

СВЯЗЬ ДОПЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ С ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА***RELATIONSHIP BETWEEN PLASMA FLOW DOPPLER VELOCITIES AND MAGNETIC FIELD PARAMETERS DURING THE APPEARANCE OF ACTIVE REGIONS AT THE SOLAR PHOTOSPHERIC LEVEL****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. Проведено статистическое исследование связи доплеровских скоростей течений плазмы и параметров магнитного поля при появлении активных областей в фотосфере Солнца по данным SOHO/MDI. Рассмотрены 224 возникающие активные области с разными пространственными масштабами и положением на диске Солнца. Проанализированы связи: 1) отрицательных доплеровских скоростей с положением возникающих активных областей на диске; 2) отрицательных и положительных доплеровских скоростей с параметрами магнитного поля в активных областях, возникающих в центральной части солнечного диска (вертикальная составляющая); 3) отрицательных и положительных доплеровских скоростей с параметрами магнитного поля в активных областях, возникающих вблизи лимба (горизонтальная составляющая); 4) скорости роста магнитного потока с напряженностью выходящих магнитных полей; 5) доплеровских скоростей и параметров магнитного поля в первые часы появления активных областей с величиной полного беззнакового магнитного потока в максимуме их развития.

Ключевые слова: активные области, магнитные поля, поля скоростей, центрוליಂಬовые наблюдения.

Abstract. Using data obtained with the Michelson Doppler Imager (MDI) onboard the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), we have conducted a statistical study of the relationship between plasma flow Doppler velocities and magnetic field parameters during the appearance of active regions at the solar photospheric level. We have examined 224 emerging active regions having different spatial scales and positions on the solar disc. The following relationships have been analysed: 1) those between the negative Doppler velocities and the position of active regions emerging on the solar disc; 2) those between the negative and positive Doppler velocities and the magnetic field parameters in the active regions emerging near the solar disc centre (the vertical component); 3) those between the negative and positive Doppler velocities and the magnetic field parameters in the active regions emerging near the limb (the horizontal component); 4) those between the magnetic flux growth rate and the strength of emerging magnetic fields; 5) those between the Doppler velocities and the magnetic field parameters during the first hours after the appearance of active regions with the total unsigned magnetic flux at the peak of their development.

Keywords: active regions, magnetic fields, velocity fields, centre-limb observations.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный поток на Солнце выходит на разных пространственных масштабах (см., например, [Parnell et al., 2009]). Существует степенная связь между максимальной величиной магнитного потока и временем его существования [Головко, 1998]. Большие и долгоживущие магнитные потоки называют активными областями.

При появлении активных областей в фотосфере Солнца на линии раздела полярностей выходящих магнитных полей наблюдаются отрицательные доплеровские скорости (подъем плазмы) до 1 км/с [Brants, 1985a, b; Tarbell et al., 1989; Lites et al., 1998; Strous, Zwaan, 1999; Kubo et al., 2003; Guglielmino et al., 2006; Grigor'ev et al., 2009]. Высокие доплеров-

ские скорости ~ 1.7 км/с наблюдались при появлении мощной активной области NOAA 10488 [Grigor'ev et al., 2007]. Сопоставление доплеровских скоростей с параметрами магнитных полей не проводилось.

При появлении активных областей на уровне фотосферы в местах наибольшей концентрации магнитных полей наблюдаются положительные доплеровские скорости до 2 км/с [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]. Наблюдение пор выявило связь между скоростью опускания плазмы и напряженностью магнитного поля. Авторы работы [Bonaccini et al., 1991] при изучении большой поры нашли, что сильные

* Впервые статья опубликована на английском языке в журнале "Solar Physics". 2013. V. 284. P. 329–341. На русском языке публикуется впервые по лицензии издательства.

магнитные поля линейно коррелируют с доплеровскими скоростями опускания в форме $V[\text{Гс}] = 500V [\text{км/с}]$. По результатам наблюдения пор [Keil et al., 1999] доплеровские скорости опускания показали положительную корреляцию с напряженностью магнитного поля. Авторы работы [Cho et al., 2010] в маленьких порах $< 2''$, не связанных с выходом магнитного потока, наблюдали отрицательную корреляцию между положительными доплеровскими скоростями и напряженностью магнитного поля. Другие исследователи [Grigor'ev et al., 2011] на стадии формирования поры в возникающей активной области обнаружили линейный рост напряженности магнитного поля и положительной доплеровской скорости.

Измерения горизонтальных скоростей при появлении активных областей в фотосфере ранее проводились лишь косвенно. По анализу движений магнитных структур были получены значения в широком диапазоне от 0.1 до 5.5 км/с [Frazier, 1972; Schoolman, 1973; Harvey, Martin, 1973; Chou, Wang, 1987; Barth, Livi, 1990; Strous, Zwaan, 1999; Hagenaar, 2001; Grigor'ev et al., 2009; Otsuji et al., 2011]. В работе [Chou, Wang, 1987] не было обнаружено связи скоростей расхождения полюсов противоположных полярностей в 24 биполярных парах со средней напряженностью магнитного поля и полным беззнаковым магнитным потоком. Авторы работы [Otsuji et al., 2011] нашли степенную связь с отрицательным показателем между скоростью расхождения полюсов противоположных полярностей и максимальной величиной магнитного потока.

В работе [Khlystova, 2011] представлено статистическое исследование фотосферных доплеровских скоростей в 83 активных областях с полным беззнаковым магнитным потоком выше 10^{21} Мкс. Найдена центрוליಂಬовая зависимость отрицательных доплеровских скоростей, показывающая, что в первые часы появления активных областей горизонтальные скорости растекания плазмы превосходят вертикальные скорости подъема.

