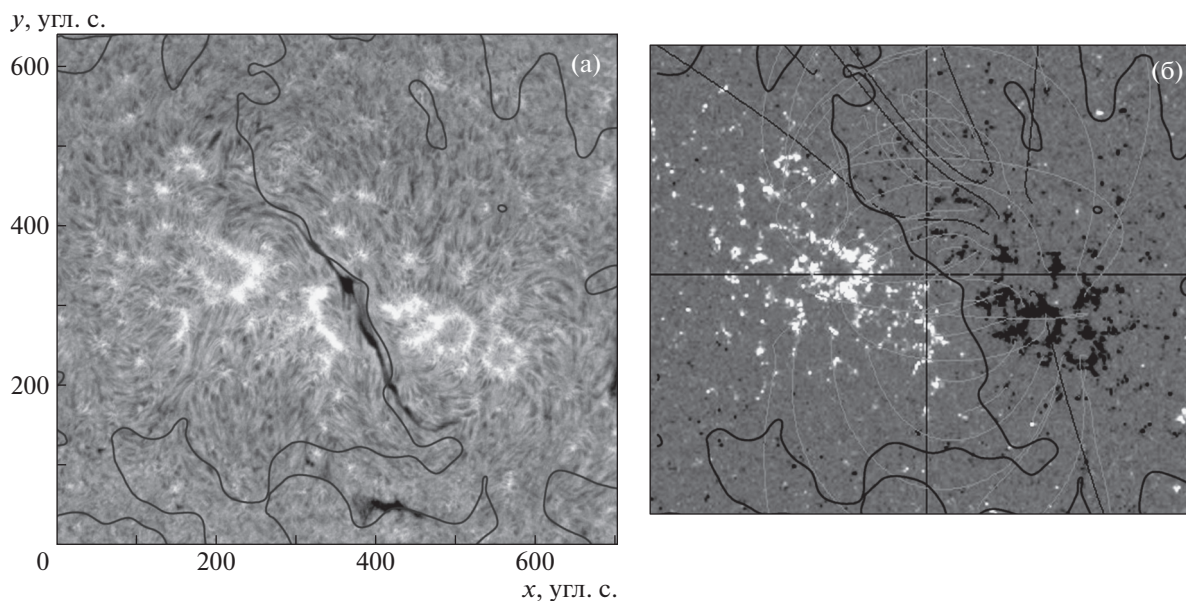


Рис. 1. α -филтрограмма 13 июня 2013 г. в 16:23 UT с наложенными фотосферными ЛРП (черные сплошные линии), сглаженными гауссовым фильтром $50''$ (а). Магнитограмма SDO/HMI для того же момента времени с теми же ЛРП и силовыми линиями потенциального поля (светло-серые линии) (б). Элементы положительной (южной) полярности показаны светлыми тонами, а отрицательной (северной) полярности — темными. (Big Bear Solar Observatory и Консорциум SDO/HMI).

поля выпуклы и не смогли бы удерживать это вещество длительное время. С этой точки зрения каждое волокно демонстрирует непотенциальность поля в короне, но эта непотенциальность не связана с формой оси волокна. Эта форма контролируется фотосферным полем, мало отличающимся от потенциального.

Хотя данное волокно с обратной S-образной формой расположено в северном полушарии и вроде бы следует правилу избирательной спиральности полушарий [2, 11], такое совпадение, скорее всего, случайно. На рис. 2 показано длинное волокно с синусоидальной осью. Отдельные секции этого волокна можно рассматривать как прямые и обратные S-образные структуры. Однако ось волокна всего лишь следует ЛРП.

