

**ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТЕЧЕНИЙ ФОТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ  
ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ\*****HORIZONTAL COMPONENT OF PHOTOSPHERIC PLASMA FLOWS DURING  
THE EMERGENCE OF ACTIVE REGIONS ON THE SUN****А.И. Хлыстова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, hlystova@iszf.irk.ru***A.I. Khlystova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, hlystova@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Анализируются горизонтальные течения фотосферной плазмы на начальной стадии появления активных областей в фотосфере Солнца по данным SOHO/MDI. Детально рассмотрены четыре активные области, возникающие на краю солнечного диска. Обнаружено, что при появлении магнитного потока в горизонтальном поле скоростей формируются протяженные области высоких доплеровских скоростей разного знака. Наблюдаемые течения возникают в начале появления активных областей и присутствуют до нескольких часов. Значения средних (внутри изолиний  $\pm 500$  м/с) и максимальных доплеровских скоростей достигают 800–970 и 1410–1700 м/с соответственно. Выявлена асимметрия между скоростными структурами ведущей и последующей полярности. Скоростные структуры, расположенные в области ведущей магнитной полярности, более мощные и существуют дольше, чем в последующей. Асимметрия средних и максимальных доплеровских скоростей достигает 290–460 и 710–940 м/с соответственно. Дается интерпретация наблюдаемых течений.

**Ключевые слова:** активные области, магнитные поля, поля скоростей.

**Abstract.** The dynamics of horizontal photospheric plasma flows during the first hours after the emergence of active regions in the solar photosphere have been analyzed using SOHO/MDI data. Four active regions emerging near the solar limb have been considered. It has been found that extended regions of high Doppler velocities with different signs are formed as the magnetic flux emerges in the horizontal velocity field. The flows appear when active regions start emerging and exist for a few hours. The peak values of the mean (inside the  $\pm 500$  m/s isolines) and maximum Doppler velocities are up to 800–970 and 1410–1700 m/s respectively. The asymmetry has been detected between velocity structures of the leading and following polarities. Velocity structures located in the region of leading magnetic polarity are more powerful and exist for a longer period of time than those in the regions of following polarity. The asymmetry for the mean and maximum Doppler velocities is up to 290–460 and 710–940 m/s respectively. An interpretation of the observable flows of photospheric plasma is given.

**Keywords:** active regions, magnetic fields, velocity fields.

**ВВЕДЕНИЕ**

Измерения доплеровских скоростей в фотосфере в возникающих активных областях позволили установить присутствие подъема плазмы в вершинах выходящих магнитных петель [Brants, 1985a, b; Tabbell et al., 1989; Lites et al., 1998; Strous, Zwaan, 1999; Kubo et al., 2003; Guglielmino et al., 2006; Grigor'ev et al., 2007; Grigor'ev et al., 2009] и опускания плазмы в местах наибольшей концентрации магнитного потока [Гопасюк, 1967, 1969; Kawaguchi, Kitai, 1976; Bachmann, 1978; Zwaan et al., 1985; Brants, 1985a, b; Brants, Steenbeek, 1985; Lites et al., 1998; Solanki et al., 2003; Lagg et al., 2007; Xu et al., 2010].

Горизонтальные скорости в фотосфере, сопровождающие появление активных областей, оценивались косвенно. В работе [Frazier, 1972] было показано, что узлы фотосферного магнитного поля (21 событие) движутся вдоль арочной волоконной системы (arch filament system, AFS) со скоростями 0.1–0.4 км/с. Автор работы [Schoolman, 1973] по наблюдению

молодой активной области обнаружил, что магнитные элементы движутся в случайных направлениях со скоростями 0.4–1.0 км/с. В работе [Barth, Livi, 1990] были измерены скорости расхождения противоположных полярностей для 45 биполярных пар в молодой активной области и получены значения скоростей 0.5–3.5 км/с, уменьшающиеся во времени. При рассмотрении выхода магнитного потока в развивающейся активной области [Strous, Zwaan, 1999] было найдено, что основания магнитных петель расходятся со средней скоростью 1.4 км/с. Авторы работы [Grigor'ev et al., 2009] рассчитали скорости перемещения внешних границ фотосферного магнитного потока в активной области NOAA 10488. Значения скоростей в конце первого часа составили 2–2.3 км/с, по мере выхода магнитного потока скорости уменьшались и через полтора часа достигли 0.3 км/с.

Высокие горизонтальные скорости в фотосфере наблюдаются при появлении эфемерных активных областей. В работе [Harvey, Martin, 1973] было обнару-

\* Впервые статья опубликована на английском языке в журнале "Solar Physics". 2013. V. 284. P. 343–361. На русском языке публикуется впервые по лицензии издательства.

жено, что в первые 30 мин появления эфемерных активных областей основания магнитных петель расходятся со скоростями 5 км/с. В следующие 6 ч скорости расхождения спадают до 0.7–1.3 км/с и в дальнейшем продолжают уменьшаться. В работе [Hagenaar, 2001] было найдено, что скорости расхождения внешних границ эфемерных активных областей достигают 5.5 км/с, при этом отмечается тенденция уменьшения скоростей во времени. Авторы работы [Otsuji et al., 2011] нашли, что при появлении больших магнитных потоков скорости расхождения противоположных полярностей меньше 1 км/с, для малых они достигают 4 км/с.

Интересные результаты были получены из анализа горизонтальных течений в развивающихся активных областях по перемещению гранул. В работе [Strous et al., 1996] были обнаружены крупномасштабные горизонтальные расходящиеся движения гранул, сравнимые с общим дрейфом магнитных полярностей. Авторы объясняют это тесным взаимодействием грануляции и магнитных полей. Авторы работы [Kozu et al., 2005, 2006] нашли расходящиеся течения, локализующиеся между основаниями выходящих магнитных петель. По их мнению, это конвективные течения, которые способствуют выходу магнитного потока из глубоких слоев. Авторы также допускают, что наблюдаемые течения формируются выходящим магнитным потоком. Отметим, что в перечисленных работах начальная стадия формирования активных областей не рассматривалась.

В работе [Khlystova, 2011] построена центрально-линейная зависимость отрицательных доплеровских скоростей при появлении активных областей в фотосфере Солнца. Впервые рассмотрены доплеровские скорости течений фотосферной плазмы на начальной стадии формирования активных областей. В представляемой работе проводится детальный анализ фотосферных доплеровских скоростей в активных областях, возникающих вблизи лимба.

## 1. ДАННЫЕ

В работе использовались магнитограммы и доплерограммы полного диска Солнца в фотосферной линии NiI 6768 Å и изображения в континууме, полученные на борту космической обсерватории SOHO/MDI [Scherrer et al., 1995]. Временное разрешение магнитограмм и доплерограмм составляет 1 мин, континуума — 96 мин. Пространственное разрешение данных 4", размер пикселя соответствует 2". Уровень калибровки магнитограмм 1.8.2 [Ulrich et al., 2009].

Из временной последовательности данных выделялась область выхода магнитного потока с учетом ее смещения вследствие солнечного вращения. Приблизительное смещение области рассчитывалось по закону дифференциального вращения для фотосферных магнитных полей [Snodgrass, 1983]. Точное изменение координат исследуемого участка определялось по двум соседним во времени магнитограммам посредством кросскорреляционного анализа. Точное пространственное совмещение данных достигалось за счет выделения фрагментов с одинако-

выми гелиографическими координатами из магнитограмм, доплерограмм и континуума, полученных в одно время. Для доплерограмм проводилось скользящее усреднение по пяти изображениям с целью уменьшения вклада пятиминутных колебаний в сигнал скорости. Дифференциальное вращение Солнца и другие факторы, искажающие сигнал доплеровской скорости, устранялись по методике [Grigor'ev et al., 2007]. В соответствии с ней проводилось усреднение трех верхних и трех нижних строк вырезанной области и делалось линейное сглаживание усредненных строк. В результате получались верхняя и нижняя строки массива скоростей вращения Солнца. Для получения внутреннего поля массива выполнялась линейная интерполяция между верхними и нижними пикселями сглаженных строк. Полученный массив скоростей солнечного вращения вычитался из исходного.

Выделенные и подготовленные фрагменты использовались для расчета анализируемых физических величин. Для проведения морфологического анализа протекающих процессов проводилась визуализация данных и наложение изолиний. Для активных областей определялись следующие параметры.

- $\theta$  — гелиоцентрический угол, характеризующий удаление возникающей активной области от центра диска (также это угол между нормалью к поверхности и лучом зрения на выходящий магнитный поток),

$$\theta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right), \quad (1)$$

где  $r$  — расстояние от центра солнечного диска до места появления активной области,  $R$  — радиус Солнца.

- $\Phi_{\max}$  — полный беззнаковый магнитный поток в максимуме развития активной области, который рассчитывался внутри изолиний  $\pm 60$  Гс с учетом эффекта проекции в предположении, что вектор магнитного поля перпендикулярен поверхности.

$$\Phi_{\max} = S_0 \sum_{i=1}^N \frac{|B_i|}{\cos\theta_i}, \quad (2)$$

где  $N$  — число пикселей, удовлетворяющих условию  $|B_i| > 60$  Гс;  $S_0$  — площадь солнечной поверхности внутри пикселя в центре солнечного диска, [см<sup>2</sup>];  $B_i$  — продольное магнитное поле в  $i$ -м пикселе, [Гс];  $\theta_i$  — гелиоцентрический угол  $i$ -го пикселя.

- $d\Phi/dt$  — скорость роста полного беззнакового магнитного потока в первые 12 часов появления активной области.