В данной работе изучаются статистические связи доплеровских скоростей с параметрами магнитных полей в возникающих активных областях.

1. ДАННЫЕ

Использовались данные полного диска Солнца SOHO/MDI [Scherrer et al., 1995]. Временное разрешение фотосферных магнитограмм и доплерограмм составляет 1 мин, континуума — 96 мин. Пространственное разрешение данных — $4''$. 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. Величина смещения исследуемого участка рассчитывалась по закону дифференциального вращения фотосферных магнитных полей [Snodgrass, 1983] и посредством кросскорреляционного анализа двух соседних во времени магнитограмм. Точное пространственное совмещение данных достигалось за

счет выделения фрагментов с одинаковыми координатами на магнитограммах и доплерограммах, полученных в одно время. Для корректной обработки данных исследуемые участки выделялись только в пределах солнечного диска. В доплерограммах вклад дифференциального вращения Солнца и других факторов, искажающих сигнал доплеровской скорости, исключался по методике, описанной в работе [Grigor'ev et al., 2007].

Последовательность выделенных фрагментов использовалась для расчета исследуемых параметров внутри участка, ограниченного выходом магнитного потока. Полный беззнаковый магнитный поток активных областей рассчитывался внутри изолиний ± 60 Гс с учетом эффекта проекции в предположении, что вектор магнитного поля перпендикулярен поверхности:

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

где Φ — полный беззнаковый магнитный поток, [Мкс]; S_0 — площадь солнечной поверхности пикселя в центре солнечного диска, $[\text{см}^2]$; N — число пикселей, удовлетворяющих условию $|B_i| > 60$ Гс; B_i — продольное магнитное поле в i -ом пикселе [Гс]; θ_i — гелиоцентрический угол i -го пикселя. Максимальная величина полного беззнакового магнитного потока Φ_{max} определялась по максимальной точке перегиба в кривой роста магнитного потока или по последнему значению ряда данных (для активных областей, перемещающихся за западный лимб или для неполных рядов данных). Из максимума полного беззнакового магнитного потока вычитался фоновый сигнал, присутствующий до начала появления активной области. Проводился контроль магнитного насыщения в измерениях напряженности магнитного поля в данных SOHO/MDI [Liu et al., 2007], которое имело место только в трех из рассматриваемых активных областей.

Скорость роста полного беззнакового магнитного потока $d\Phi/dt$ и абсолютная максимальная напряженность магнитного поля H_{max} рассчитывались в первые 12 часов появления больших и малых активных областей. В случае эфемерных активных областей параметры определялись от начала появления до максимума развития.

Течения фотосферной плазмы характеризуются абсолютными максимальными значениями отрицательных и положительных доплеровских скоростей $V_{\text{max-}}$ и $V_{\text{max+}}$. Они рассчитывались в первые 12 часов появления больших и малых активных областей. В случае эфемерных активных областей параметры определялись от начала появления до максимума развития. Выход магнитного потока начинается с появления вершины петли, где магнитное поле горизонтально, поэтому анализируемый интервал времени начинался за 30 мин до начала появления продольного магнитного поля в фотосфере. Важно исключить вклад течений Эвершеда в определяемые скорости, который может достигать 2 км/с [Bai et al., 1998]. Для этого по изображениям в континууме

устанавливалось время формирования в пятнах полутени. У всех рассматриваемых активных областей полутень в пятнах формировалась через 12 часов после их появления. Таким образом, вклад течений Эвершеда в определяемые скорости отсутствует.

Положение активной области на диске характеризуется гелиоцентрическим углом θ :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right), \quad (2)$$

где r — расстояние от центра диска до места появления активной области, R — радиус Солнца. Также θ — это угол между нормалью к поверхности и лучом зрения на выходящий магнитный поток.

Был проведен регрессионный анализ данных. В рассматриваемых зависимостях присутствует, по крайней мере, одна точка перегиба. Поэтому в качестве аппроксимирующих функций использовались линейный или квадратичный полиномы. Выбор степени полинома проводился по минимальной величине среднеквадратичных отклонений. Результаты представлены в виде полиномиальных уравнений, которые, согласно F-статистике, являются значимыми. Доверительные интервалы для средних рассчитаны с вероятностью 99 %.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ

Рассмотрены 224 активные области, наблюдавшиеся на видимой стороне солнечного диска с 1999 по 2008 г. (рис. 1). Выбранные объекты имеют разные пространственные масштабы и положение на диске Солнца. Они изолированы от крупных скоплений существующих магнитных полей. Для малых и больших активных областей допускалось присутствие единичных полюсов с полным беззнаковым магнитным потоком не выше $0.5 \cdot 10^{21}$ Мкс в месте непосредственного появления активной области в первые часы. Выбранные объекты имеют достаточно полные ряды данных с временным разрешением 1 мин.

Анализируемая статистика содержит следующее.

1. По максимальной величине полного беззнакового магнитного потока (в двух полярностях):

- 68 эфемерных активных областей ($2.6 \cdot 10^{18}$ Мкс $< \Phi_{\max} < 4.07 \cdot 10^{20}$ Мкс);
- 130 малых активных областей ($4.07 \cdot 10^{20}$ Мкс $< \Phi_{\max} < 8 \cdot 10^{21}$ Мкс);
- 26 больших активных областей ($\Phi_{\max} > 8 \cdot 10^{21}$ Мкс).

Пределы полного беззнакового магнитного потока для эфемерных АО были взяты из [Hagenaar, 2001]. Границей между большими и малыми активными областями принято считать магнитный поток одной полярности, равный $5 \cdot 10^{21}$ Мкс [Garcia de la Rosa, 1984; Zwaan, 1987]. В представляемом исследовании границей между малыми и большими активными областями был выбран полный магнитный поток обеих полярностей, равный $8 \cdot 10^{21}$ Мкс, так как все рассматриваемые активные области с полным магнитным потоком выше этого уровня содержат пятна и их пространственный размер превышает размер супергранулы.