Концы волокон должны покидать ЛРП и укореняться в областях различной полярности, поскольку внутри жгутов имеется сильное осевое магнитное поле, которое должно быть связано с фотосферой. Таким образом, даже если участок ЛРП, на котором “сидит” волокно, совершенно прямой, концы волокна отклоняются от ЛРП в разные стороны, создавая слегка сигмоидальную форму. Волокна активных областей нередко одним из концов подходят к ближайшим окрестностям солнечных пятен. Некоторые пятна имеют суперполутень с фибриллами, закручивающимися в вихрь по часовой стрелке в южном полушарии и против часовой стрелки в северном полушарии

(рис. 3). Это, как уже упоминалось, следствие избирательной спиральности полушарий: положительная спиральность доминирует в южном полушарии, а отрицательная — в северном. Волокна, приближающиеся к пятнам, имеют спиральность того же знака [42, 43]. Спиральность волокон может быть определена по их внутренней структуре: направлению нитей и выступающих зубчиков [37–41]. То есть можно полагать, что часть электрического тока, текущего через солнечное пятно, проходит через связанный с ним магнитный жгут (рис. 3). Некоторые оценки свидетельствуют, что ток через пятно того же порядка, что и ток через связанное с ним волокно [44].

На рис. 4 приведены примеры волокон, один из концов которых подходит к пятнам со спирально закрученной суперполутенью в северном и южном полушарии. Суперполутень закручена против часовой стрелки в пятне северного полушария, а связанное с ним волокно имеет зубчики, указывающие на отрицательную спиральность (рис. 4а). Обе характеристики противоположны в пятне и волокне южного полушария (рис. 4б). Сигмоидальные волокна при этом следуют правилу северо-южной избирательности: обратная S в северном полушарии и прямая S — в южном. Однако вряд ли сигмоидный вид волокон определяется их спиральностью. Как видно на рис. 4, изгибы волокон просто следуют изгибам ЛРП, которые не имеют никакого отношения к спиральности магнитного поля.

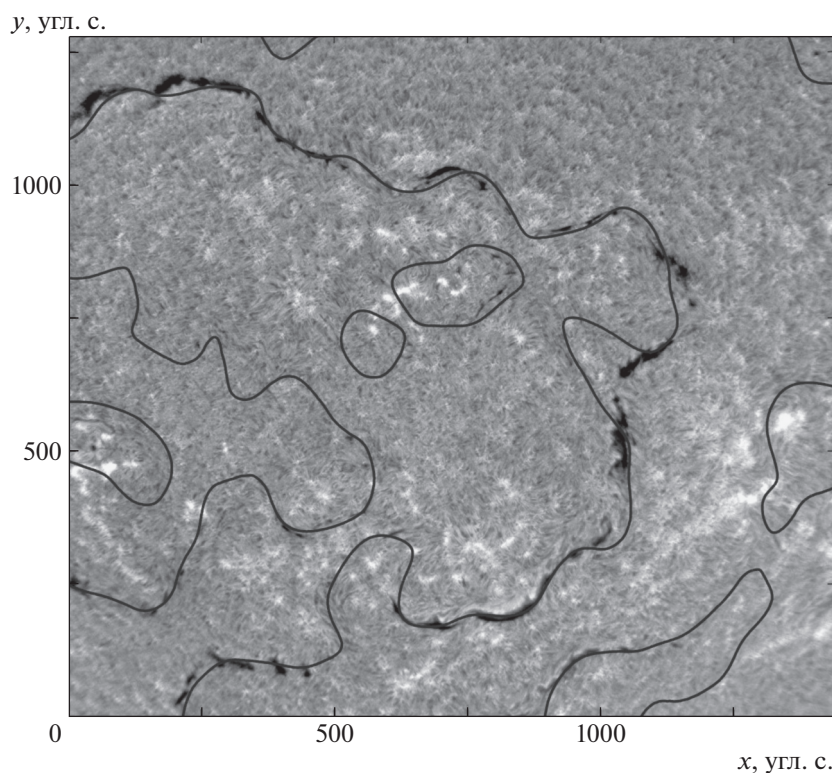


Рис. 2. H α -фильтрограмма 14 сентября 2013 г. в 16 : 51 UT с наложенными фотосферными ЛПП (черные сплошные линии), сглаженными гауссовым фильтром 50'' (Big Bear Solar Observatory и Консорциум SDO/HMI).