- $V_{\text{mean-}}$  и  $V_{\text{mean+}}$  — наибольшие значения средних отрицательных и положительных доплеровских скоростей внутри изолинии  $-500$  и  $+500$  м/с в рассматриваемый период. Была выбрана изолиния 500 м/с, потому что она хорошо очерчивает наблюдаемые доплеровские скоростные структуры и основной вклад конвективных течений находится ниже этого уровня. Надо отметить, что в области расчета значения доплеровских скоростей не всегда превышали 500 м/с, для этих моментов времени средние скорости не определялись.

- $V_{\max-}$  и  $V_{\max+}$  — наибольшие значения абсолютных максимальных отрицательных и положительных доплеровских скоростей в рассматриваемый период.
- $V_{\text{sep}}$  — средняя скорость перемещений внешней границы фотосферного магнитного потока. Она рассчитывается на двухчасовых промежутках времени при наибольших значениях доплеровских скоростей с учетом эффекта проекции:

$$V_{\text{sep}} = \frac{1}{2(T_2 - T_1)} \left( \frac{L_2}{\cos\theta_2} - \frac{L_1}{\cos\theta_1} \right), \quad (3)$$

где  $T_2 - T_1$  — рассматриваемый интервал времени, [с];  $L_1$  и  $L_2$  — расстояния между двумя внешними границами фотосферных магнитных потоков противоположных полярностей в плоскости изображения для моментов времени  $T_1$  и  $T_2$ , [М];  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — гелиоцентрические углы, соответствующие положению активной области в моменты времени  $T_1$  и  $T_2$ . Составляющая скорости горизонтального перемещения фотосферного магнитного потока в сигнале доплеровской скорости по лучу зрения будет рассчитываться как

$$V_{\text{sep}}^l = V_{\text{sep}} \sin\theta. \quad (4)$$

## 2. ИССЛЕДУЕМЫЕ АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ

Детально изучены четыре активные области, возникающие вблизи лимба (рис. 1–4), которые в первые часы появления имеют высокую скорость роста магнитного потока (табл. 1). Из-за эффекта проекции вектора магнитного поля на луч зрения возникновение активных областей начинается с появления одной, затем второй магнитной полярности (верхняя панель на рис. 1–4). По этой же причине граница, где магнитное поле меняет знак, не является линией раздела полярностей, проходящей между основаниями выходящей  $\Omega$ -образной магнитной петли. Положение линии раздела полярностей можно оценить косвенно по положению пор. В рассматриваемых активных областях они возникают в обеих полярностях (нижняя панель на рис. 1–4). В начале выхода магнитного потока линия раздела полярностей должна проходить посередине между ведущей и последующей порами с небольшим смещением в сторону последующей поры из-за геометрической асимметрии выходящего магнитного потока (рис. 4, а в [van Driel-Gesztelyi, Petrovay, 1990]). Таким образом, наблюдаемая граница смены знака магнитного поля не является линией раздела полярностей. Она всегда пространственно совпадает с полярностью, расположенной ближе к центру диска.

В возникающих активных областях наблюдается проявление спиральности и геометрической асимметрии выходящих магнитных полей. Ось, соединяющая противоположные полярности активных областей, разворачивается по мере выхода магнитных потоков, что связано со спиральностью магнитного поля (верхняя панель на рис. 1–4). Геометрическая асимметрия проявляется в том, что ведущая полярность движется от места появления значительно быстрее, чем последующая (рис. 5–8, а). На всех про-

странственно-временных диаграммах внизу расположена последующая полярность, сверху — ведущая.

## 3. ДОПЛЕРОВСКИЕ СКОРОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ

Данные SOHO/MDI имеют низкое пространственное разрешение, что дает возможность наблюдать крупномасштабные течения плазмы. Рассматриваемые активные области возникают в разных секторах солнечного диска, но морфология доплеровских скоростных структур в первые часы выхода магнитного потока схожа. Наблюдается усиление отрицательных доплеровских скоростей (движение к наблюдателю) на границе, где магнитное поле меняет знак. Из-за эффекта проекции вектора магнитного поля на луч зрения эта скоростная структура локализуется в полярности, расположенной ближе к центру диска. В полярности, расположенной ближе к лимбу, располагается область усиленных положительных доплеровских скоростей (движение от наблюдателя) (рис. 1–4). Области высоких доплеровских скоростей внутри изолиний  $\pm 1000$  м/с занимают значительные площади (в отдельные периоды времени — до 50 % площади доплеровской скоростной структуры внутри изолинии 500 м/с). Они локализируются в центральной части доплеровских скоростных структур и существуют продолжительное время.

Характер изменения скоростных структур во времени демонстрируют пространственно-временные диаграммы (рис. 5–8). Разрезы ориентированы вдоль оси выходящих биполярных пар, их положение отмечено черной линией на магнитограммах на рис. 1–4. При развитии активных областей наблюдается разворот оси биполярных пар, поэтому в самом начале выхода магнитного потока на разрезы не всегда попадают обе полярности с доплеровскими скоростными структурами. Последние локализируются в пределах выходящего магнитного потока, их нет в окружающих областях спокойного Солнца (рис. 5–8, а). Они формируются в начале выхода магнитного потока, занимают протяженную область и устойчиво существуют до нескольких часов (рис. 5–8, б, табл. 2). Области доплеровских скоростей разного знака возникают не одновременно: в начале выхода магнитного потока они примыкают друг к другу, затем расходятся вместе с противоположными полярностями.

В наблюдаемых структурах значения доплеровских скоростей возрастают постепенно и достигают наибольших значений примерно на половине времени существования скоростных структур (рис. 5–8, в). Средние доплеровские скорости внутри изолиний  $\pm 500$  м/с возрастают до 800–970 м/с, абсолютные максимальные значения доплеровских скоростей достигают 1410–1700 м/с (табл. 2). Наибольшие значения горизонтальных доплеровских скоростей при появлении активных областей существенно превосходят наибольшие доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца (рис. 2 при  $\theta > 50^\circ$  в работе [Khlystova, 2013]) и вклад скорости горизонтального перемещения фотосферного магнит-

Таблица 1

Рассматриваемые активные области

Активная область	Время появления	Координаты в начале появления	$\theta, ^\circ$	$\Phi_{\max}, \text{Мкс}$	$d\Phi/dt, \text{Мкс/ч}$
9037	06.10.2000 – 06:08 UT	21.0° N; 59.0° E	61°	$1.39 \cdot 10^{22}$	$1.17 \cdot 10^{20}$
8536	05.06.1999 – 00:51 UT	24.0° S; 65.0° E	66°	$1.88 \cdot 10^{22}$	$1.13 \cdot 10^{20}$
8635	07.14.1999 – 12:13 UT	42.0° N; 47.0° W	57°	$>2.97 \cdot 10^{21}$	$9.50 \cdot 10^{19}$
9064	06.26.2000 – 11:16 UT	21.0° S; 46.0° W	51°	$>3.61 \cdot 10^{21}$	$1.63 \cdot 10^{20}$

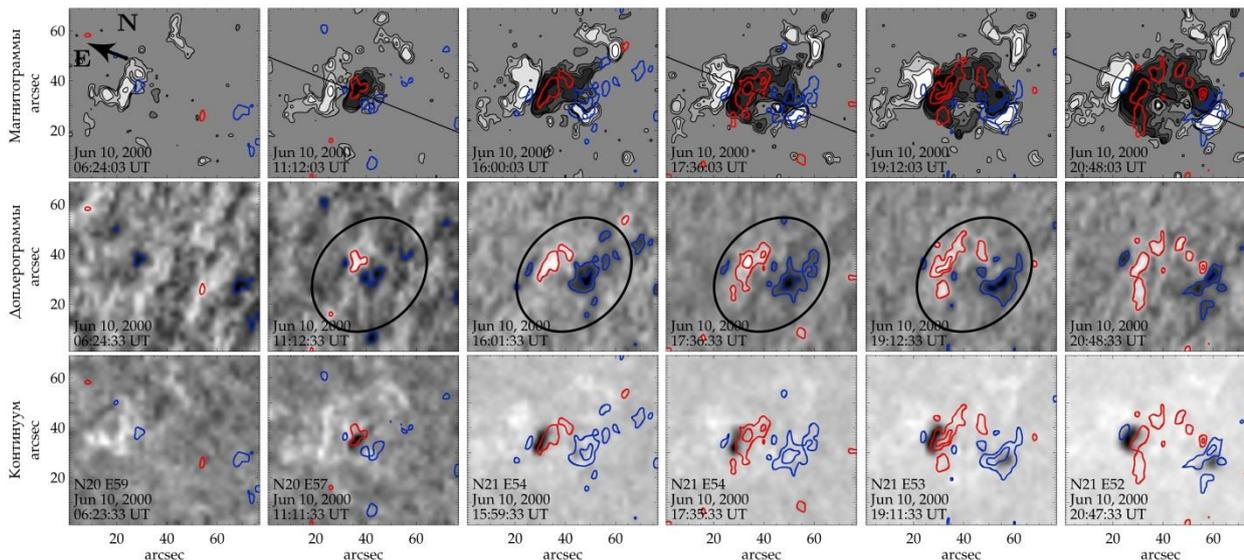


Рис. 1. Активная область NOAA 9037, появившаяся 10 июня 2000 г. на участке с координатами 21.0° N, 59.0° E. На магнитограммы (изолинии ±60, 100, 150, 300 Гс), доплерограммы и континуум наложены изолинии доплеровских скоростей. Синие изолинии соответствуют -500, -1000 м/с (движение плазмы к наблюдателю), красные изолинии соответствуют +500, +1000 м/с (движение плазмы от наблюдателя). Овалом обозначены формирующиеся скоростные структуры. В левом верхнем углу черной стрелкой показано направление от центра солнечного диска на выходящий магнитный поток. Черной прямой линией на верхней панели отмечено положение разреза на пространственно-временных диаграммах. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