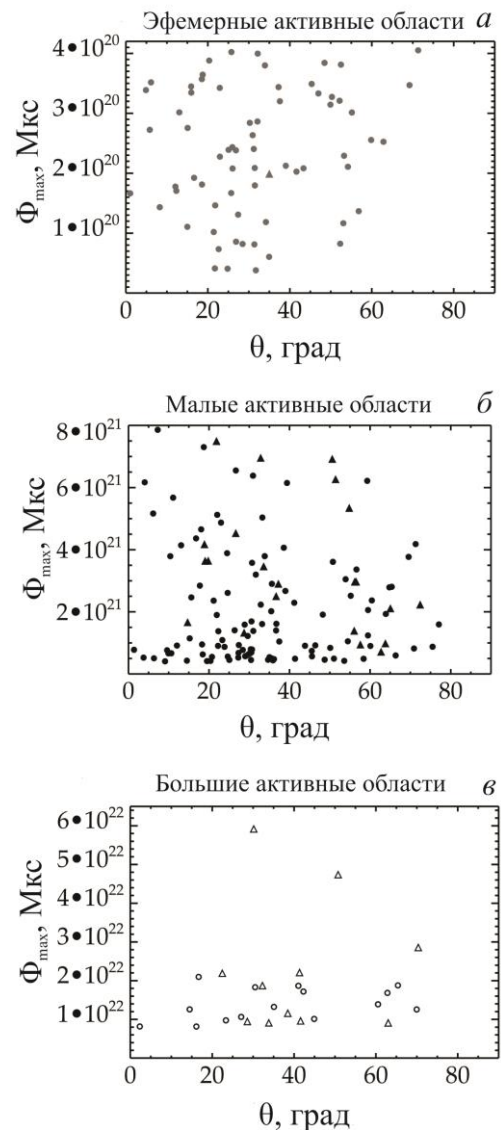


Рис. 1. Максимум полного беззнакового магнитного потока Φ_{\max} эфемерных (а), малых (б) и больших (в) активных областей в зависимости от гелиоцентрического угла θ , соответствующего началу выхода магнитных потоков. Кружками обозначены активные области, где Φ_{\max} определялся по максимальной точке перегиба в кривой роста магнитного потока; треугольниками — активные области, где Φ_{\max} определялся по последнему измерению, и активные области, в которых достигалось магнитное насыщение. В этих объектах полный беззнаковый магнитный поток в максимуме развития может быть выше

2. По расстоянию от центра солнечного диска:

- 72 активные области вблизи центра диска ($\theta < 25^\circ$);
- 98 активных областей на среднем расстоянии от центра диска ($25^\circ < \theta < 50^\circ$);
- 54 активные области вблизи лимба ($\theta > 50^\circ$).

Определены максимальные доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца на разном расстоянии от центра диска по данным SOHO/MDI (рис. 2). Использовались доплерограммы с временным разрешением 1 мин, полученные с 18 по 23 апреля 2001 г. Определялись абсолютные максимальные значения отрицательных и положительных доплеровских скоростей в пределах области разме-

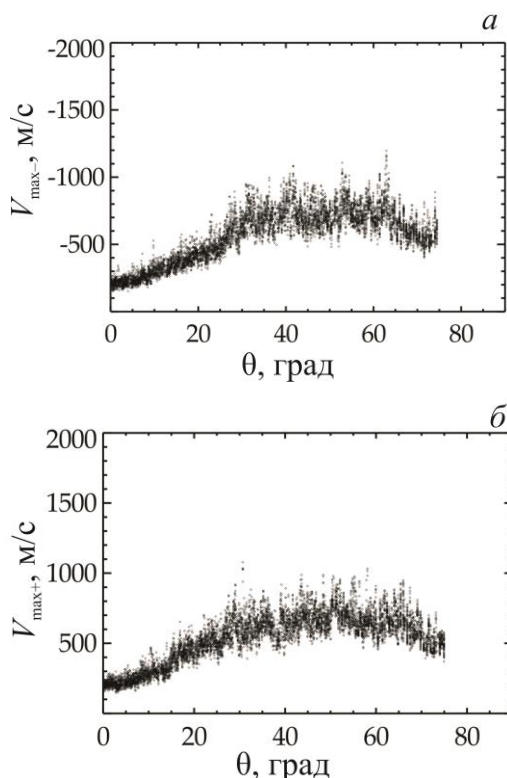


Рис. 2. Абсолютные максимальные значения отрицательных $V_{\max-}$ (а) и положительных $V_{\max+}$ (б) доплеровских скоростей конвективных течений спокойного Солнца в зависимости от гелиоцентрического угла θ по данным SOHO/MDI

ром 40"×40", перемещение которой отслеживалось по закону дифференциального вращения доплеровских структур в фотосфере [Snodgrass, Ulrich, 1990]. Выбранный участок в рассматриваемый период времени прошел диапазон долгот W00–W75 вдоль линии экватора. Вклад дифференциального вращения Солнца и других факторов, искажающих сигнал доплеровской скорости, исключался по методике, описанной в работе [Grigor'ev et al., 2007].

Максимальные доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца возрастают с увеличением гелиоцентрического угла (рис. 2). При $\theta > 60^\circ$ наблюдается тенденция уменьшения значений доплеровских скоростей. Это может быть связано с тем, что вблизи лимба из-за увеличения оптической толщины доплеровские скорости измеряются в более высоких слоях солнечной атмосферы, где среда становится конвективно стабильной и конвективные течения затухают.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Центролимбовая зависимость отрицательных доплеровских скоростей

Построена зависимость от гелиоцентрического угла абсолютных максимальных значений отрицательных доплеровских скоростей (движение плазмы к наблюдателю), соответствующих начальной стадии появления активных областей (рис. 3). Значения доплеровских скоростей возрастают с увеличением гелиоцентрического угла. В результате регрессионного анализа данных были получены уравнения (3) для эфе-

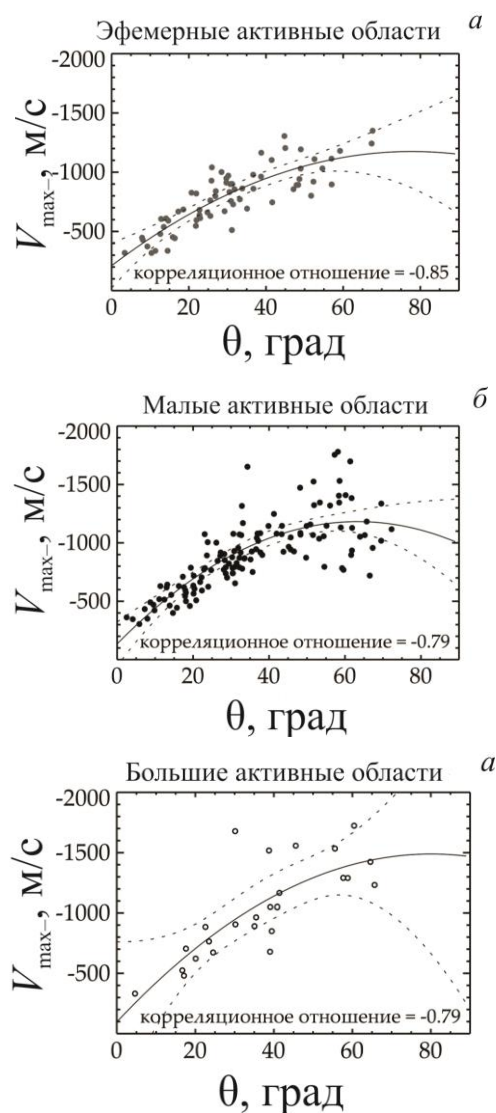


Рис. 3. Абсолютные максимальные значения отрицательных доплеровских скоростей $V_{\max-}$ (движение плазмы к наблюдателю) в первые часы возникновения эфемерных (а), малых (б) и больших (в) активных областей в зависимости от гелиоцентрического угла θ , соответствующего положению области в это время. Сплошные линии соответствуют уравнениям (3) на графике (а), (4) — на графике (б) и (5) — на графике (в); пунктирная линия соответствует 99%-му уровню значимости для среднего значения

мерных, (4) — для малых и (5) — для больших активных областей:

$$V_{\max-} = -211.32 - 24.77\theta + 0.16\theta^2, \tag{3}$$

$$V_{\max-} = -134.93 - 33.05\theta + 0.26\theta^2, \tag{4}$$

$$V_{\max-} = -96.35 - 34.75\theta + 0.22\theta^2, \tag{5}$$

где $V_{\max-}$ — абсолютная максимальная отрицательная доплеровская скорость, [м/с]; θ — гелиоцентрический угол, соответствующий положению активной области при $V_{\max-}$, [град]. Корреляционные отношения составляют -0.85 для эфемерных, активных областей, -0.79 — для малых и -0.79 — для больших, что подтверждает высокую связь между рассматриваемыми параметрами.

Полученные зависимости указывают на то, что в начале появления активных областей горизонталь-

ные скорости растекания плазмы ($\theta > 50^\circ$) превосходят вертикальные скорости подъема ($\theta < 25^\circ$). Отрицательные доплеровские скорости, сопровождающие появление активных областей, превышают доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца. Особенно ярко это выражено в горизонтальных течениях плазмы (рис. 3 и 2, а). В малых активных областях с высокой статистикой при $\theta > 50^\circ$ наблюдается значительное отклонение горизонтальных доплеровских скоростей от среднего. Данный факт указывает на существование других связей, определяющих скорости горизонтальных течений плазмы на начальной стадии формирования активных областей.

3.2. Вертикальные доплеровские скорости

В активных областях, возникающих в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$), на линии раздела полярностей выходящих магнитных потоков локализуются отрицательные доплеровские скорости. Они связаны с подъемом плазмы в вершинах выходящих магнитных петель при прохождении ими уровня фотосферы. Скоростные структуры занимают небольшие участки и существуют несколько минут. В первые часы появления активных областей были определены абсолютные максимальные значения отрицательных доплеровских скоростей. Найденные скорости в основном превышают наибольшие отрицательные доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца в данных SOHO/MDI (рис. 2, б при $\theta < 25^\circ$). Абсолютные максимальные отрицательные доплеровские скорости имеют высокую дисперсию и не показывают связи со скоростью роста магнитного потока (корреляционное отношение -0.30) и с максимальной напряженностью магнитного поля (корреляционное отношение -0.22) (рис. 4). Из этого следует, что доплеровские скорости подъема плазмы не характеризуют мощность возникающих активных областей.

В формирующихся активных областях в местах наибольшей концентрации магнитных полей наблюдаются положительные доплеровские скорости. Основной причиной их возникновения считается стекание холодной плазмы, выносимой из конвективной зоны в атмосферу Солнца выходящим магнитным потоком. Имеет место также подавление синего доплеровского сдвига конвективных течений магнитными полями. Степень подавления скоростей конвекции зависит от спектральной линии и напряженности магнитного поля — в данных SOHO/MDI для магнитных полей от 400 до 2200 Гс она составляет от 170 до 300 м/с [Meunier et al., 2010].

В активных областях, возникающих в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$), в первые часы выхода магнитного потока были определены абсолютные максимальные значения положительных доплеровских скоростей, соответствующих опусканию плазмы. Найденные скорости существенно превосходят наибольшие положительные доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца по данным SOHO/MDI (рис. 5 и 2, б при $\theta < 25^\circ$). Максимальные положительные доплеровские скорости

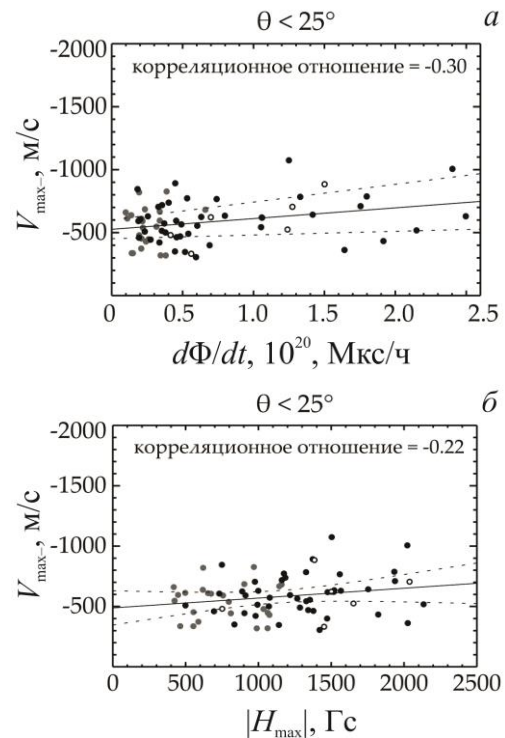


Рис. 4. Абсолютные максимальные значения отрицательных доплеровских скоростей $V_{\max-}$ (движение плазмы к наблюдателю) в зависимости от скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$ (а) и абсолютной максимальной напряженности магнитного поля H_{\max} (б) в первые часы появления активных областей в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$). Серым цветом обозначены эфемерные, черным — малые, белым — большие активные области

связаны квадратично со скоростью роста магнитного потока (корреляционное отношение 0.75) и линейно — с максимальной напряженностью магнитного поля (корреляционный коэффициент 0.75) (рис. 5). В результате регрессионного анализа данных были получены следующие уравнения:

$$V_{\max+} = 455.82 + 6.98 \cdot 10^{-18} d\Phi/dt - 1.75 \cdot 10^{-38} (d\Phi/dt)^2, \quad (6)$$

$$V_{\max+} = 277.94 + 0.43 H_{\max}, \quad (7)$$

где $V_{\max+}$ — максимальная положительная доплеровская скорость, [м/с]; $d\Phi/dt$ — скорость роста магнитного потока, [Мкс/ч]; H_{\max} — абсолютная максимальная напряженность магнитного поля, [Гс].

3.3. Горизонтальные доплеровские скорости

В работе [Khlystova, 2013] проведен детальный анализ фотосферных течений плазмы в четырех активных областях, возникающих вблизи солнечного лимба. Обнаружено, что в первые часы появления магнитного потока в горизонтальном поле скоростей формируются протяженные области высоких доплеровских скоростей разного знака. Наблюдаемые доплеровские скорости существенно превосходят скорости расхождения внешних границ фотосферного магнитного потока и, наиболее вероятно, обусловлены значительной составляющей скорости стекания плазмы, выносимой в атмосферу Солнца выходящим магнитным потоком.

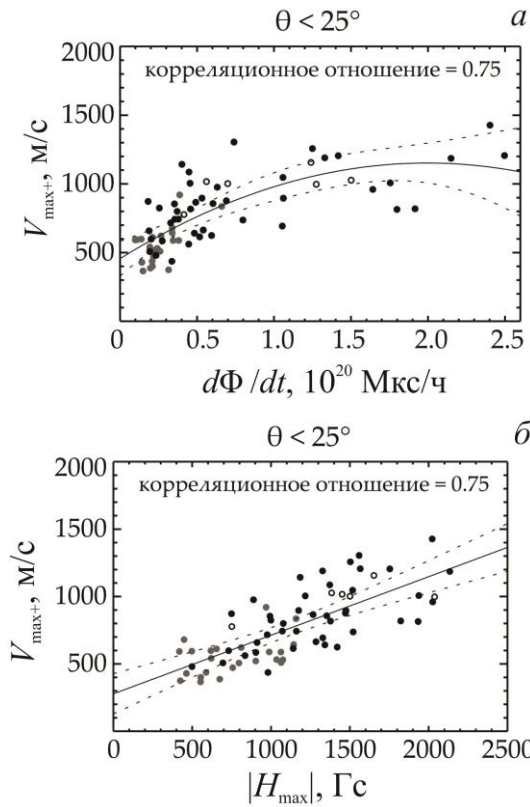


Рис. 5. Максимальные положительные доплеровские скорости $V_{\max+}$ (движение плазмы от наблюдателя) в зависимости от скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$ (а) и от абсолютной максимальной напряженности магнитного поля H_{\max} (б) в первые часы появления активных областей в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$). Сплошная линия соответствует уравнениям (6) на графике (а) и (7) на графике (б); пунктирная линия показывает 99%-й уровень значимости для среднего значения. Обозначения символов такие же, как на рис. 4

Центролимбовые зависимости на рис. 3 показывают, что при появлении активных областей горизонтальная составляющая доплеровских скоростей ($\theta > 50^\circ$) имеет широкий диапазон значений. Сопоставление доплеровских скоростей с параметрами магнитного поля в активных областях, возникающих вблизи лимба, показало, что наибольшие значения положительных и отрицательных доплеровских скоростей связаны квадратично со скоростью роста магнитного потока (корреляционные отношения 0.78 и -0.73) и линейно — с максимальной напряженностью магнитного поля (корреляционные отношения 0.58 и -0.56) (рис. 6). В результате регрессионного анализа данных были получены следующие уравнения:

$$V_{\max+} = 782.27 + 6.68 \cdot 10^{-18} d\Phi / dt - 9.65 \cdot 10^{-39} (d\Phi / dt)^2, \quad (8)$$

$$V_{\max-} = -890.85 - 5.95 \cdot 10^{-18} d\Phi / dt + 9.94 \cdot 10^{-39} (d\Phi / dt)^2, \quad (9)$$

$$V_{\max+} = 630.53 + 0.85 H_{\max}, \quad (10)$$

$$V_{\max-} = -770.35 - 0.71 H_{\max}, \quad (11)$$

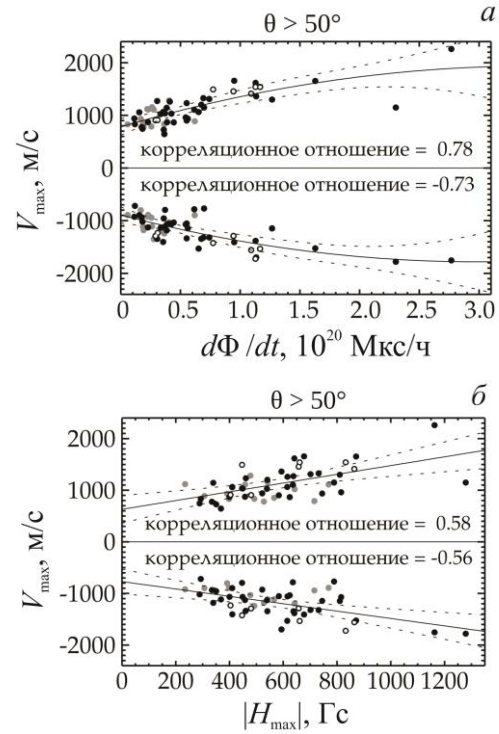


Рис. 6 Абсолютные максимальные положительные и отрицательные доплеровские скорости в зависимости от скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$ (а) и от абсолютной максимальной напряженности магнитного поля H_{\max} (б) в первые часы появления активных областей вблизи лимба ($\theta > 50^\circ$). Сплошные линии соответствуют уравнениям (8) и (9) на графике (а) и уравнениям (10) и (11) — на графике (б); пунктирная линия показывает 99%-й уровень значимости для среднего значения. Обозначения символов такие же, как на рис. 4

где $V_{\max+}$ и $V_{\max-}$ — наибольшие значения положительных и отрицательных доплеровских скоростей, [м/с]; $d\Phi/dt$ — скорость роста магнитного потока, [Мкс/ч]; H_{\max} — максимальная напряженность магнитного поля, [Гс].

3.4. Связь между скоростью роста магнитного потока и максимальной напряженностью магнитного поля

Для активных областей, возникающих в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$), найдена квадратичная связь между скоростью роста магнитного потока и максимальной напряженностью магнитных полей (рис. 7). Связь имеет относительно низкую дисперсию и высокое корреляционное отношение (0.88). Уравнение, полученное в результате регрессионного анализа, имеет следующий вид:

$$d\Phi / dt = 3.52 \cdot 10^{19} - 7.27 \cdot 10^{16} H_{\max} + 7.49 \cdot 10^{13} H_{\max}^2, \quad (12)$$

где $d\Phi/dt$ — скорость роста магнитного потока в первые часы выхода магнитного потока [Мкс/ч]; H_{\max} — максимальная напряженность магнитного поля, [Гс].

С точки зрения теории зависимость является ожидаемой. Магнитный поток выходит на поверхность под действием силы магнитной плавучести, которая

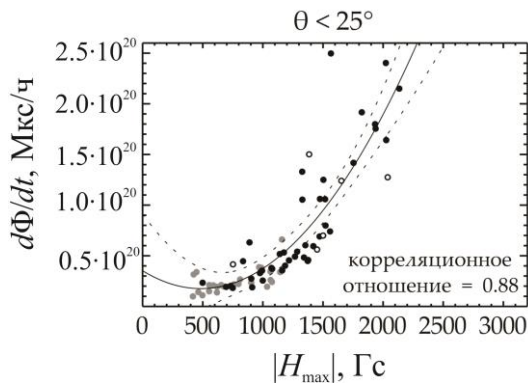


Рис. 7. Скорость роста магнитного потока $d\Phi/dt$ в зависимости от абсолютной максимальной напряженности магнитного поля H_{\max} в первые часы появления активных областей в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$). Сплошная линия соответствует уравнению (12); пунктирная линия — 99%-му уровню значимости для среднего значения. Обозначения символов такие же, как на рис. 4

пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля B^2 [Parker, 1955]. Чем больше напряженность магнитного поля, тем больше магнитное и меньше газовое давление внутри магнитной структуры. Низкое газовое давление приводит к высокой силе магнитной плавучести и, как следствие, к высокой скорости роста магнитного потока.