4. СИГМОИДАЛЬНЫЕ КОРОНАЛЬНЫЕ ПЕТЛИ

Широко распространено убеждение, что S-образная в проекции на солнечный диск форма корональных петель однозначно указывает на непотенциальность магнитного поля в короне. Но S-образные линии можно обнаружить как в плоском потенциальном поле, так и в проекциях силовых линий трехмерного поля на плоскость. На такую возможность указывали авторы работы [23]. На рис. 5 показаны силовые линии двумерного поля четырех точечных источников (“зарядов”). Они находятся в углах квадрата со сторонами единичной длины. Заряды равных и противоположных знаков находятся на концах диагоналей, причем одна пара зарядов (диполь) больше другой в полтора раза. В этой конфигурации имеется две нулевых точки, и силовые линии, соединяющие более крупные заряды, имеют форму обратных S благодаря сильному изгибу вблизи нулевых точек.

Такие же структуры могут существовать и в трехмерном потенциальном поле. Если четыре заряда располагаются ниже поверхности $z = 0$, представляющей фотосферу, то все “корональные” силовые линии выпуклы, но в проекции на поверхность некоторые из них имеют сигмоидный вид

(рис. 6). При этом проекции этих силовых линий не перпендикулярны ЛПП, то есть они демонстрируют сдвиг (shear) в потенциальном поле.

На изображениях Солнца в мягком рентгене и крайнем ультрафиолете бывают видны на диске корональные петли, концы которых изгибаются в противоположные стороны, демонстрируя сигмоидные структуры. Какие-то из них, несомненно, связаны с магнитными жгутами и порождаемыми ими структурами, что подтверждается расчетами нелинейного бессилового магнитного поля в короне по фотосферным векторным магнитограммам [45–48]. Другие могут возникнуть и в потенциальном поле. На рис. 7а показан пример сигмоидных корональных петель на изображении SDO/AIA в канале 171 Å. Сопоставление с магнитограммой SDO/HMI (рис. 7б, в) указывает на наличие в фотосфере четырех достаточно компактных магнитных образований, образующих квадрупольную конфигурацию. В отличие от рис. 4 и 5, диаметрально противоположные источники здесь одного знака. Имеется только одна нулевая точка (по крайней мере, в двух измерениях, в горизонтальном поле) в центральной части. Соответствующая седловая структура хорошо обрисовывается корональными петлями (рис. 7а) и силовыми линиями потенциал-

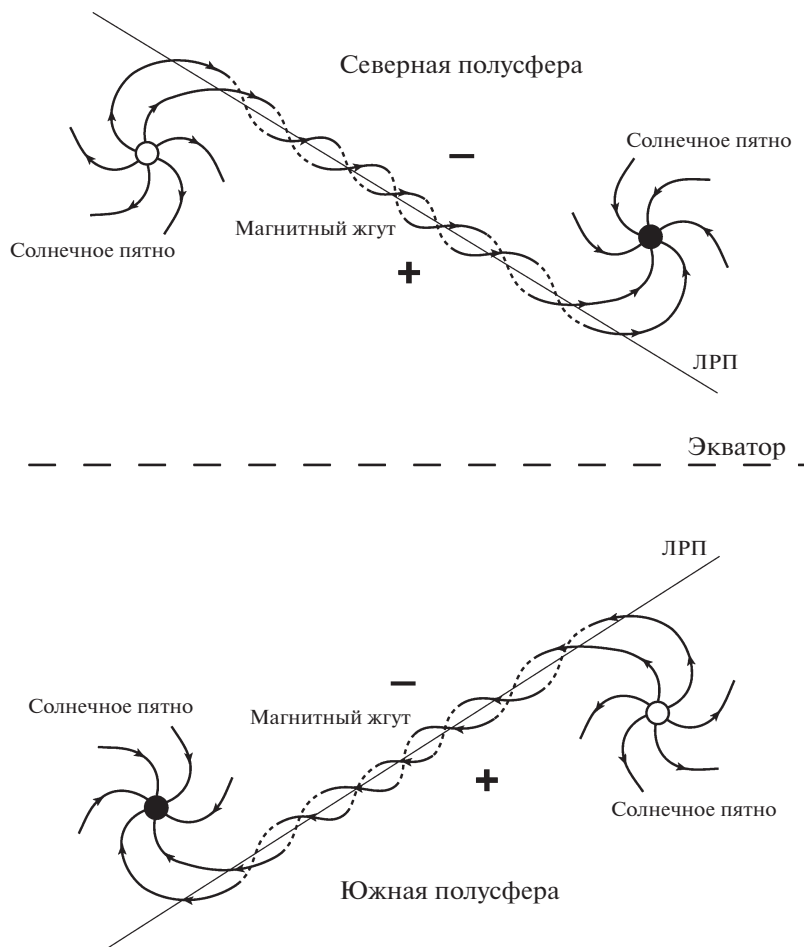


Рис. 3. Схематическое представление солнечных пятен со спирально закрученными суперполутенями и связанными с ними магнитных жгутов.

