

УДК 523.9

**О связи магнитного поля и поля скоростей
в солнечном пятне**

В. М. Григорьев, А. А. Певцов

Изучается связь магнитного поля и поля скоростей в солнечных пятнах на ранней стадии их развития (по наблюдениям на вектор-магнитографе Саянской обсерватории). