

УДК 523.98

СТРУКТУРА СУПЕРГРАНУЛЯЦИИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ НА СОЛНЦЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКОН

© 2004 г. В. М. Григорьев, Л. В. Ермакова, А. И. Хлыстова

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 03.04.2003 г.; принята в печать 08.08.2003 г.

Продолжено изучение возникновения волокон в биполярных активных областях на Солнце, особое внимание уделено выяснению связи этого процесса с картиной супергранульной конвекции. Использовались магнитограммы SOHO MDI и Kitt Peak, а также $H\alpha$ -фильтрограммы. Рассматривалась большая разрушающаяся активная область NOAA 8525 с 4 по 7 мая 1999 г. Границы супергранул определялись по магнитограммам как места повышенной концентрации продольного поля в фотосфере. Рассматривались волокна в центральной части активной области — в целом, они располагались вдоль границ супергранул. Изменения магнитного поля в этот период проявлялись, в первую очередь, в виде процессов “гашений” и пространственного перераспределения в соответствии с картиной образующихся супергранул. Эти факторы привели к созданию условий, необходимых для образования волокна, проходящего через всю активную область, — выравниванию линии раздела полярностей и уменьшению горизонтальных градиентов магнитного поля. Для объяснения полученных результатов предлагается гипотеза о том, что формирование компоненты магнитного поля вдоль оси волокна связано с вихревой структурой горизонтальных течений в супергранульных ячейках.

1. ВВЕДЕНИЕ

Спокойные волокна на Солнце лежат над линией раздела полярностей (ЛРП) крупномасштабного магнитного поля. Согласно представлениям, основанным на изучении структуры волокон и их окрестностей в $H\alpha$ (см. работы [1–3] и многие другие), магнитный каркас спокойных волокон представляет собой систему цепляющихся друг за друга арок, концы которых выходят из тела волокна и опускаются к фотосфере (так называемые “ноги”). Они хорошо видны в больших волокнах. Для большинства волокон в северном полушарии ноги от волокна отходят вправо независимо от того, с какой стороны на него смотреть, в южном полушарии — влево. Первые волокна названы декстральными, вторые — синистральными [2]. Существование двух типов волокон связывают с различиями в направлении закручивания магнитного поля волокна — правовинтовым и левовинтовым. Структура волокон говорит в пользу того, что магнитное поле в них должно иметь значительную осевую составляющую. Структура хромосферы показывает, что магнитное поле в ближайшей окрестности волокна направлено вдоль волокна [1]. Согласно прямым измерениям магнитного поля в фотосфере с умеренным пространственным разрешением поперечная составляющая вектора магнитного поля вблизи волокон направлена преимущественно вдоль волокна, как для случая спокойного волокна [4, 5], так и для волокон в активной области [6]. Создание

и стабильное существование таких систем могут обеспечить широкие движения.

Существует связь между положением волокна и картиной супергранульной конвекции. Анализируя расстояния между ногами волокон, Сикора [7] предположил, что они укоренены в промежутках между супергранулами, а Плётцера и Ромполът [8] подтвердили это. Упомянутые исследования не отвечали на вопрос, располагаются ли волокна в целом вдоль границ супергранул или пересекают супергранульные ячейки, опираясь основаниями на участки между ними. Григорьев и Ермакова [4, 5], восстановив картину расположения супергранул в окрестности спокойного волокна по результатам измерения лучевых скоростей на вектор-магнитографе Саянской обсерватории, пришли к выводу, что волокно располагается преимущественно над границами супергранул.

В определении физических условий в атмосфере Солнца, необходимых для формирования спокойных волокон, существенную помощь может оказать исследование волокон в активных областях, поскольку они образуются в среде с сильным, быстро изменяющимся магнитным полем, что способствует более четкому проявлению факторов, влияющих на формирование и стабильность волокон. Если активная область большая, на картах крупномасштабного магнитного поля ей будет соответствовать пара ячеек положительной и отрицательной полярности. Волокно, образовавшееся в активной

области на “пятенной стадии” ее развития, после исчезновения пятен может наблюдаться в течение нескольких солнечных оборотов на линии раздела полярностей крупномасштабного магнитного поля.