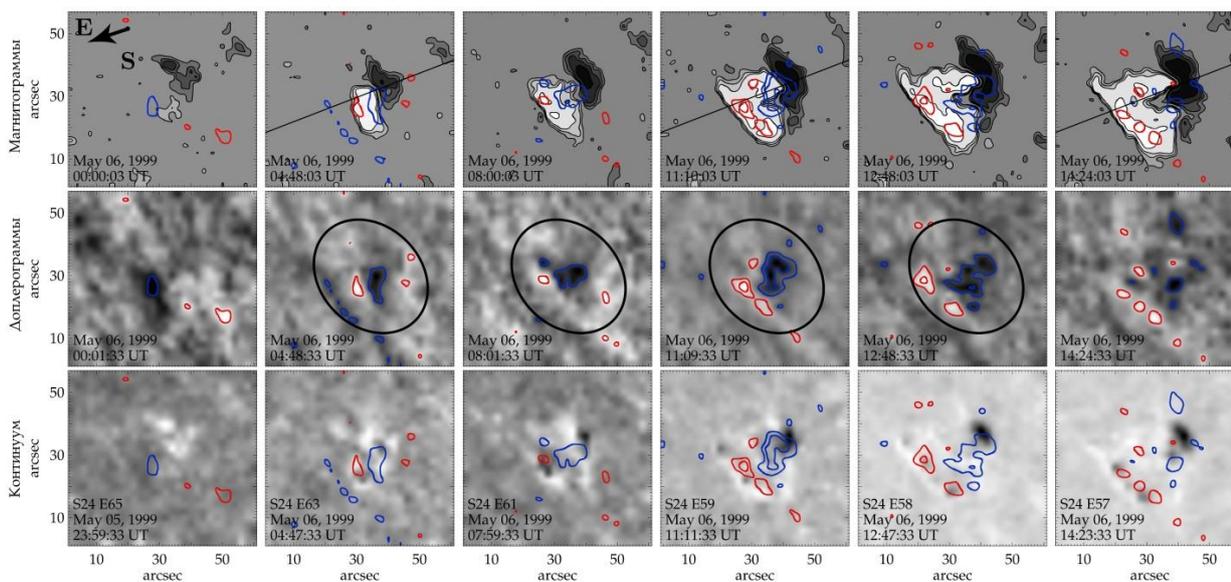


Рис. 2. Активная область NOAA 8536, появившаяся 6 мая 1999 г. на участке с координатами 24.0° S, 65.0° E. Обозначения те же, что на рис. 1. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

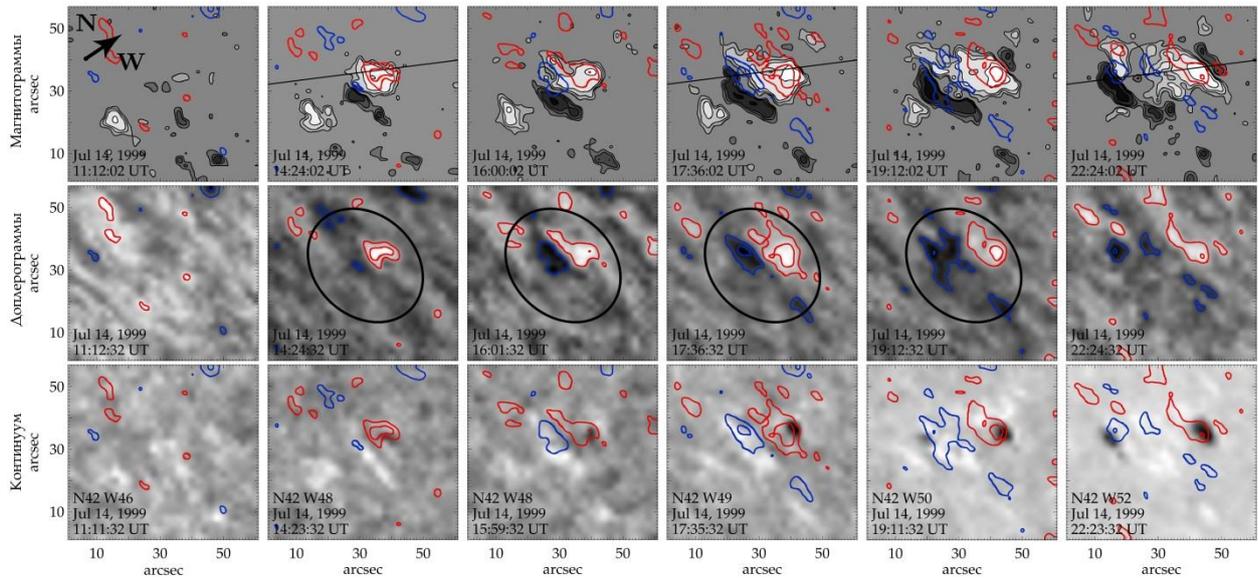


Рис. 3. Активная область NOAA 8635, появившаяся 14 июля 1999 г. на участке с координатами 42.0° N, 47.0° W. Обозначения те же, что на рис. 1. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

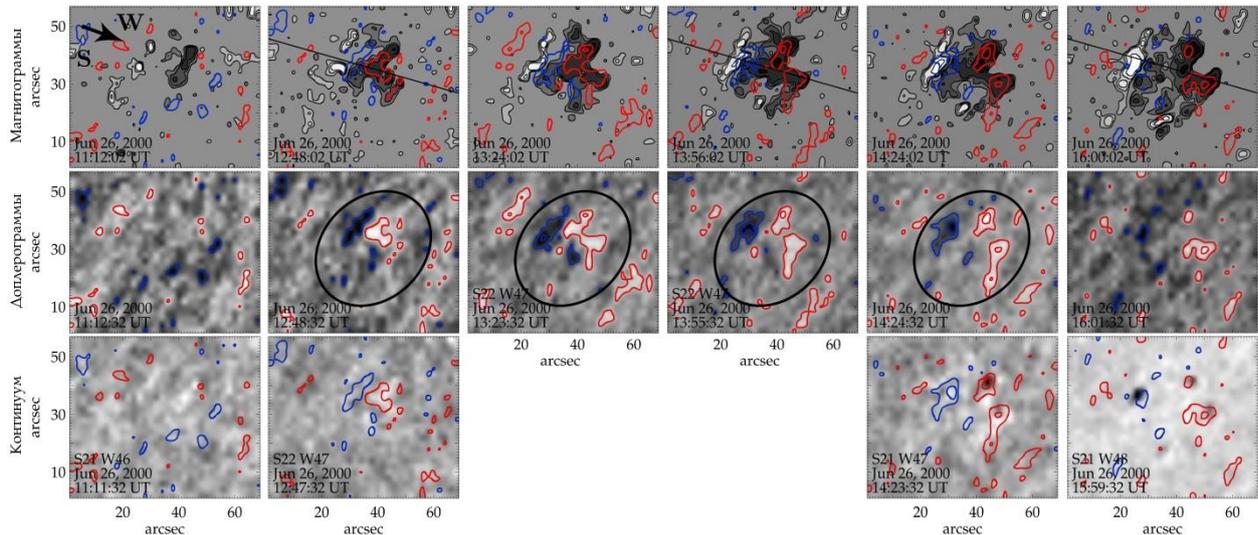


Рис. 4. Активная область NOAA 9064, появившаяся 26 июня 2000 г. на участке с координатами 21.0° S, 46.0° W. Обозначения те же, что на рис. 1. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Таблица 2

Наибольшие значения средних  $V_{\text{mean} \rightarrow}$ ,  $V_{\text{mean}+}$  и абсолютных максимальных  $V_{\text{max} \rightarrow}$ ,  $V_{\text{max}+}$  доплеровских скоростей, размер  $d$  и время существования  $t$  скоростных структур при появлении активных областей

Активная область	Отрицательные доплеровские скорости				Положительные доплеровские скорости			
	$V_{\text{mean} \rightarrow}$ , м/с	$V_{\text{max} \rightarrow}$ , м/с	$d^1$ , ММ	$t$ , ч	$V_{\text{mean}+}$ , м/с	$V_{\text{max}+}$ , м/с	$d^1$ , ММ	$t$ , ч
9037	-810	-1640	14	15	850	1630	15	13
8536	-970	-1700	18	14	830	1560	10	9
8635	-830	-1410	16.5	10	960	1660	15	13.5
9064	-800	-1520	9	4.5	810	1650	16	10

Размер скоростной структуры внутри изолинии -500 или +500 м/с вдоль разрезов на рис. 5–8, б с учетом эффекта проекции

Таблица 3

Средние скорости перемещения внешних границ фотосферного магнитного потока  $V_{sep}$ , вклад скорости горизонтального перемещения фотосферного магнитного потока в сигнал доплеровской скорости по лучу зрения  $V_{sep}^l$  и промежутки времени  $\Delta T$ , на которых проводился расчет этих скоростей

Активная область	$\Delta T$	$V_{sep}$ , м/с	$V_{sep}^l$ , м/с
9037	2000.06.10 17:10–19:10 UT	450	370
8536	1999.05.06 10:05–12:05 UT	150	130
8635	1999.07.14 17:00–19:00 UT	340	290
9064	2000.06.26 14:00–16:00 UT	820	660

ного потока в сигнал доплеровской скорости по лучу зрения  $V_{sep}^l$  (табл. 3).

Просмотр других активных областей, возникающих вблизи лимба, показал, что такие мощные и долгоживущие доплеровские скоростные структуры возникают не всегда. По-видимому, они формируются только при появлении активных областей с высокой скоростью роста магнитного потока. В работе [Khlystova, 2013] проведено статистическое исследование 54 активных областей, возникающих вблизи лимба и имеющих разные пространственные масштабы (полный беззнаковый магнитный поток составляет  $8 \cdot 10^{19}$ – $5 \cdot 10^{22}$  Мкс). Найдено, что в первые часы появления активных областей абсолютные максимальные значения отрицательных и положительных доплеровских скоростей связаны квадратично со скоростью роста магнитного потока (рис. 6, а в работе [Khlystova, 2013]).

#### 4. АСИММЕТРИЯ В ПОЛЯХ ДОПЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ

Обнаружена асимметрия между доплеровскими скоростными структурами противоположных знаков. На пространственно-временных диаграммах рис. 5–8, а хорошо видно, что скоростные структуры, расположенные в области ведущей магнитной полярности, являются более мощными и существуют дольше, чем в последующей.

Был проведен количественный анализ асимметрии доплеровских скоростей. На рис. 9 показано изменение во времени разности положительных и отрицательных доплеровских скоростей для средних и максимальных значений. Разность средних доплеровских скоростей отсутствует в те моменты времени, когда в области выхода магнитного потока значения скоростей были меньше 500 м/с. В активных областях NOAA 8536 и 8635, возникающих вблизи разных лимбов, в первые 12 ч выхода магнитного потока наблюдается ярко выраженное преобладание доплеровских скоростей, локализующихся в ведущей полярности. В двух других активных областях NOAA 9037 и 9064, возникающих также вблизи разных лимбов, величина асимметрии меняет свой знак. Асимметрия доплеровских скоростей достигает наибольшего значения вскоре после начала выхода

магнитного потока и затем постепенно спадает в течение 7–12 ч. Время уменьшения асимметрии доплеровских скоростей сопоставимо с временем существования скоростных структур. Наибольшая асимметрия средних и максимальных доплеровских скоростей достигает 290–460 м/с и 710–940 соответственно.

#### 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим вклад возможных движений в наблюдаемый сигнал доплеровской скорости в данных с низким пространственным разрешением при возникновении активной области вблизи лимба, например, при гелиоцентрическом угле  $\theta \sim 60^\circ$  (рис. 10, а). На уровне фотосферы возникновение активной области начинается с появления мелко-масштабных биполярных магнитных пар, основания которых постепенно объединяются в поры и пятна противоположных полярностей. В процессе развития активной области пятна противоположных полярностей расходятся, а между ними происходит выход множества мелко-масштабных магнитных петель. Исходя из динамики магнитного поля и условия вмороженности в него фотосферной плазмы, в сигнал доплеровской скорости дают вклад следующие составляющие.

##### 1. Скорость подъема магнитного потока $V_{up}$ .

При возникновении активных областей в вершинах выходящих магнитных петель наблюдается подъем плазмы  $V_{up} \sim 300$ – $1000$  м/с, соответствующие подъему плазмы (см. рис. 4 в работе [Khlystova, 2013] и ссылки). С этой скоростью магнитный поток проходит уровень фотосферы. Проекция этих скоростей подъема магнитного потока на луч зрения при гелиоцентрическом угле  $\theta \sim 60^\circ$  составит  $V_{up}^l \sim 150$ – $500$  м/с.

##### 2. Скорость стекания плазмы $V_{down}$ .

При возникновении активных областей в основаниях магнитных петель наблюдаются положительные доплеровские скорости, соответствующие опусканию плазмы (см. ссылки во введении). Считается, что выходящий магнитный поток выносит плазму в атмосферу Солнца, которая под действием силы тяжести стекает вдоль силовых линий магнитного поля обратно в фотосферу. Теоретические модели

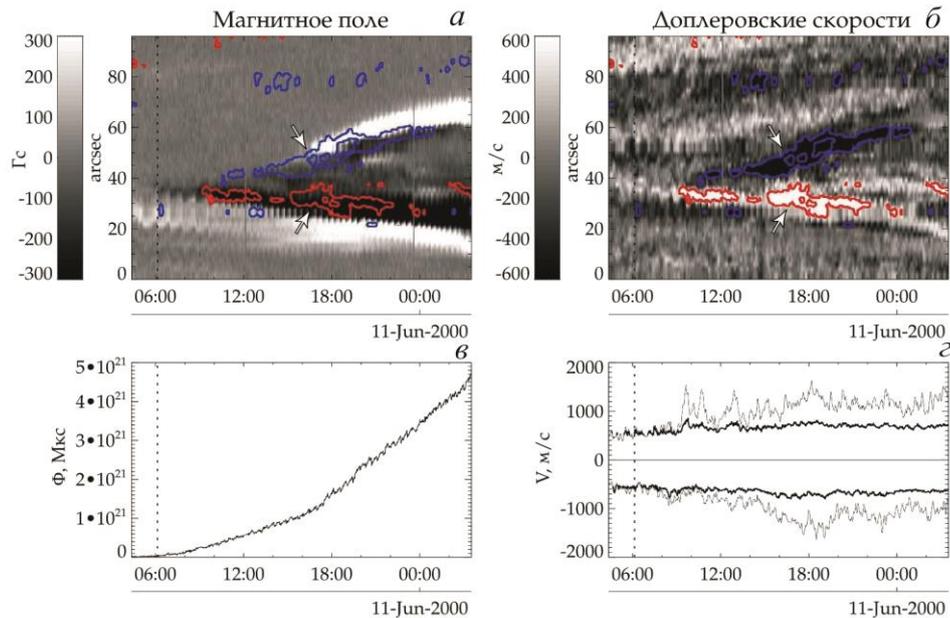


Рис. 5. Активная область NOAA 9037: пространственно-временные диаграммы продольного магнитного поля (а) и доплеровских скоростей (б). Положение разреза отмечено на магнитограммах рис. 1 черной линией, синяя и красная изолинии соответствуют  $-500$ ,  $-1000$  и  $+500$ ,  $+1000$  м/с, стрелками отмечены анализируемые скоростные структуры. Изменение во времени полного беззнакового магнитного потока (в). Изменение во времени средних (толстая линия) и абсолютных максимальных (тонкая линия) значений отрицательных и положительных доплеровских скоростей в области выхода магнитного потока (г). Вертикальной пунктирной линией отмечено время начала выхода магнитного потока. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

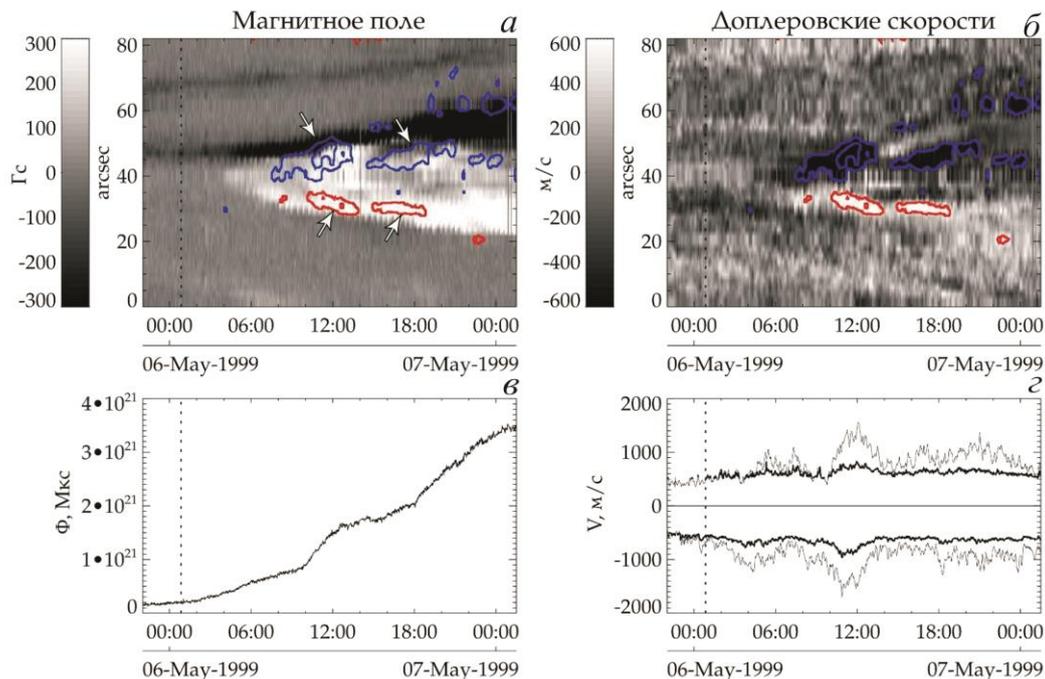


Рис. 6. Активная область NOAA 8536: пространственно-временные диаграммы продольного магнитного поля (а) и доплеровских скоростей (б). Положение разреза отмечено на магнитограммах рис. 2 черной линией. Обозначения такие же, как на рис. 5. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

показывают, что скорости стекания плазмы имеют значительную горизонтальную компоненту в начале выхода магнитного потока (например, [Shibata et al., 1990; Archontis et al., 2004]). В работе [Xu et al., 2010] зафиксированы высокие скорости опускания фотосферной плазмы, локализующиеся вблизи раз-

вивающегося пятна во внутренней части активной области; в хромосфере над этими местами наблюдались сверхзвуковые скорости опускания плазмы. Интересно отметить, что в горизонтальных течениях плазмы рассматриваемых нами активных областей наибольшие положительные и отрицательные доплеровские

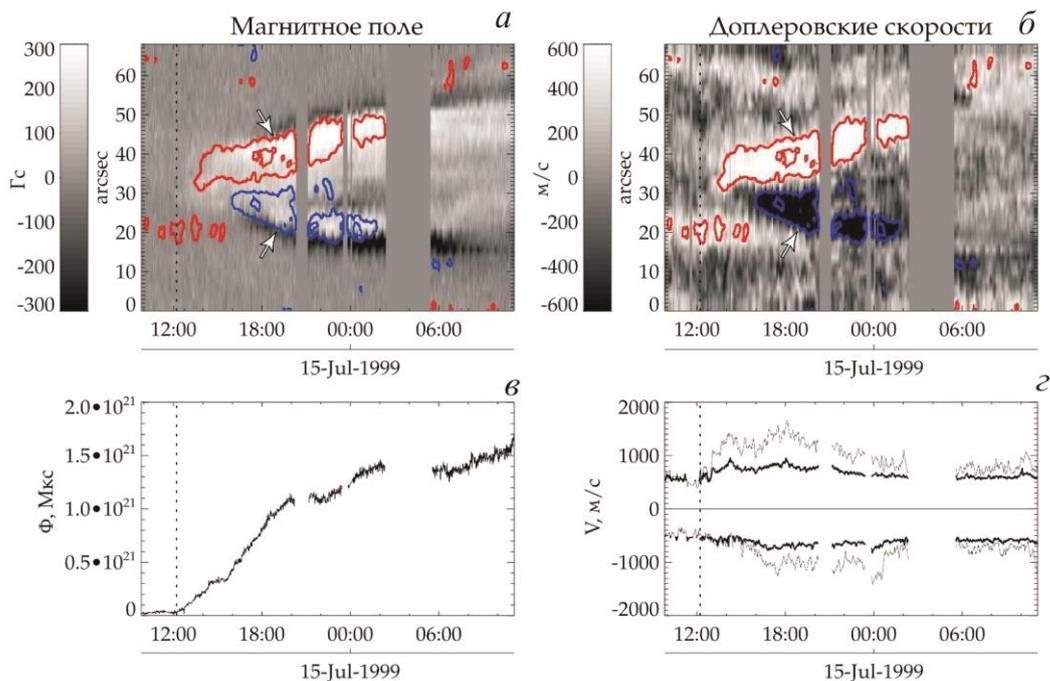


Рис. 7. Активная область NOAA 8635: пространственно-временные диаграммы продольного магнитного поля (а) и доплеровских скоростей (б). Положение разреза отмечено на магнитограммах рис. 3 черной линией. Обозначения такие же, как на рис. 5. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

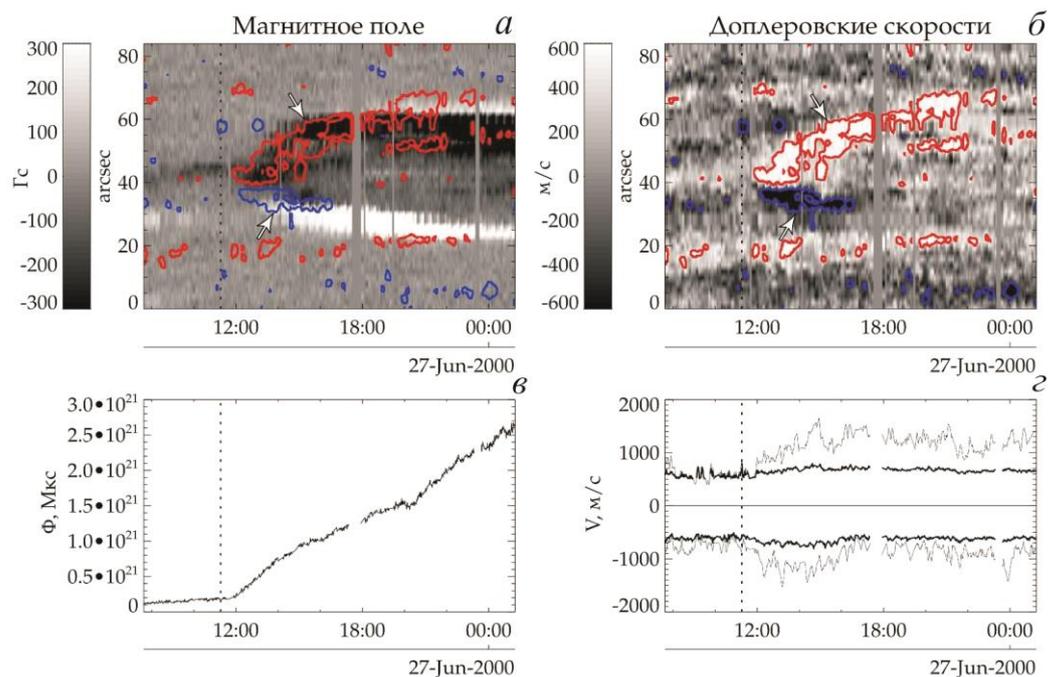


Рис. 8. Активная область NOAA 9064: пространственно-временные диаграммы продольного магнитного поля (а) и доплеровских скоростей (б). Положение разреза отмечено на магнитограммах рис. 4 черной линией. Обозначения такие же, как на рис. 5. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

скорости локализируются вблизи развивающихся пор с внутренней части активных областей (нижняя панель на рис. 1–4).

3. Скорость горизонтального перемещения магнитных полярностей  $V_{hor}$

В развивающихся активных областях магнитные элементы разных пространственных масштабов имеют разные скорости горизонтального перемещения (см. введение). Из-за сравнительно низкого про-

странственного разрешения данных SOHO/MDI  $V_{hor}$  связана со скоростью перемещения основных магнитных полярностей  $V_{sep}$  или мелкомасштабных концентраций магнитного потока внутри активной области  $V_{knots}$ . Параметр  $V_{sep}$  содержит вклад скоростей горизонтального перемещения основных магнитных полярностей и расширения выходящего магнитного потока. В исследуемых активных областях его составляющая в сигнале доплеровской скорости

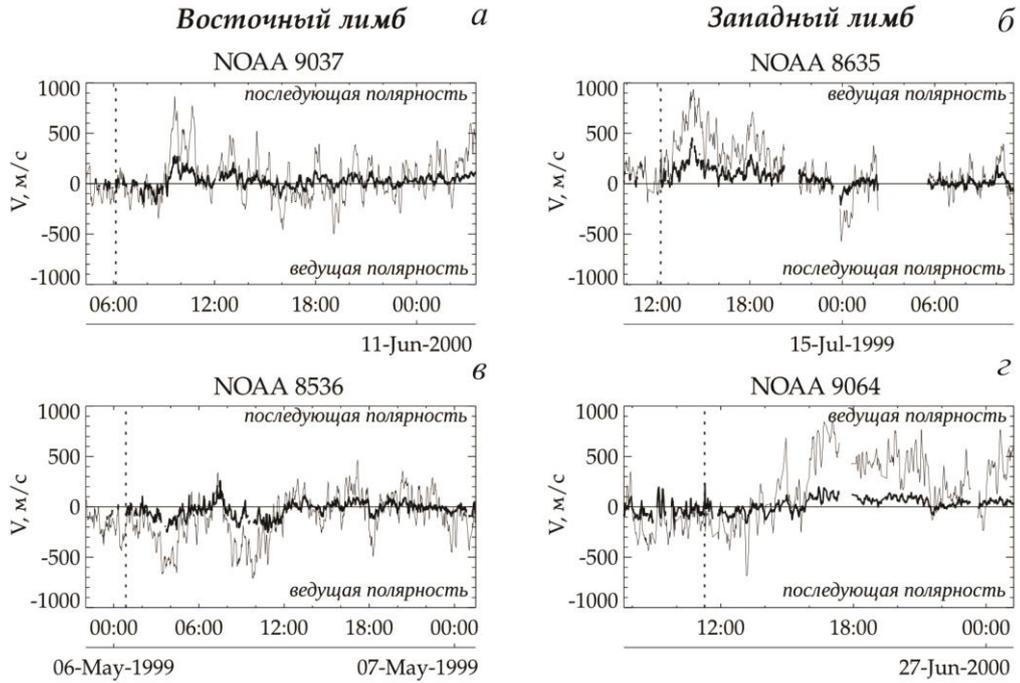


Рис. 9. Изменение во времени разности положительных и отрицательных доплеровских скоростей для средних (толстая линия) и максимальных (тонкая линия) значений в рассматриваемых активных областях. На графиках указаны полярности, в которых локализуются положительные и отрицательные доплеровские скорости

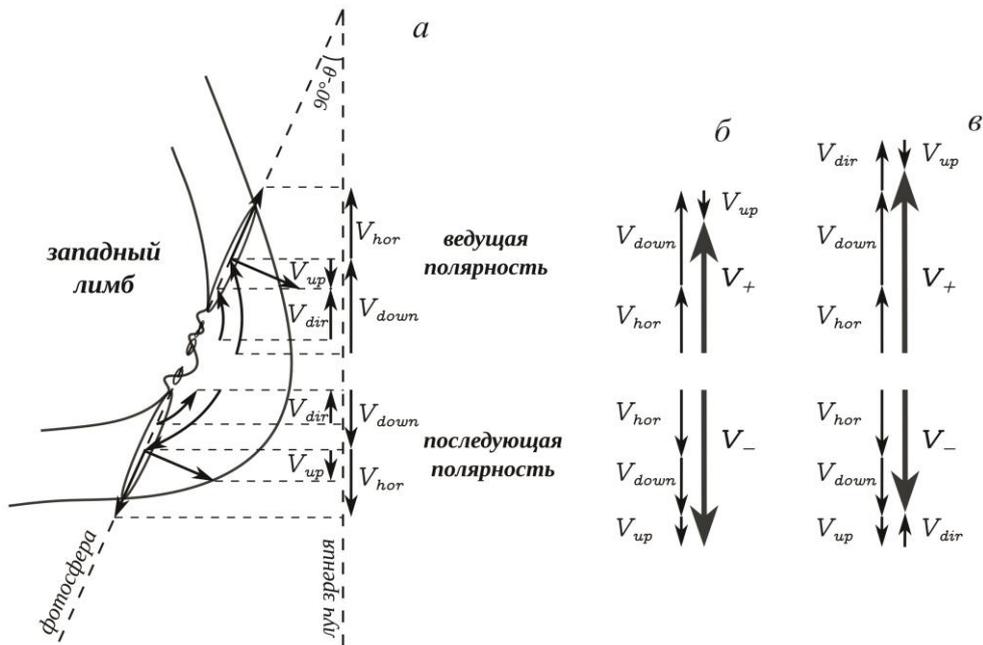


Рис. 10. Простая схема течений плазмы, сопровождающих выход магнитного потока вблизи западного лимба солнечного диска (а). Стрелками обозначены вектора скоростей возможных течений и их проекции на луч зрения в ведущей и последующей полярностях. Здесь  $V_{up}$  — скорость подъема магнитного потока,  $V_{down}$  — скорость стекания плазмы, выносимой в атмосферу Солнца всплывающим магнитным потоком,  $V_{hor}$  — скорость горизонтального перемещения магнитных полярностей,  $V_{dir}$  — скорость направленных течений плазмы внутри всплывающей магнитной структуры (в этом случае из последующей полярности в ведущую). Справа приведен результат сложения составляющих скорости вдоль луча зрения без учета (б) и с учетом (в) направленных течений плазмы  $V_{dir}$

по лучу зрения  $V_{sep}^l \sim 130-660$  м/с (табл. 3). Из-за сильных перспективных искажений в активных областях, расположенных вблизи лимба, невозможно оценить вклад скоростей перемещения мелкомасштабных концентраций магнитного потока  $V_{knots}$ . Авторы работы [Liu, Zhang, 2006] проводили исследование

активной области NOAA 10488 по данным SOHO/MDI, скорости горизонтального перемещения мелкомасштабных концентраций магнитного потока внутри активной области не превышали  $\sim 800$  м/с. Проекция этих скоростей на луч зрения при гелиоцентрическом угле  $\theta \sim 60^\circ$  будет  $V_{knots}^l \leq 700$  м/с. Из изло-

женного выше можно сделать вывод, что вклад скоростей горизонтального перемещения магнитных полярностей в сигнал доплеровской скорости в данных SOHO/MDI будет  $V_{hor}^l \leq 700$  м/с.

4. *Направленные течения плазмы внутри всплывающей магнитной структуры  $V_{dir}$*

Направленные течения плазмы проходят вдоль силовых линий магнитного поля. Поиск этих течений по асимметрии доплеровских скоростей между ведущей и последующей полярностями развивающихся активных областей не дал согласующихся результатов [Cauzzi et al., 1996; Sigwarth et al., 1998; Chapman, 2002; Pevtsov, Lamd, 2006; Battiatto et al., 2006; Grigor'ev et al., 2011]. С одной стороны, возможны течения плазмы против направления вращения Солнца. Из теории тонкой магнитной трубки следует, что внутри всплывающей через конвективную зону магнитной структуры под действием силы Кориолиса возникают течения плазмы, направленные из ведущей полярности в последующую, скорость которых может достигать несколько сотен метров в секунду [Fan, 2009]. Однако при вхождении в верхние слои конвективной зоны (20–30 Мм под фотосферой) магнитный поток испытывает сильное расширение и фрагментацию. Современные модели выхода магнитного потока из подповерхностных слоев в солнечную атмосферу не рассматривают течения плазмы, вызванные силой Кориолиса, поэтому возможность сохранения этих течений внутри выходящих магнитных петель неизвестна. С другой стороны, возможны течения плазмы по направлению вращения Солнца. В работе [Cauzzi et al., 1996] в качестве механизмов, формирующих такие течения плазмы, обсуждаются гипотезы фрагментарности и супервращения. Еще одной причиной направленных течений плазмы внутри магнитной структуры может быть разбаланс магнитного давления в основаниях магнитной петли. В любом случае направленные течения плазмы  $V_{dir}$  должны определять величину асимметрии доплеровских скоростей между скоростными структурами противоположных знаков (рис. 10, в). В случае исследуемых активных областей NOAA 9037 и 8536 через 12 ч после начала выхода магнитного потока, когда доплеровские скорости достигают максимальных значений, асимметрии средних доплеровских скоростей практически нет. Следовательно, вклад направленных течений плазмы  $V_{dir}$  в наблюдаемые скоростные структуры отсутствует.

Таким образом, сигнал доплеровской скорости содержит вклад следующих составляющих (рис. 10, а):

$$V = V_{up} + V_{down} + V_{hor} + V_{dir}. \quad (5)$$

Их проекция на луч зрения в положительных и отрицательных доплеровских скоростных структурах определяется как (рис. 10, б, в):

$$V_{-} = +V_{up} \cos\theta + V_{down} \cos X_1 + V_{hor} \sin\theta \pm V_{dir} \cos X_1, \quad (6)$$

$$V_{+} = -V_{up} \cos\theta + V_{down} \cos X_2 + V_{hor} \sin\theta \pm V_{dir} \cos X_2, \quad (7)$$

где  $\theta$  — гелиоцентрический угол, характеризующий положение выходящего магнитного потока;  $X_1$  и  $X_2$  —

углы между лучом зрения и силовыми линиями выходящих магнитных полей в полярностях, где локализируются отрицательная и положительная скоростные структуры.

В скоростных структурах, сопровождающих появление исследуемых активных областей, наибольшие значения доплеровских скоростей 1400–1700 м/с достигаются через 4–12 ч после начала выхода магнитного потока (рис. 5–8, з). Доплеровские скорости >1000 м/с концентрируются в центральной части скоростных структур и занимают значительные площади на протяжении длительных промежутков времени (рис. 1–4). Из анализа возможных движений при выходе магнитного потока следует, что вблизи лимба ( $\theta \sim 60^\circ$ ) наблюдаемый сигнал доплеровской скорости содержит вклад скорости подъема магнитного потока  $V_{up}^l \sim 150\text{--}500$  м/с и скорости горизонтального перемещения магнитных полярностей  $V_{hor}^l \leq 700$  м/с. Скорость направленных течений плазмы внутри всплывающих магнитных структур  $V_{dir}$  определяет величину асимметрии доплеровских скоростей между скоростными структурами противоположных знаков. В максимуме развития скоростных структур скорости этих течений, вероятно, дают незначительный вклад или отсутствуют. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемые скоростные структуры формируются главным образом из-за вклада скоростей горизонтального перемещения магнитных полярностей  $V_{hor}$  и скоростей стекания плазмы  $V_{down}$  (рис. 10, б). Возможно, что наблюдаемые течения плазмы обусловлены другими причинами. Например, авторы работы [Cheung et al., 2010] рассматривали всплытие магнитной трубки с полным тороидальным потоком  $7.6 \cdot 10^{21}$  Мкс. В фотосфере выход магнитного потока на протяжении  $\sim 5$  ч сопровождается расходящимся горизонтальным течением со скоростями  $>3$  км/с. Наблюдаемые течения формируются из-за избыточного давления, возникающего при появлении магнитного потока в фотосфере. Однако в их модели скорости течения плазмы сопоставимы со скоростями расхождения внешних границ фотосферного магнитного потока.

Асимметрия между скоростными структурами ведущей и последующей полярностей достигает наибольших значений вскоре после начала появления активных областей, затем она постепенно спадает (рис. 9). В двух активных областях NOAA 8536 и 8635, возникающих вблизи разных лимбов, наблюдается явное преобладание доплеровских скоростей, локализующихся в ведущей полярности. В двух других активных областях NOAA 9037 и 9064, также возникающих вблизи разных лимбов, величина асимметрии доплеровских скоростей меняет знак, но в отдельные периоды времени отмечается преобладание доплеровских скоростей в последующей полярности. Наблюдаемая асимметрия доплеровских скоростей может быть обусловлена направленными течениями плазмы  $V_{dir}$  (рис. 10, в). Возможна также связь с морфологической асимметрией противоположных полярностей активных областей. Для более глубокого понимания причины асимметрии между

скоростными структурами противоположных знаков необходимо искать дополнительные связи.

## ВЫВОДЫ

Исследованы горизонтальные течения фотосферной плазмы в активных областях, возникающих на краю солнечного диска. Обнаружено, что в начале выхода магнитного потока возникают и присутствуют до нескольких часов обширные области доплеровских скоростей разного знака, локализующиеся в противоположных полярностях. Рассмотрены все возможные течения в области выхода магнитного потока. Вероятно, основной вклад в наблюдаемые скоростные структуры дает стекание плазмы, выносимой в атмосферу Солнца выходящим магнитным потоком, а также скорости горизонтального перемещения оснований мелкомасштабных магнитных петель внутри активной области.