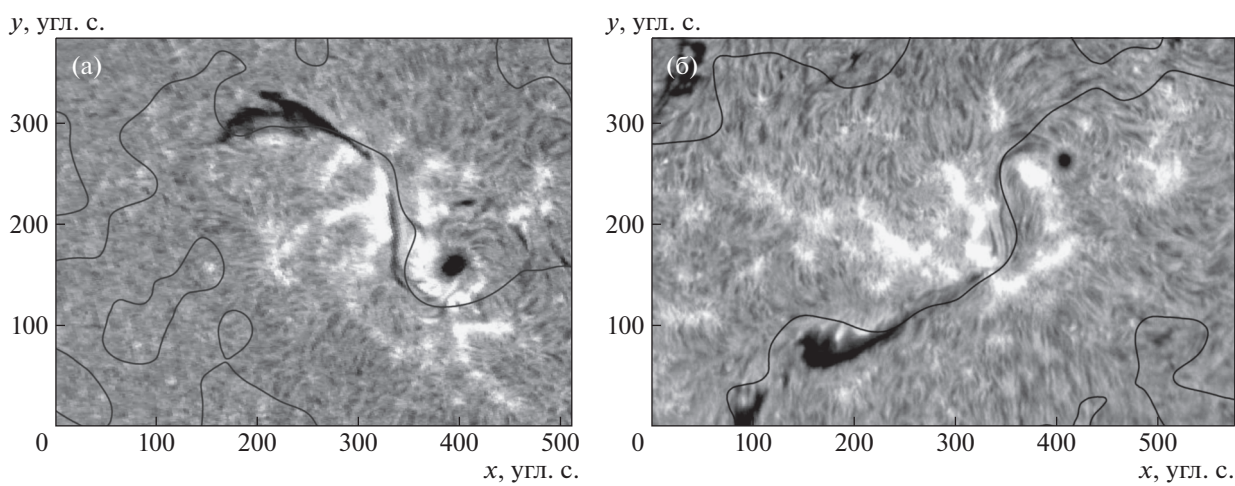


Рис. 4. α -фильтрограммы 16 июня 1998 г. в 18 : 38 UT (а) и 14 июля 2015 г. (б) с наложенными фотосферными ЛРП (черные сплошные линии), сглаженными гауссовым фильтром $50''$ (Big Bear Solar Observatory и Консорциумы SOHO/MDI и SDO/HMI).

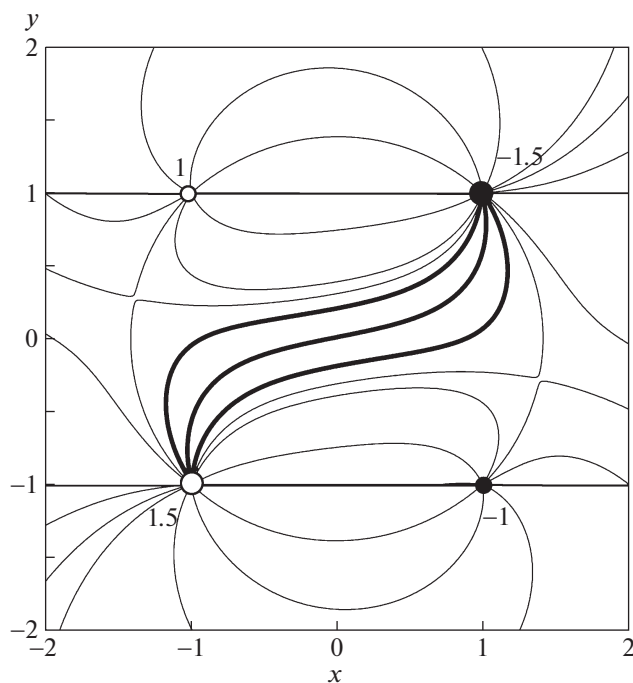


Рис. 5. Силовые линии двумерного (плоского) потенциального поля с сигмоидальными линиями.