Максимов и Ермакова [9, 10] показали, что появление и стабильное существование волокна в активной области возможно в том случае, если линия раздела полярностей достаточно протяженная и простая по форме, а горизонтальные градиенты продольного магнитного поля поперек нее заключены в определенном интервале значений (подобный вывод сделан также в [6]). Для линии раздела полярностей, отделяющей головную часть биполярной активной области от хвостовой, это выполняется только на стадии разрушения активной области. Сначала могут возникнуть отдельные фрагменты волокна на участках ЛРП, где вышеупомянутые условия уже выполняются, а затем по мере старения активной области сформируется сплошное волокно. В процессе разрушения активной области средняя плотность магнитного потока уменьшается, одновременно с этим выпрямляется линия раздела полярностей. Эволюцию распределения внепятенной компоненты продольного магнитного поля по напряженностям в биполярной активной области в течение значительного периода можно описать аналитическим выражением с помощью некоторого эволюционного параметра, который зависит от среднего по активной области горизонтального градиента продольного поля [11]. Следовательно существует граничное значение фазы развития биполярной активной области, начиная с которого горизонтальные градиенты продольного магнитного поля в окрестности ЛРП попадут внутрь интервала значений, благоприятного для формирования волокна. Григорьев и Ермакова [12] установили, что волокно внутри активной области появляется, когда суммарная площадь пятен уменьшится примерно на 40%.

В процессе эволюции активной области меняется не только соотношение магнитных полей с различной напряженностью, но и пространственное распределение концентраций магнитного поля. На магнитограммах продольного поля в старых активных областях видны кольцевые структуры, отображающие конвективные ячейки супергранулы. Сохранение супергранульной конвекции на стадии формирования биполярной активной области продемонстрировали Григорьев и Селиванов [13] на основании анализа поля лучевых скоростей. Как правило, в это время ЛРП имеет сложную форму, поэтому она должна пересекать супергранулы. Возможно, в процессе разрушения активной области, когда происходит упрощение конфигурации магнитного поля, линия раздела полярностей совмещается с границами конвективных ячеек и

это является одним из условий, необходимых для формирования волокон.

В данной работе продолжено изучение образования волокон в биполярных активных областях, особое внимание уделено выяснению связи этого процесса с картиной супергранульной конвекции.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдательный материал составляют магнитограммы SOHO MDI и Kitt Peak в fits-формате и $H\alpha$ -фильтрограммы различных обсерваторий в gif-формате. Рассматривалась активная область NOAA 8525, вышедшая из-за лимба 29 апреля 1999 г. Согласно “Solar Geophysical Data”, группа достигла максимальной площади (более 300 м.д.п.) 2–3 мая, протяженность ее около 20° , конфигурация магнитного поля биполярная. Группа состояла из большого головного пятна положительной полярности и мелких пятен обеих полярностей. В дальнейшем площадь группы уменьшалась, размеры головного пятна менялись мало. В следующем обороте здесь располагается небольшое пятно положительной полярности, разрушившееся к 6 июня.

Удобное для рассмотрения структуры супергрануляции и магнитного поля гелиографическое положение активной области было 4–6 мая, когда центр ее находился в долготном интервале E15–W13 на широте N20. Использовались магнитограммы полного диска обсерватории Kitt Peak за 4–7 мая (по одной за сутки), и SOHO MDI-магнитограммы за 4, 5 и 7 мая, получаемые каждые 96 мин (данные за 6 мая, содержащиеся на сайте, ошибочны). Магнитограммы Kitt Peak имеют пространственное разрешение около $1''$, чувствительность — 5 Гс, время получения одной магнитограммы — 55 мин. Для магнитограмм MDI пространственное разрешение составляет примерно $2''$, а чувствительность — 30 Гс. $H\alpha$ -изображения обсерватории Big Bear, представленные на сайте по одному за сутки, по времени наблюдения близки к магнитограммам Kitt Peak. Качество наилучших фильтрограмм, по нашим оценкам, позволяет определять концы волокон с точностью 3–6". Рассматривались только те волокна, которые лежат на линии раздела полярностей, отделяющей головную часть активной области от хвостовой. Благодаря высокой чувствительности спектромагнитографа Kitt Peak положение линии раздела полярностей на магнитограммах определяется с высокой точностью. Границы супергранул выявлялись по магнитограммам MDI как места повышенной концентрации продольного поля в фотосфере. С помощью IDL магнитные изображения Солнца доворачивались до положения центрального меридиана,