Обнаружена асимметрия между скоростными структурами ведущей и последующей полярностей, которая проявляется в значениях доплеровских скоростей, размерах и времени жизни скоростных структур. Асимметрия доплеровских скоростей может быть обусловлена направленными течениями плазмы внутри выходящей магнитной структуры или морфологической асимметрией между ведущей и последующей полярностями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гопасюк С.И. Поле скоростей в активной области на стадии появления пятен // Изв. КрАО. 1967. Т. 37. С. 29–43.

Гопасюк С.И. Поле скоростей на двух уровнях в июльской группе 1966 г. // Изв. КрАО. 1969. Т. 40. С. 111–126.

Archontis V., Moreno-Insertis F., Galsgaard K., et al. Emergence of magnetic flux from the convection zone into the corona // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 426. P. 1047–1063. DOI: 10.1051/0004-6361:20035934.

Bachmann G. On the evolution of magnetic and velocity fields of an originating sunspot group // *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* 1978. V. 29. P. 180–184.

Barth C.S., Livi S.H.B. Magnetic bipoles in emerging flux regions on the Sun // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* 1990. V. 21. P. 549–551.

Battisto V., Billotta S., Contarino L., et al. High resolution observations of emerging active regions carried out at the THEMIS telescope / SOHO-17. 10 Years of SOHO and Beyond, SP-617, ESA, Noordwijk, 2006. 51.1.

Brants J.J. High-resolution spectroscopy of active regions. II. Line-profile interpretation, applied to an emerging flux region // *Solar Phys.* 1985a. V. 95. P. 15–36. DOI: 10.1007/BF00162633.

Brants J.J. High-resolution spectroscopy of active regions. III. Relations between the intensity, velocity, and magnetic structure in an emerging flux region // *Ibid.* 1985b. V. 98. P. 197–217. DOI: 10.1007/BF00152456.

Brants J.J., Steenbeek J.C.M. Morphological evolution of an emerging flux region // *Ibid.* 1985. V. 96. P. 229–252. DOI: 10.1007/BF00149682.

Cauzzi G., Canfield R.C., Fisher G.H. A search for asymmetric flows in young active regions // *Astrophys. J.* 1996. V. 456. P. 850–860. DOI: 10.1086/176702.

Chapman G.A. A study of AR 9144; A fast-growing EFR // *Solar Phys.* 2002. V. 209. P. 141–152. DOI: 10.1023/A:1020994131849.

Cheung M.C.M., Rempel M., Title A.M., Schüssler M. Simulation of the formation of a solar active region // *Astrophys. J.* 2010. V. 720. P. 233–244. DOI: 10.1088/0004-637X/720/1/233.

Fan Y. Magnetic fields in the solar convection zone // *Living Rev. Solar Phys.* 2009. V. 6. P. 4.

Frazier E.N. The magnetic structure of arch filament systems // *Solar Phys.* 1972. V. 26. P. 130–141. DOI: 10.1007/BF00155113.

Grigor'ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. Dynamics of line-of-sight velocities and magnetic field in the solar photosphere during the formation of the large active region NOAA 10488 // *Astron. Lett.* 2007. V. 33. P. 766–770. DOI: 10.1134/S1063773707110072.

Grigor'ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. Emergence of magnetic flux at the solar surface and the origin of active regions // *Astron. Rep.* 2009. V. 53. P. 869–878. DOI: 10.1134/S1063772909090108.

Grigor'ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. The dynamics of photospheric line-of-sight velocities in emerging active regions // *Ibid.* 2011. V. 55. P. 163–173. DOI: 10.1134/S1063772911020041.

Guglielmino S.L., Martínez Pillet V., Ruiz Cobo B., et al. A detailed analysis of an ephemeral region // *Mem. Soc. Astron. Ital. Suppl.* 2006. V. 9. P. 103–105.

Hagenaar H.J. Ephemeral regions on a sequence of full-disk Michelson Doppler Imager magnetograms // *Astrophys. J.* 2001. V. 555. P. 448–461. DOI: 10.1086/321448.

Harvey K.L., Martin S.F. Ephemeral active regions // *Solar Phys.* 1973. V. 32. P. 389–402. DOI: 10.1007/BF00154951.

Kawaguchi I., Kitai R. The velocity field associated with the birth of sunspots // *Ibid.* 1976. V. 46. P. 125–135. DOI: 10.1007/BF00157559.

Khlystova A. Center-limb dependence of photospheric velocities in regions of emerging magnetic fields on the Sun // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 528. A7. DOI: 10.1051/0004-6361/201015765.

Khlystova A. The relationship between plasma flow velocities and magnetic field parameters during the emergence of active regions at the solar photospheric level // *Solar Phys.* 2013. V. 284. P. 329–341. DOI: 10.1007/s11207-012-0193-4.

Kozu H., Kitai R., Funakoshi Y. Development of real-time frame selector 2 and the characteristic convective structure in the emerging flux region // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2005. V. 57. P. 221–234.

Kozu H., Kitai R., Brooks D.H., et al. Horizontal and vertical flow structure in emerging flux regions // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2006. V. 58. P. 407–421.

Kubo M., Shimizu T., Lites B.W. The evolution of vector magnetic fields in an emerging flux region // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. 465–482. DOI: 10.1086/377333.

Lagg A., Woch J., Solanki S.K., Krupp N. Supersonic downflows in the vicinity of a growing pore. Evidence of unresolved magnetic fine structure at chromospheric heights // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 462. P. 1147–1155. DOI: 10.1051/0004-6361:20054700.

Lites B.W., Skumanich A., Martínez Pillet V. Vector magnetic fields of emerging solar flux. I. Properties at the site of emergence // *Ibid.* 1998. V. 333. P. 1053–1068.

Liu J., Zhang H. The magnetic field, horizontal motion and helicity in a fast emerging flux region which eventually forms a delta spot // *Solar Phys.* 2006. V. 234. P. 21–40.

Luoni M.L., Démoulin P., Mandrini C.H. van Driel-Gesztelyi L. Twisted flux tube emergence evidenced in longitudinal magnetograms: magnetic tongues // *Ibid.* 2011. V. 270. P. 45–74. DOI: 10.1007/s11207-011-9731-8.

Otsuji K., Kitai R., Ichimoto K., Shibata K. Statistical study on the nature of solar-flux emergence // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2011. V. 63. P. 1047–1057.

Pevtsov A., Lamb J.B. Plasma flows in emerging sunspots in pictures // *Solar MHD Theory and Observations: A High Spatial Resolution Perspective CS-354* / Eds. Leibacher, J., Stein, R.F., Uitenbroek, H. *Astron. Soc. Pac., San Francisco.* 2006. P. 249–255.

Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., et al. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager // *Solar Phys.* 1995. V. 162. P. 129–188. DOI: 10.1007/BF00733429.

Schoolman S.A. Videomagnetograph studies of solar magnetic fields. II. Field changes in an active region // *Ibid.* 1973. V. 32. P. 379–388. DOI: 10.1007/BF00154950.

Shibata K., Nozawa S., Matsumoto R., et al. Emergence of solar magnetic flux from the convection zone into the photosphere and chromosphere // *Astrophys. J. Lett.* 1990. V. 351. P. L25–L28. DOI: 10.1086/185671.

Sigwarth M., Schmidt W., Schuessler M. Upwelling in a young sunspot // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 339. P. L53–L56.

Snodgrass H.B. Magnetic rotation of the solar photosphere // *Astrophys. J.* 1983. V. 270. P. 288–299. DOI: 10.1086/161121.

Solanki S.K., Lagg A., Woch J., et al. Three-dimensional magnetic field topology in a region of solar coronal heating // *Nature.* 2003. V. 425. P. 692–695. DOI: 10.1038/nature02035.

Strous L.H., Scharmer G., Tarbell T.D., et al. Phenomena in an emerging active region. I. Horizontal dynamics // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 306. P. 947–959.

Strous L.H., Zwaan C. Phenomena in an emerging active region. II. Properties of the dynamic small-scale structure // *Astrophys. J.* 1999. V. 527. P. 435–444. DOI: 10.1086/308071.

Tarbell T.D., Topka K., Ferguson S., et al. High-resolution observations of emerging magnetic flux // *High Spatial Resolution Solar Observations / Ed. von der Luehe, O.* 1989. P. 506–520.

Ulrich R.K., Bertello L., Boyden J.E., Webster L. Interpretation of solar magnetic field strength observations // *Solar Phys.* 2009. V. 255. P. 53–78.

van Driel-Gesztelyi L., Petrovay K. Asymmetric flux loops in active regions // *Ibid.* 1990. V. 126. P. 285–298. DOI: 10.1007/BF00153051.

Xu Z., Lagg A., Solanki S.K. Magnetic structures of an emerging flux region in the solar photosphere and chromosphere // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 520. A77. DOI: 10.1051/0004-6361/200913227.

Zwaan C., Brants J.J., Cram L.E. High-resolution spectroscopy of active regions. I. Observing procedures // *Solar Phys.* 1985. V. 95. P. 3–14. DOI: 10.1007/BF00162632.

## REFERENCES

Archontis V., Moreno-Insertis F., Galsgaard K., Hood A., O’Shea E. Emergence of magnetic flux from the convection zone into the corona. *Astron. Astrophys.* 2004, vol. 426, pp. 1047–1063. DOI: 10.1051/0004-6361:20035934.