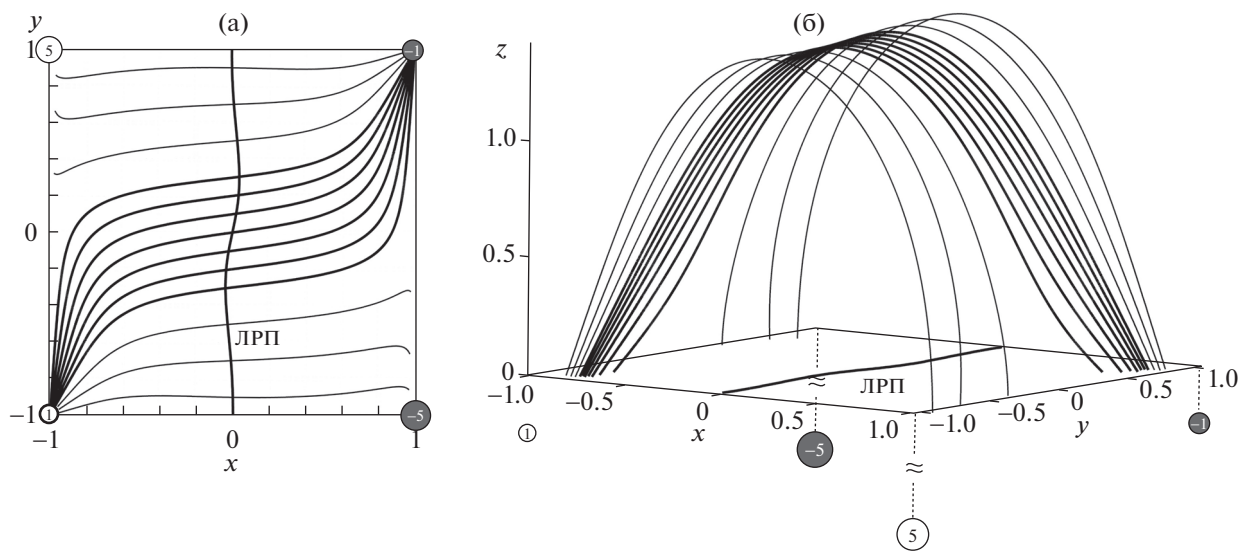


Рис. 6. Вид сверху (а) и сбоку (б) силовых линий трехмерного поля четырех зарядов с сигмоидальными линиями в проекции. Пара зарядов величиной ± 1 находятся на глубине 0.3 под поверхностью $z = 0$, и пара зарядов ± 5 — на глубине 1. Сигмоидальные линии и ЛРП показаны более жирными линиями.

ного магнитного поля (рис. 7в). Все силовые линии выпуклы, как видно на рис. 7г, но в проекции на диск некоторые из них, указанные белой стрелкой, сильно изгибаются вблизи седловой точки и приобретают вид обратной S.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сигмоидные структуры, наблюдаемые в солнечной короне, обычно расцениваются как признаки присутствия электрического тока в скрученных магнитных полях. Во многих случаях сигмоиды со-