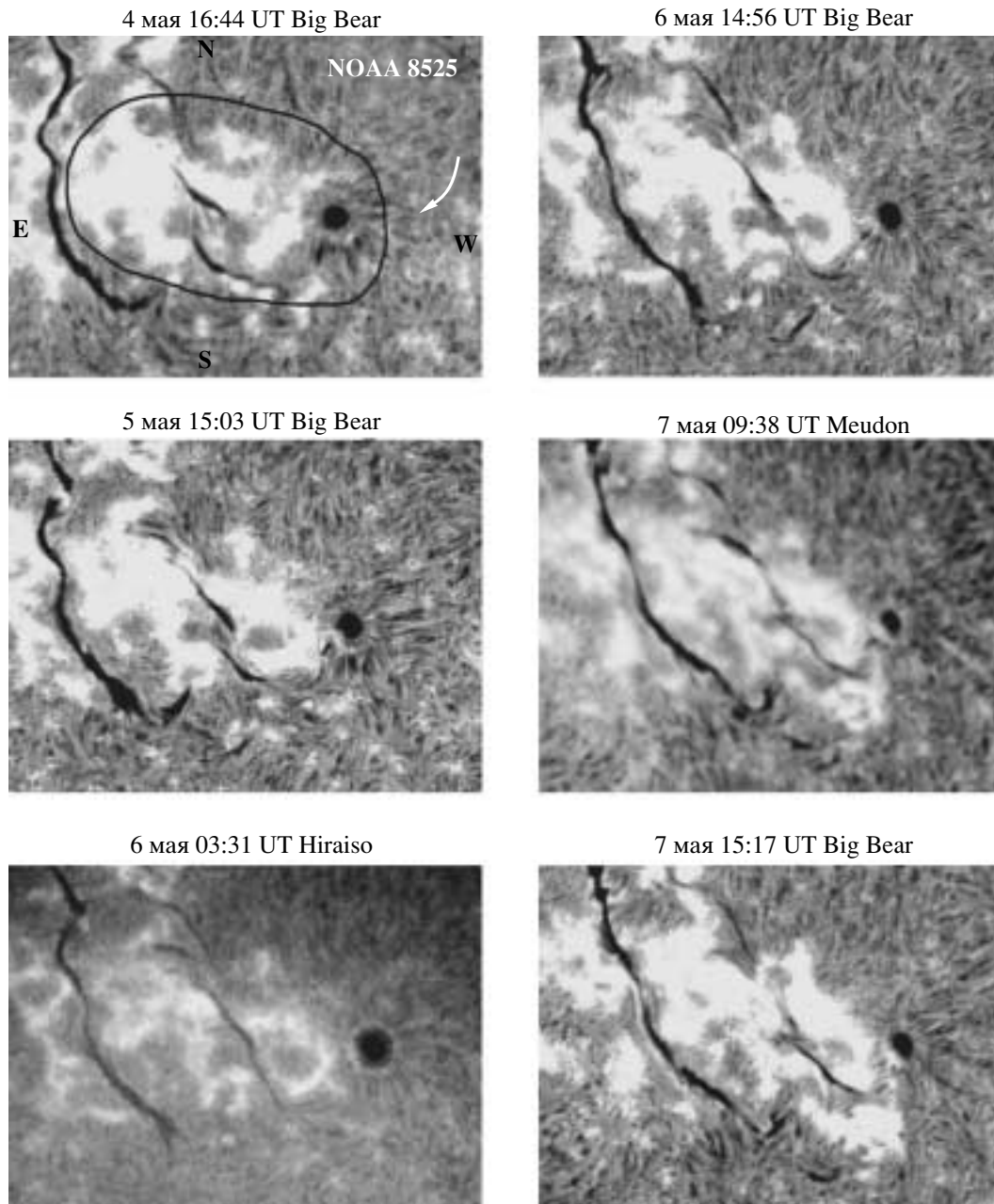


Рис. 1. H α -фильтрограммы.

чтобы можно было проводить непосредственное переналожение изображений, исключив перспективное сокращение. После этого вырезался участок размером $400'' \times 320''$, полностью включавший активную область и ее окрестности. Полученные магнитограммы просматривались в режиме Slide Show. Супергранулы на магнитограммах не всегда прорисовываются полностью, однако, используя всю временную последовательность магнитограмм, контуры супергранул можно очертить достаточно уверенно, поскольку время их жизни существенно превышает промежуток времени

между двумя последовательными магнитограммами MDI, а в процессе эволюции магнитные поля перемещаются вдоль границ супергранул.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны фрагменты H α -фильтрограмм, включающие активную область NOAA 8525, а на рис. 2 — магнитограммы продольного поля Kitt Peak. Приведенные фильтрограммы получены на различных инструментах, поэтому последовательность выглядит неоднородной. Рассматриваем только волокна, располагающиеся

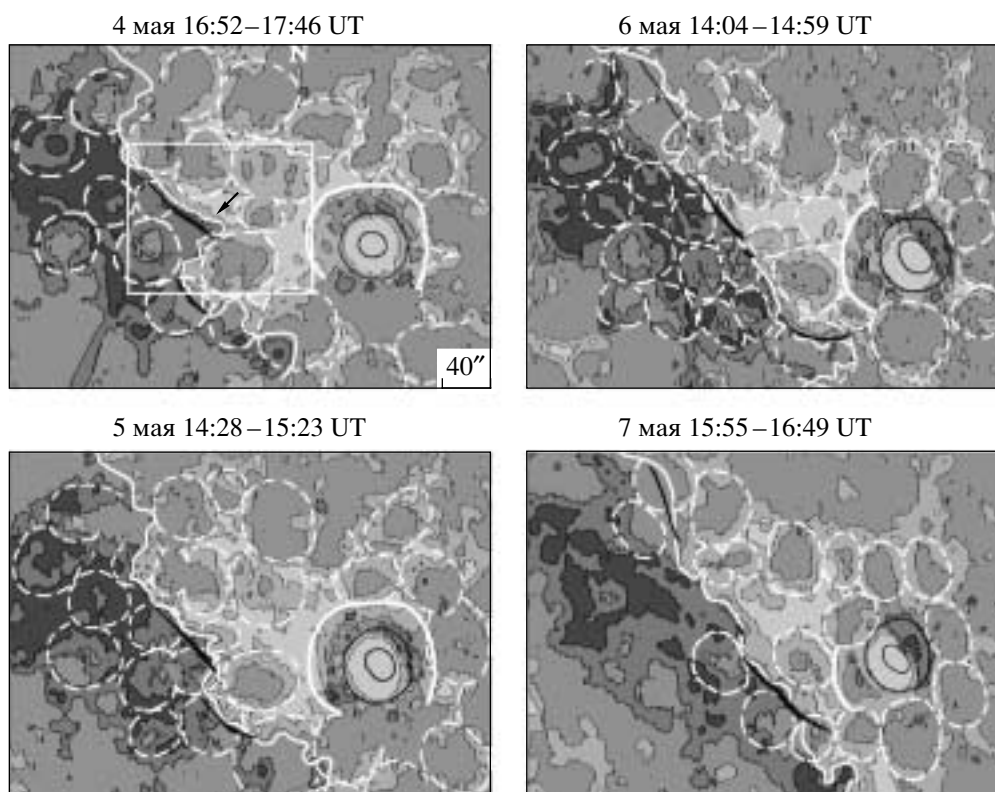


Рис. 2. Карты продольного магнитного поля Kitt Peak с изолиниями 20, 180 Гс. Черным показаны волокна по фильтограммам Vig Beag, а также контуры тени и полутени головного пятна, белым — ЛРП (тонкие сплошные линии), контуры супергранул (штриховые линии) и контуры кольцевой конвективной ячейки “ров” вокруг головного пятна (жирные сплошные линии). Остальные пояснения см. в тексте.

внутри активной области, они уверенно наблюдались с 3 по 9 мая, позднее волокно трудно выделить из-за близости к лимбу. Суммарная протяженность волокон составляла не менее половины протяженности ЛРП, длина их менялась. До 6 мая ЛРП, разделяющая головную и хвостовую части активной области, имела извилистую форму, так что два волокна, образовавшиеся вдоль нее на участках, параллельных друг другу, существенно отклонялись от меридиана. В дальнейшем ЛРП — прямая, направлена под небольшим углом к меридиану. В 03 : 31 UT 6 мая единое волокно проходило через всю активную область, впоследствии оно разделилось на фрагменты. Таким образом, волоконный канал через всю активную область сформировался к 6 мая. К этому времени суммарная площадь пятен в группе уменьшилась не менее, чем на 45%, что согласуется с полученным ранее результатом [12].

На рис. 2 поверх карт продольного магнитного поля показаны контуры супергранул. Видно, что волокна в активной области лежат вблизи границ супергранул, заканчиваясь на их стыках, длина волокон равняется первоначально 1–2 диаметрам супергранул, позднее — до 3. Имеющаяся в нашем

распоряжении последовательность магнитограмм MDI позволила рассмотреть поведение картины супергранул 4–5 мая, когда происходило выпрямление ЛРП в центре активной области.

На рис. 3 показаны фрагменты магнитограмм для центральной части активной области. Видно, что в течение этого времени образовались три супергранулы: две — в поле хвостовой полярности и одна — в головной. На рис. 3 они помечены цифрами 1–3 в порядке появления. Новые супергранулы формировались на стыках старых, непосредственно рядом с волокном, волокно при этом сохраняло свое положение вблизи границ супергранул. Супергранула 2 возникла в магнитном поле головной полярности высокой плотности, поэтому картина изменений поля в этом случае выражена более наглядно. Первые признаки появились 4 мая в 22 : 24 UT как вогнутость обеих изолиний магнитного поля, спустя 3 ч уже четко прорисовывается значительная часть контура. Последующие изменения выражались в виде увеличения области, свободной от магнитного поля, внутри супергранулы и продвижения магнитного поля головной полярности вдоль ее контура в направлении ЛРП. Одновременно увеличивался диаметр. Спустя сут-

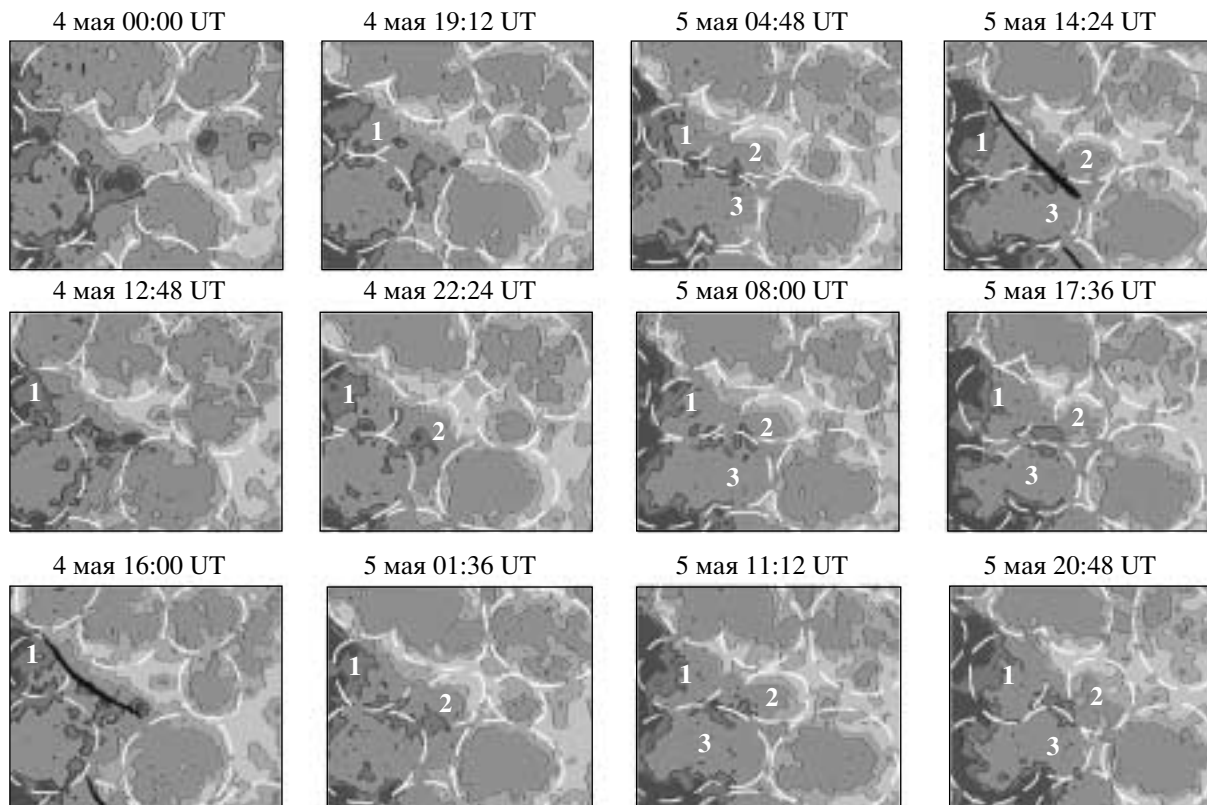


Рис. 3. Магнитограммы MDI для центральной части активной области, выделенной на рис. 2. Показаны изолинии 30, 150 Гс. Обозначения те же, что на рис. 2.

ки контур супергранулы полностью очерчен полем головной полярности. Симон и др. [14], изучая связь между фотосферным полем скоростей и распределением магнитного поля по поверхности Солнца, отмечали, что малые магнитные элементы на спокойном Солнце двигаются к границам супергранул, а затем медленно перемещаются вдоль них. Супергранулы 1 и 3 возникли в области поля хвостовой полярности. Согласно рис. 3, вдоль южной границы супергранулы 3 в направлении ЛРП также происходит продвижение магнитного поля хвостовой полярности. Можно предположить, что это же имеет место и для супергранулы 1 на уровне напряженностей магнитного поля ниже 30 Гс. Таким образом, образование супергранул вблизи ЛРП приводит к “схождению” магнитных полей противоположных полярностей, что согласно [15] является необходимым условием образования волокна.

Вместе с тем, выпрямление ЛРП связано с ослаблением продольного магнитного поля в этой области, уменьшением горизонтальных градиентов поля (рис. 2, 3). Это вызвано многочисленными процессами “гашений” магнитного потока. На слайдах видно, что 4 и 5 мая “гашения” происходили вдоль всей ЛРП, особенно бурно проявляясь в области северного волокна, где выше

плотность магнитного поля. Один из случаев иллюстрирует рис. 4; этот случай имел место 4 мая к северу от западной части северного волокна (положение данного участка в активной области показано стрелкой на рис. 2). Гасящийся полюс отрицательной полярности был локальным, тогда как полюс противоположного знака четко выделить нельзя, за исключением момента 16 : 00 UT, что характерно для “гашений” в центре активной области [16]. В остальном же была типичная картина: сближение, возрастание градиента магнитного поля в месте контакта полюсов, постепенное исчезновение отрицательного полюса. На следующий день здесь располагается центр супергранулы 2. К югу от этого волокна “гашения” наблюдались в промежутки времени 01 : 36–12 : 48 и 17 : 36–22 : 24 UT. 5 мая этот участок соответствует центру новой супергранулы 3. После образования новых супергранул “гашения” происходили при столкновении продвигающихся вдоль их границ в направлении ЛРП противоположных полюсов. С “гашениями” связывают как само существование волокон, так и их нестабильность [16, 17]. Они могут играть роль в создании спиральной структуры магнитного поля волокон.