3.5. Начальная и максимальная стадии развития активных областей

Проведено сопоставление доплеровских скоростей и параметров магнитного поля между начальной стадией и максимумом развития активных областей. Рассматривались активные области, возникающие в центральной части солнечного диска ($\theta < 25^\circ$). Абсолютные максимальные отрицательные доплеровские скорости в первые часы появления магнитного потока не показывают связи с полным беззнаковым магнитным потоком в максимуме развития активных областей (рис. 8, а). Сопоставление максимальных положительных доплеровских скоростей и скорости роста магнитных потоков с максимальной величиной полного беззнакового магнитного потока показывает степенную связь с высокой дисперсией (рис. 8, б, в). Степенная связь, но с меньшей дисперсией, между скоростью роста и максимальной величиной магнитного потока была найдена ранее [Otsuji et al., 2011]. В нашей работе слабая связь между рассматриваемыми параметрами может объясняться тем, что магнитный поток активных областей выходит отдельными порциями на временных масштабах от нескольких часов до 5–7 дней, поэтому доплеровские скорости и параметры магнитного поля в начале возникновения не характеризуют активную область в максимуме развития.

ВЫВОДЫ

Сопоставление доплеровских скоростей с параметрами магнитного поля при появлении активных областей на уровне фотосферы показало следующие результаты.

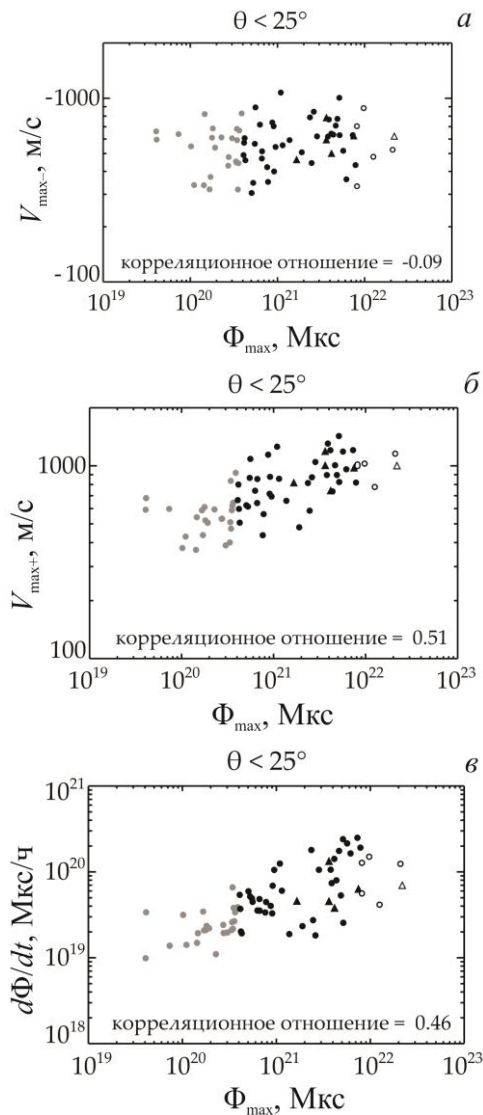


Рис. 8. Связь абсолютных максимальных отрицательных доплеровских скоростей $V_{\max-}$ (а), максимальных положительных доплеровских скоростей $V_{\max+}$ (б), скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$ в первые часы появления активных областей с полным беззнаковым магнитным потоком в максимуме развития Φ_{\max} (в). Кружками обозначены активные области, где Φ_{\max} определялся по максимальной точке перегиба в кривой роста магнитного потока, треугольниками — активные области, где Φ_{\max} определялся по последнему измерению, и активные области, в которых достигалось магнитное насыщение. В этих объектах полный беззнаковый магнитный поток в максимуме развития может быть выше. Обозначения символов такие же, как на рис. 4

1. Значения абсолютных максимальных отрицательных доплеровских скоростей, сопровождающих выход магнитного потока в первые часы, возрастают с увеличением гелиоцентрического угла. Полученная зависимость показывает, что в начале образования активных областей горизонтальные скорости растекания плазмы превосходят вертикальные скорости подъема.

2. Доплеровские скорости подъема плазмы в начале выхода магнитного потока не показывают связи с параметрами магнитного поля. Из этого следует, что фотосферный подъем плазмы не характеризует мощность возникающих активных областей.

3. Доплеровские скорости опускания плазмы имеют высокие значения, которые существенно превосходят доплеровские скорости конвективных течений спокойного Солнца. Они связаны квадратично со скоростью роста магнитного потока и линейно — с максимальной напряженностью магнитных полей.

4. Горизонтальные доплеровские скорости связаны квадратично со скоростью роста магнитного потока и линейно — с максимальной напряженностью магнитных полей.

5. Найдена квадратичная зависимость с низкой дисперсией и высоким корреляционным отношением между скоростью роста магнитного потока и максимальной напряженностью магнитных полей на начальной стадии появления активных областей. Характер зависимости согласуется с законом магнитной плавучести и объясняется действием сил магнитной плавучести, пропорциональных квадрату напряженности магнитного поля.

6. Наблюдается слабая степенная связь максимальных положительных доплеровских скоростей и скорости роста магнитного потока в первые часы появления активных областей с величиной полного беззнакового магнитного потока в максимуме их развития.