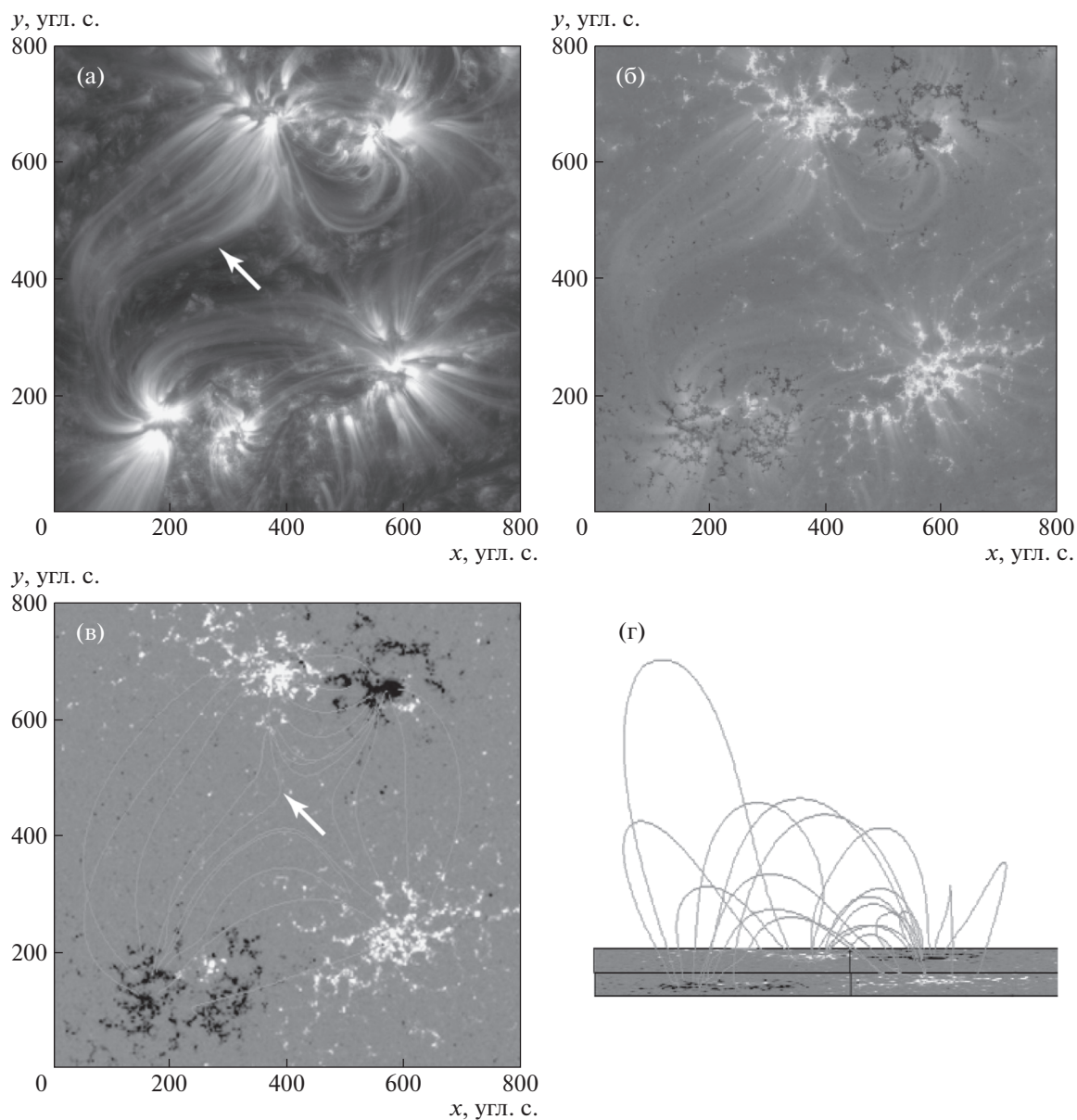


Рис. 7. Вид корональных петель на фильтрограмме, полученной SDO/AIA 24 октября 2015 г. в 08 : 26 UT в канале 171 Å, с сигмоидной структурой (а). (б) То же изображение, совмещенное с магнитограммой SDO/HMI. (в) Магнитограмма SDO/HMI с проекциями силовых линий потенциального поля. (г) Вид силовых линий сбоку. Белая стрелка указывает на сигмоидные корональные петли и соответствующие силовые линии. (Консорциумы SDO/AIA и SDO/HMI.)

проводятся другими признаками скрученности поля, и наличие токов подтверждается экстраполяцией в корону фотосферных векторных магнитных полей. Однако сигмоидные структуры могут появляться не только благодаря корональным токам, но и из-за особого распределения фотосферных полей. Солнечные волокна с сигмоидной и даже синусоидальной формой их оси наблюдаются не редко. Тогда как вещество волокон поддерживается непотенциальным полем (полем магнитных жгутов или аркад со сдвигом, т.е. аркад со сдвинутыми

вдоль ЛРП основаниями петель), форма оси волокон определяется формой ЛРП и, следовательно, распределением фотосферных полей, не зависящих от корональных токов.