Представляет интерес изменение картины конвекции в окрестности головного пятна, связанное с

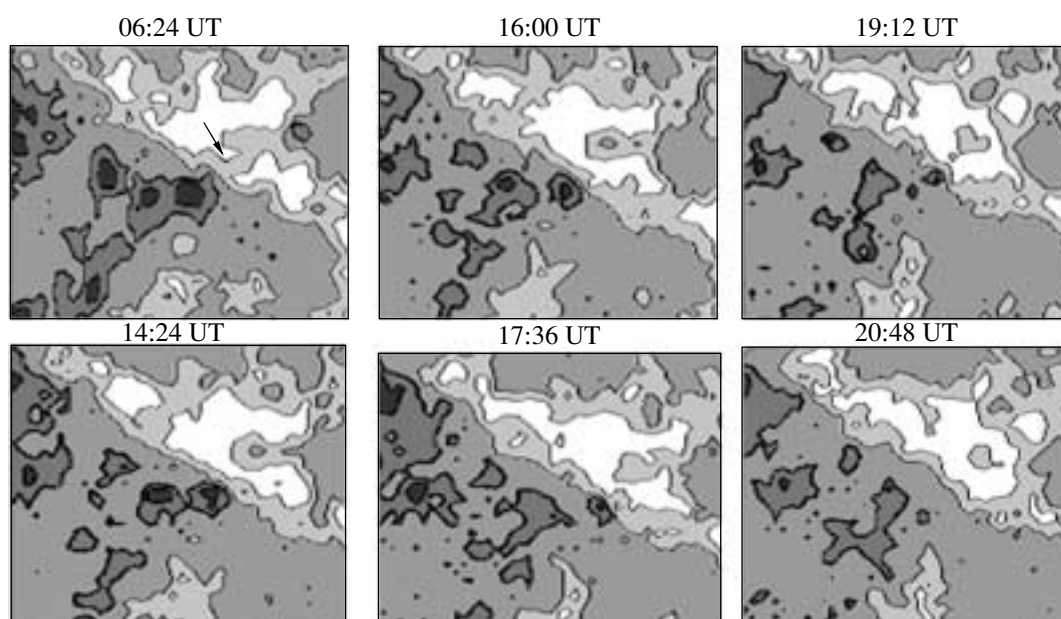


Рис. 4. Магнитограммы MDI (показаны изолинии 30, 150 Гс) за 4 мая, иллюстрирующие “гашение” магнитного потока.

эволюцией активной области (рис. 2). В начальный период — 4 и 5 мая — на магнитограммах продольного поля вокруг головного пятна по дуге протяженностью около 270° , виден “ров” — область пониженных значений напряженности продольного поля, через которую происходит перемещение малых элементов поля обеих полярностей от пятна к окружающим полям [18, 19]. Это образование представляет собой кольцеобразную конвективную ячейку, образующуюся вокруг развитого пятна, которая переносит избыток тепла в основании пятна наружу, чем способствует его стабилизации [20, 21]. В последующие два дня происходило постепенное разрушение “рва” вокруг головного пятна; 7 мая в 15 : 55–16 : 49 UT протяженность дуги “рва” сократилась до 60° . Одновременно с этим восстанавливалась супергранулярная конвекция в непосредственной близости к пятну (рис. 2). Существенных изменений формы и площади головного пятна в этот период не было. Преимущественно “рвы” связаны с разрушающимися пятнами, однако в литературе отмечено немало случаев существования “рва” вокруг растущих пятен. Образование “рва” в конце стадии роста главных пятен, по размеру превышающих площадь супергранулы, описано в [13, 22]. По-видимому, с образованием такой ячейки заканчивается формирование большого пятна. В рассматриваемом случае “ров” впервые виден 3 мая, вблизи максимума развития активной области. Можно предположить, что образование и разрушение “рва” не просто диагностирует пятно, а характеризует мощность и состояние всей трубки потока, образующей актив-

ную область, т.е. является характеристикой фазы развития активной области.