Bachmann G. On the evolution of magnetic and velocity fields of an originating sunspot group. *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* 1978, vol. 29, pp. 180–184.

Barth C.S., Livi S.H.B. Magnetic bipoles in emerging flux regions on the Sun. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* 1990, vol. 21, pp. 549–551.

Battiato V., Billotta S., Contarino L., Guglielmino S., Romano P., Soadaro D., Zuccarello F. High resolution observations of emerging active regions carried out at the THEMIS telescope. *SOHO-17. 10 Years of SOHO and Beyond*, SP-617, ESA, Noordwijk, 2006, 51.1.

Brants J.J. High-resolution spectroscopy of active regions. II. Line-profile interpretation, applied to an emerging flux region. *Solar Phys.* 1985a, vol. 95, pp. 15–36. DOI: 10.1007/BF00162633.

Brants J.J. High-resolution spectroscopy of active regions. III. Relations between the intensity, velocity, and magnetic structure in an emerging flux region. *Solar Phys.* 1985b, vol. 98, pp. 197–217. DOI: 10.1007/BF00152456.

Brants J.J., Steenbeek J.C.M. Morphological evolution of an emerging flux region. *Solar Phys.* 1985, vol. 96, pp. 229–252. DOI: 10.1007/BF00149682.

Cauzzi G., Canfield R.C., Fisher G.H. A search for asymmetric flows in young active regions. *Astrophys. J.* 1996, vol. 456, pp. 850–860. DOI: 10.1086/176702.

Chapman G.A. A study of AR 9144; A fast-growing EFR. *Solar Phys.* 2002, vol. 209, pp. 141–152. DOI: 10.1023/A:1020994131849.

Cheung M.C.M., Rempel M., Title A.M., Schüssler M. Simulation of the formation of a solar active region. *Astrophys. J.* 2010, vol. 720, pp. 233–244. DOI: 10.1088/0004-637X/720/1/233.

Fan Y. Magnetic fields in the solar convection zone. *Living Rev. Solar Phys.* 2009, vol. 6, p. 4.

Frazier E.N. The magnetic structure of arch filament systems. *Solar Phys.* 1972, vol. 26, pp. 130–141. DOI: 10.1007/BF00155113.

Gopasyuk S.I. The velocity field in an active region at spot appearance stage. *Izvestiya Krymskoi Astrofizicheskoi Observatorii* [Crimea Astrophysical Observatory Transactions] 1967, vol. 37, pp. 29–43 (in Russian).

Gopasyuk S.I. The velocity field at two levels in the active region of July 1966. *Izvestiya Krymskoi Astrofizicheskoi Observatorii* [Crimea Astrophysical Observatory Transactions] 1969, vol. 40, pp. 111–126 (in Russian).

Grigor’ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. Dynamics of line-of-sight velocities and magnetic field in the solar photosphere during the formation of the large active region NOAA 10488. *Astron. Lett.* 2007, vol. 33, pp. 766–770. DOI: 10.1134/S1063773707110072.

Grigor’ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. Emergence of magnetic flux at the solar surface and the origin of active regions. *Astron. Rep.* 2009, vol. 53, pp. 869–878. DOI: 10.1134/S1063772909090108.

Grigor’ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. The dynamics of photospheric line-of-sight velocities in emerging active regions. *Astron. Rep.* 2011, vol. 55, pp. 163–173. DOI: 10.1134/S1063772911020041.

Guglielmino S.L., Martinez Pillet V., Ruiz Cobo B., Zuccarello F., Lites B.W. A detailed analysis of an ephemeral region. *Mem. Soc. Astron. Ital. Suppl.* 2006, vol. 9, pp. 103–105.

Hagenaar H.J. Ephemeral regions on a sequence of full-disk Michelson Doppler Imager magnetograms. *Astrophys. J.* 2001, vol. 555, pp. 448–461. DOI: 10.1086/321448.

Harvey K.L., Martin S.F. Ephemeral active regions. *Solar Phys.* 1973, vol. 32, pp. 389–402. DOI: 10.1007/BF00154951.

Kawaguchi I., Kitai R. The velocity field associated with the birth of sunspots. *Solar Phys.* 1976, vol. 46, pp. 125–135. DOI: 10.1007/BF00157559.

Khlystova A. Center-limb dependence of photospheric velocities in regions of emerging magnetic fields on the Sun. *Astron. Astrophys.* 2011, vol. 528, A7. DOI: 10.1051/0004-6361/201015765.

Khlystova A. The relationship between plasma flow velocities and magnetic field parameters during the emergence of active regions at the solar photospheric level. *Solar Phys.* 2013, vol. 284, pp. 329–341. DOI: 10.1007/s11207-012-0193-4.

Kozu H., Kitai R., Funakoshi Y. Development of real-time frame selector 2 and the characteristic convective structure in the emerging flux region. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2005, vol. 57, pp. 221–234.

Kozu H., Kitai R., Brooks D.H., Kurokawa H., Yoshimura K., Berger T.E. Horizontal and vertical flow structure in emerging flux regions. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2006, vol. 58, pp. 407–421.

Kubo M., Shimizu T., Lites B.W. The evolution of vector magnetic fields in an emerging flux region. *Astrophys. J.* 2003, vol. 595, pp. 465–482. DOI: 10.1086/377333.

Lagg A., Woch J., Solanki S.K., Krupp N. Supersonic downflows in the vicinity of a growing pore. Evidence of unresolved magnetic fine structure at chromospheric heights. *Astron. Astrophys.* 2007, vol. 462, pp. 1147–1155. DOI: 10.1051/0004-6361:20054700.

Lites B.W., Skumanich A., Martinez Pillet V. Vector magnetic fields of emerging solar flux. I. Properties at the site of emergence. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 333, pp. 1053–1068.

Liu J., Zhang H. The magnetic field, horizontal motion and helicity in a fast emerging flux region which eventually forms a delta spot. *Sol. Phys.* 2006, vol. 234, pp. 21–40.

Luoni M.L., Démoulin P., Mandrini C.H., van Driel-Gesztelyi L. Twisted flux tube emergence evidenced in longitudinal magnetograms: Magnetic tongues. *Solar Phys.* 2011, vol. 270, pp. 45–74. DOI: 10.1007/s11207-011-9731-8.

Otsuji K., Kitai R., Ichimoto K., Shibata K. Statistical study on the nature of solar-flux emergence. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2011, vol. 63, pp. 1047–1057.

Pevtsov A., Lamb J.B. Plasma flows in emerging sunspots in pictures. Leibacher, J., Stein, R.F., Uitenbroek, H. (eds.) *Solar MHD Theory and Observations: A High Spatial Resolution Perspective CS-354*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, 2006, pp. 249–255.

Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Schou J., Rosenberg W., Springer L., Tarbell T.D., Title A., Wolfson C.J., Zayer I., MDI Engineering Team. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager. *Solar Phys.* 1995, vol. 162, pp. 129–188. DOI: 10.1007/BF00733429.

Schoolman S.A. Videomagnetograph studies of solar magnetic fields. II. Field changes in an active region. *Solar Phys.* 1973, vol. 32, pp. 379–388. DOI: 10.1007/BF00154950.

Shibata K., Nozawa S., Matsumoto R., Sterling A.C., Tajima T. Emergence of solar magnetic flux from the convection zone into the photosphere and chromosphere. *Astrophys. J. Lett.* 1990, vol. 351, L25–L28. DOI: 10.1086/185671.

Sigwarth M., Schmidt W., Schuessler M. Upwelling in a young sunspot. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 339, L53–L56.

Snodgrass H.B. Magnetic rotation of the solar photosphere. *Astrophys. J.* 1983, vol. 270, pp. 288–299. DOI: 10.1086/161121.

Šolanki S.K., Lagg A., Woch J., Krupp N., Collados M. Three-dimensional magnetic field topology in a region of solar coronal heating. *Nature.* 2003, vol. 425, pp. 692–695. DOI: 10.1038/nature02035.

Strous L.H., Scharmer G., Tarbell T.D., Title A.M., Zwaan C. Phenomena in an emerging active region. I. Horizontal dynamics. *Astron. Astrophys.* 1996, vol. 306, pp. 947–959.

Strous L.H., Zwaan C. Phenomena in an emerging active region. II. Properties of the dynamic small-scale structure. *Astrophys. J.* 1999, vol. 527, pp. 435–444. DOI: 10.1086/308071.

Tarbell T.D., Topka K., Ferguson S., Frank Z., Title A.M. High-resolution observations of emerging magnetic flux. Von der Luehe, O. (ed.) *High Spatial Resolution Solar Observations*. 1989, pp. 506–520.

Ulrich R.K., Bertello L., Boyden J.E., Webster L. Interpretation of solar magnetic field strength observations. *Solar Phys.* 2009, vol. 255, pp. 53–78.

Van Driel-Gesztelyi L., Petrovay K. Asymmetric flux loops in active regions. *Solar Phys.* 1990, vol. 126, pp. 285–298. DOI: 10.1007/BF00153051.

Xu Z., Lagg A., Solanki S.K. Magnetic structures of an emerging flux region in the solar photosphere and chromosphere. *Astron. Astrophys.* 2010, vol. 520, A77. DOI: 10.1051/0004-6361/200913227.

Zwaan C., Brants J.J., Cram L.E. High-resolution spectroscopy of active regions. I. Observing procedures. *Solar Phys.* 1985, vol. 95, pp. 3–14. DOI: 10.1007/BF00162632.