Нами представлены примеры сигмоидальных волокон, форма которых даже следует правилу полусферной избирательности знака спиральности, то есть S-образная форма — в южном полушарии и обратная S — в северном. Однако сопоставление с фотосферными магнитными полями показывает, что волокна строго следуют ЛРП, так что влияние

фотосферных полей определяет форму оси волокна скорее, чем возможное влияние внутреннего тока магнитного жгута. Длинные волокна вообще нередко имеют синусоидальную форму, и их различные сегменты могут рассматриваться как элементы с формой прямого или обратного S.

Силовые линии простого симметричного потенциального поля (например, диполя) имеют постоянный знак кривизны на протяжении всей длины. В более сложных полях кривизна может менять знак, и силовая линия может выглядеть как прямая или обратная буква S. Очень большой изгиб силовые линии претерпевают в окрестностях нулевых точек. Пара нулевых точек создает ярко выраженную S-образную форму силовых линий. Это показано на простых дву- и трехмерных моделях. В проекции на горизонтальную поверхность силовые линии в квадрупольной конфигурации не только демонстрируют сигмоидальные структуры, но и отклоняются от перпендикулярного к ЛРП направления, обнаруживая сдвиг. Аркады со сдвигом тоже рассматриваются как проявления корональных токов. Некоторые сигмоидальные корональные петли, в течение длительного времени наблюдаемые на изображениях в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, хорошо соответствуют форме потенциальных силовых линий, рассчитанных по фотосферным данным.

Мы не затрагиваем в данной работе транзитные сигмоиды. Они связаны с кратковременными явлениями (вспышки, эрупции) и очевидно должны быть тесно связаны с корональными токами, производящими эти явления. Мы хотим только подчеркнуть, что наблюдаемые сигмоидальные образования не обязательно свидетельствуют о присутствии электрических токов в короне. Внимательный анализ магнитных полей необходим для исключения иных возможностей появления таких структур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен сотрудникам Солнечной обсерватории Биг Бэр и научным группам проекта SDO за возможность доступа к материалам наблюдений. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках проекта Минобрнауки КП 19-270.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, J. Lemen, et al., *Solar Phys.* **136**, 37 (1991).
2. D. M. Rust and A. Kumar, *Astrophys. J. Lett.* **464**, L199 (1996).
3. R. C. Canfield, H. S. Hudson, and D. E. McKenzie, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 627 (1999).