Таким образом, на стадии разрушения биполярной активной области в центральной ее части на линии контакта магнитных полей противоположной полярности происходит потеря магнитного потока посредством “гашений” с одновременным пространственным перераспределением потока под действием движений в образующихся супергранулах. Эти факторы приводят к выравниванию ЛРП и уменьшению горизонтальных градиентов магнитного поля. В окрестности ЛРП формируется протяженный волоконный канал. Образующиеся волокна располагаются вдоль границ супергранул.

Известен целый ряд наблюдательных условий, необходимых для формирования и существования волокна. Мы подчеркиваем три из них, которые непосредственно связаны со структурой магнитного поля волокна.

1. Волокна располагаются вдоль линии раздела полярностей магнитного поля.

2. Существует направленная вдоль линии раздела полярностей компонента магнитного поля, связанная с волокнами, о чем говорит структура волоконцев хромосферных розеток вблизи волокон и каналов волокон [2], а также прямые измерения вектора магнитного поля в фотосфере [4–6].

3. Структура ячеек супергрануляции вблизи волокна представляет почти упорядоченную картину, супергранулы выстраиваются вдоль линии раздела полярностей [4, 5] (это следует также из данной работы).

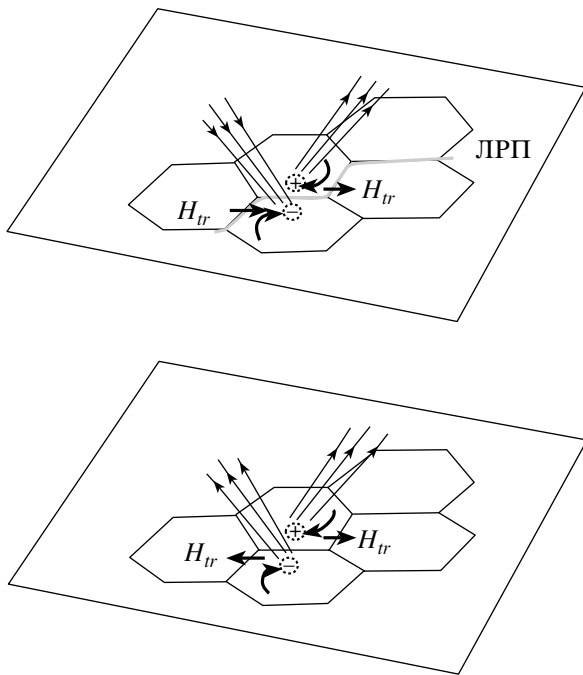


Рис. 5. Схема формирования осевой компоненты магнитного поля волокна под действием вихревой составляющей движений в супергранулах.

Мы выдвигаем для объяснения этих наблюдательных фактов гипотезу о том, что формирование компоненты магнитного поля вдоль ЛРП связано с вихревой структурой горизонтальных течений в супергранульных ячейках (рис. 5). Вихревая структура в супергрануле возникает под действием сил Кориолиса на горизонтальную дивергенцию потока вещества. Если супергранулы расположены вдоль ЛРП, то сходящиеся на ней вихревые потоки от соседних супергранул сжимают магнитные поля противоположных знаков, что приводит к исчезновению вертикальной компоненты поля, о чем свидетельствуют наблюдаемые “гашения” магнитного потока. Это вызывает уменьшение градиента магнитного поля на ЛРП (необходимый критерий образования волокон [9]). В то же время, поскольку вихревая компонента течений соседних супергранул по обеим сторонам ЛРП имеет противоположные направления движения, происходит усиление компоненты магнитного поля, направленной вдоль ЛРП. Так обеспечивается наличие компоненты поля вдоль волокна. Основанием для такой гипотезы, кроме наших выводов о структуре ячеек супергрануляции, является теоретическое рассмотрение ячеистой конвекции во вращающейся жидкости [23]. Первое указание на вращение ячеек сделал Кубичела [24]. Недавно на основе современной технологии Дюваль и Жизон [25] подтвердили влияние сил Кориолиса на супергрануляционные течения. Они сделали оценку величины

curl/div и получили ее изменение с широтой от 0 на экваторе до ± 0.07 на широтах $\pm 60^\circ$. Кроме того, исследование движений в супергранулах по адвекции мезогранул [26] дало для горизонтальных скоростей величины 500–1000 м/с, что является энергетически более весомым аргументом для возможности воздействия движений вещества на магнитное поле по сравнению с известными ранее скоростями 350–500 м/с.

Наша гипотеза требует дальнейшего развития, но нужно заметить, что она может естественно объяснить ряд дополнительных свойств: исчезновение магнитных узлов на ЛРП, отсутствие волокон в экваториальной зоне и мощные волокна на высоких широтах.