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.
- 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.
- Bai T., Scherrer P.H., Bogart R.S. The Evershed effect: An MDI investigation // Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-Like Stars / Ed. Korzenik S. 1998. SP-418. P. 607–610.
- 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.
- Bonaccini D., Landi Degl'Innocenti E., Smaldone L.A., Tاملын P. High resolution spectropolarimetry of an active region // Solar Polarimetry / Ed. November L.J. 1991. P. 251–256.
- 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.
- Cho K.-S., Bong S.-C., Chae J., et al. Tiny pores observed by Hinode/Solar optical telescope // Astrophys. J. 2010. V. 723. P. 440–448. DOI: 10.1088/0004-637X/723/1/440.
- Chou D., Wang H. The separation velocity of emerging magnetic flux // Solar Phys. 1987. V. 110. P. 81–99. DOI: 10.1007/BF00148204.
- Frazier E.N. The magnetic structure of arch filament systems // Ibid. 1972. V. 26. P. 130–141. DOI: 10.1007/BF00155113.
- Garcia de La Rosa J.I. The observation of intrinsically different emergences for large and small active regions // Ibid. 1984. V. 92. P. 161–172. DOI: 10.1007/BF00157243.
- Golovko A.A. Relationship between the maximum magnetic fluxes and lifetimes of solar active regions // Astron. Rep. 1998. V. 42. P. 546–552. DOI: 10.1007/BF00149682.
- 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., Martinez 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.
- Keil S.L., Balasubramaniam K.S., Smaldone L.A., Reger B. Velocities in solar pores // Astrophys. J. 1999. V. 510. P. 422–443. DOI: 10.1086/306549.
- 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 horizontal component of photospheric plasma flows during the emergence of active regions on the Sun // Solar Phys. 2013. V. 284. P. 343–361. DOI: 10.1007/s11207-012-0181-8.
- 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., Martinez Pillet V. Vector magnetic fields of emerging solar flux. I. Properties at the site of emergence // Ibid. 1998. V. 333. P. 1053–1068.
- Liu Y., Norton A.A., Scherrer P.H. A note on saturation seen in the MDI/SOHO magnetograms // Solar Phys. 2007. V. 241. P. 185–193. DOI: 10.1007/s11207-007-0296-5.
- Meunier N., Lagrange A.M., Desort M. Reconstructing the solar integrated radial velocity using MDI/SOHO // Astron. Astrophys. 2010. V. 519. A66.
- 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.
- Parker E.N. The formation of sunspots from the solar toroidal field // Astrophys. J. 1955. V. 121. P. 491–507. DOI: 10.1086/146010.
- Parnell C.E., DeForest C.E., Hagenaar H.J., et al. A powerlaw distribution of solar magnetic fields over more than five decades in flux // Ibid. 2009. V. 698. P. 75–82. DOI: 10.1088/0004-637X/698/1/75.
- Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., et al. MDI Engineering Team. 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.

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

Snodgrass H.B., Ulrich R.K. Rotation of Doppler features in the solar photosphere // *Ibid.* 1990. V. 351. P. 309–316. DOI: 10.1086/168467.

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., 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. DOI: 10.1007/s11207-008-9302-9.

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. Elements and patterns in the solar magnetic field // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1987. V. 25. P. 83–111. DOI: 10.1146/annurev.aa.25.090187.000503.

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

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.

Bai T., Scherrer P.H., Bogart R.S. The Evershed effect: An MDI investigation. *Korzennik S. (ed.) Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-Like Stars.* 1998, SP-418, pp. 607–610.

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.

Bonaccini D., Landi Degl'Innocenti E., Smaldone L.A., Tamblyn P. High resolution spectropolarimetry of an active region. November, L.J. (ed.) *Solar Polarimetry.* 1991, pp. 251–256.

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.

Cho K.-S., Bong S.-C., Chae J., Kim Y.-H., Park Y.-D. Tiny pores observed by Hinode/Solar optical telescope. *Astrophys. J.* 2010, vol. 723, pp. 440–448. DOI: 10.1088/0004-637X/723/1/440.

Chou D., Wang H. The separation velocity of emerging magnetic flux. *Solar Phys.* 1987, vol. 110, pp. 81–99. DOI: 10.1007/BF00148204.

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

Garcia de La Rosa J.I. The observation of intrinsically different emergences for large and small active regions. *Solar Phys.* 1984, vol. 92, pp. 161–172. DOI: 10.1007/BF00157243.

Golovko A.A. Relationship between the maximum magnetic fluxes and lifetimes of solar active regions. *Astron. Rep.* 1998, vol. 42, pp. 546–552. DOI: 10.1007/BF00149682.

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., Martínez 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.

Keil S.L., Balasubramaniam K.S., Smaldone L.A., Reger B. Velocities in solar pores. *Astrophys. J.* 1999, vol. 510, pp. 422–443. DOI: 10.1086/306549.

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 horizontal component of photospheric plasma flows during the emergence of active regions on the Sun. *Solar Phys.* 2013, vol. 284, pp. 343–361. DOI: 10.1007/s11207-012-0181-8.

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., Martínez 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 Y., Norton A.A., Scherrer P.H. A note on saturation seen in the MDI/SOHO magnetograms. *Solar Phys.* 2007, vol. 241, pp. 185–193. DOI: 10.1007/s11207-007-0296-5.

Meunier N., Lagrange A.M., Desort M. Reconstructing the solar integrated radial velocity using MDI/SOHO. *Astron. Astrophys.* 2010, vol. 519, A66.

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.

Parker E.N. The formation of sunspots from the solar toroidal field. *Astrophys. J.* 1955, vol. 121, pp. 491–507. DOI: 10.1086/146010.

Parnell C.E., DeForest C.E., Hagenaar H.J., Johnston B.A., Lamb D.A., Welsch B.T. A powerlaw distribution of solar magnetic fields over more than five decades in flux. *Astrophys. J.* 2009, vol. 698, pp. 75–82. DOI: 10.1088/0004-637X/698/1/75.

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.

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

Snodgrass H.B., Ulrich R.K. Rotation of Doppler features in the solar photosphere. *Astrophys. J.* 1990, vol. 351, pp. 309–316. DOI: 10.1086/168467.

Solanki 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., 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. DOI: 10.1007/s11207-008-9302-9.

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. Elements and patterns in the solar magnetic field. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1987, vol. 25, pp. 83–111. 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.