4. R. C. Canfield, H. S. Hudson, and A. A. Pevtsov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, 1786 (2000).
5. A. A. Pevtsov, *Solar Phys.* **207**, 111 (2002).
6. A. A. Pevtsov, in *Multi-Wavelength Observations of Coronal Structure and Dynamics*, edited by P. C. H. Martens and D. P. Cauffman, COSPAR Coll. Ser. 13 (Dordrecht: Pergamon, 2002), p. 125.
7. D. M. Rust and A. Kumar, *Solar Phys.* **155**, 69 (1994).
8. A. A. Pevtsov, R. C. Canfield, and H. Zirin, *Astrophys. J.* **473**, 533 (1996).
9. B. W. Lites and B. C. Low, *Solar Phys.* **174**, 91 (1997).
10. S. E. Gibson, L. Fletcher, G. Del Zanna, C. D. Pike, et al., *Astrophys. J.* **574**, 1021 (2002).
11. A. A. Pevtsov, R. C. Canfield, and S. M. Latushko, *Astrophys. J. Lett.* **549**, L261 (2001).
12. R. S. Richardson, *Astrophys. J.* **93**, 24 (1941).
13. Y. J. Ding, Q. F. Hong, and H. Z. Wang, *Solar Phys.* **107**, 221 (1987).
14. S. F. Martin, R. Billimoria, and P. W. Tracadas, in *Solar Surface Magnetism*, edited by R. J. Rutten and C. J. Schrijver (Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1994), p. 303.
15. J. B. Zirker, S. F. Martin, K. Harvey, and V. Gaizauskas, *Solar Phys.* **175**, 27 (1997).
16. D. M. Rust, *Geophys. Res. Lett.* **21**, 241 (1994).
17. M. G. Linton, G. H. Fisher, R. B. Dahlburg, and Y. Fan, *Astrophys. J.* **522**, 1190 (1999).
18. B. Kliem, V. S. Titov, and T. Török, *Astron. Astrophys.* **413**, L23 (2004).
19. S. E. Gibson, Y. Fan, T. Török, and B. Kliem, *Space Sci. Rev.* **124**, 131 (2006).
20. L. M. Green, B. Kliem, T. Török, L. van Driel-Gesztelyi, and G. D. R. Attrill, *Solar Phys.* **246**, 365 (2007).
21. Y. Fan, and S. E. Gibson, *Astrophys. J. Lett.* **589**, L105 (2003).
22. Y. Fan, and S. E. Gibson, *Astrophys. J.* **609**, 1123 (2004).
23. A. A. Pevtsov, R. C. Canfield, and A. N. McClymont, *Astrophys. J.* **481**, 973 (1997).
24. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, et al., *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
25. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. Bush, J. T. Hoeksema, A. G. Kosovichev, et al., *Solar Phys.* **162**, 129 (1995).
26. P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, A. G. Kosovichev, et al., *Solar Phys.* **275**, 207 (2012).
27. J. Schou, P. H. Scherrer, R. I. Bush, R. Wachter, et al., *Solar Phys.* **275**, 229 (2012).
28. О. Г. Ден, О. Е. Ден, Е. А. Корницкая, М. М. Молоденский, *Солнечные данные*, №. 1, 97 (1979).
29. Б. П. Филиппов, О. Г. Ден, *Письма в Астрон. журн.* **26**, 384 (2000).
30. B. Filippov, *Astrophys. J.* **773**, 10 (2013).
31. C. J. Durrant, *Solar Phys.* **211**, 83 (2002).
32. S. S. Ipson, V. V. Zharkova, S. Zharkov, A. K. Benkhalil, J. Aboudarham, and N. Fuller, *Solar Phys.* **228**, 399 (2005).
33. H. W. Babcock and H. D. Babcock, *Astrophys. J.* **121**, 349 (1955).

34. R. F. Howard and J. W. Harvey, *Astrophys. J.* **139**, 1328 (1964).
35. S. F. Smith and H. E. Ramsey, *Solar Phys.* **2**, 158 (1967).
36. P. S. McIntosh, *Rev. Geophys. Space Phys.* **10**, 837 (1972).
37. J. Chae, *Astrophys. J. Lett.* **540**, L115 (2000).
38. Y. Lin, O. R. Engvold, and J. E. Wiik, *Solar Phys.* **216**, 109 (2003).
39. Y. Lin, J. E. Wiik, O. Engvold, L. Rouppe van der Voort, and Z. A. Frank, *Solar Phys.* **227**, 283 (2005).
40. S. F. Martin, Y. Lin, and O. Engvold, *Solar Phys.* **250**, 31 (2008).
41. Y. Lin, S. F. Martin, and O. Engvold, in *Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity*, edited by R. Howe, R. W. Komm, K. S. Balasubramaniam, and G. J. D. Petrie, ASP Conf. Ser. **383** (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008), p. 235.
42. D. M. Rust and S. F. Martin, in *Solar active region evolution: comparing models with observations*, edited by K. S. Balasubramaniam and G. W. Simon, ASP Conf. Ser. **68** (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1994), p. 337.
43. S. F. Martin, in *New Perspectives on Solar Prominences*, edited by D. F. Webb, B. Schmieder, and D. M. Rust, IAU Colloq. **167**, ASP Conf. Ser. **150** (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1998), p. 419.
44. Г. Н. Куликова, М. М. Молоденский, Л. И. Старкова, Б. П. Филиппов, *Солнечные данные*, №. 10, С. 60 (1986).
45. A. Savcheva, A. A. van Ballegoijen, and E. E. DeLuca, *Astrophys. J.* **744**, 78 (2012).
46. A. Savcheva, E. Pariat, A. van Ballegoijen, G. Aulanier, and E. DeLuca, *Astrophys. J.* **750**, 15 (2012).
47. C. Jiang, S. T. Wu, X. Feng, and Q. Hu, *Astrophys. J.* **780**, 55 (2014).
48. P. Vemareddy and P. Démoulin, *Astrophys. J.* **857**, 90 (2018).