Работа выполнена при поддержке гранта государственной поддержки ведущих научных школ НШ-733.2003.2 и программы “Астрономия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Foukal, *Solar Phys.* **19**, 59 (1971).
2. S. F. Martin, R. Bilimora, and P. W. Tracadas, *Solar Surface Magnetism*, Ed. by R. J. Rutten and C. J. Schrijver, (Kluwer Acad. Publ., Netherlands, 1994), p. 303.
3. S. F. Martin, *Solar Phys.* **182**, 107 (1998).
4. В. М. Григорьев, Л. В. Ермакова, *Современные проблемы солнечной цикличности*, Ред. В. И. Макаров, В. Н. Обридко и др. (ГАО РАН, СПб., 1997), с. 317.
5. V. M. Grigoryev and L. V. Ermakova, *Astron. and Astrophys. Trans.*, **17**, 355 (1999).
6. Wang and W. Li, *New Perspectives of Solar Prominences*, ASP Conf. Ser. (Eds. D. Webb, D. Rust, and B. Schmieder, 1998), V. 150, p. 98.
7. J. Sykora, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **19**, 37 (1968).
8. S. Plocenia, and B. Rompolt, *Solar Phys.* **29**, 399 (1973).
9. В. П. Максимов, Л. В. Ермакова, *Астрон. журн.* **62**, 558 (1985).
10. В. П. Максимов, Л. В. Ермакова, *Астрон. журн.* **64**, 841 (1987).
11. L. V. Ermakova, *Solar Phys.* **191**, 161 (2000).
12. В. М. Григорьев, Л. В. Ермакова, *Новый цикл активности Солнца: наблюдательный и теоретический аспекты*, Ред. В. И. Макаров, В. Н. Обридко и др. (ГАО РАН, СПб., 1998), с. 233.
13. V. M. Grigoryev, and V. L. Selivanov, *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **15**, 87 (1986).
14. G. W. Simon, A. M. Title, K. P. Topka *et. al.*, *Astrophys. J.* **327**, 964 (1988).
15. S. Martin, *Dynamics of Quiescent Prominences*, Lecture Notes in Physics, Ed. by Ruzdjak and E. Tandberg-Hanssen, (Springer-Verlag, 1990), V. 363, p. 1.
16. S. F. Martin, S. H. B. Livi, and J. Wang, *Austral. J. Phys.* **38**, 929 (1985).
17. J. Wang, Z. Shi, and S. F. Martin, *Astron. and Astrophys.* **316**, 201 (1996).

18. D. Vrabc, *Chromospheric Fine Structure*, Proc. from IAU Symp. № 56 (Ed. R. G. Athey, Reidel, Dordrecht, 1974), p. 201.
19. K. Harvey, and J. Harvey, *Solar Phys.* **28**, 61 (1973).
20. F. Meyer, H. U. Schmidt, N. D. Weise, *et al.*, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **169**, 35 (1974).
21. A. Nye, D. Brunning, and B. J. Labonte, *Solar Phys.* **115**, 25 (1988).
22. L. V. Ermakova, *The magnetic and velocity fields of solar active regions*, ASP Conf. Ser. (Eds H. Zirin, G. Ai, and H. Wang, 1993), V. 46, p. 75.
23. G. Veronis, *J. Fluid. Mech.* **5**, 401 (1959).
24. A. Kubicela, *Solar Activity and Related Interplanetary and Terrestrial Phenomena*, Proc. First European Astron. Meeting, Ed. by Xanthakis (Springer-Verlag, Berlin, 1973), p. 123.
25. T. L. Duvall, Jr. and L. Gizon, *Solar Phys.* **192**, 177 (2000).
26. R. A. Shine, G. W. Simon, and N. E. Hurlburt, *Solar Phys.* **193**, 313 (2000).

The Pattern of Supergranular in a Solar Active Region and the Formation of Filaments

V. M. Grigor'ev, L. V. Ermakova, and A. I. Khlystova

The formation of filaments in solar bipolar active regions is further investigated. Particular attention is given to the relationship between this process and the pattern of supergranular convection. SOHO MDI and Kitt Peak magnetograms and $H\alpha$ filtergrams are used. The large decaying active region NOAA 8525 is considered over the period May 4–7, 1999. The boundaries of supergranules are identified as concentrations of the line-of-sight photospheric field in the magnetograms. Filaments in the central part of the active region are studied; by and large, they were aligned with the supergranule boundaries. Variations in the magnetic field during that period were manifest primarily in the the form of “cancellations” and spatial-redistribution processes consistent with the pattern of developing supergranules. These factors engendered the conditions for the formation of a filament stretched across the entire active region; i.e., the straightening of the line dividing the polarities and reduction of the horizontal gradients of the magnetic field. One possible explanation of the results is that the magnetic-field component along the filament axis is associated with the vortical structure of horizontal flows in the supergranulation cells.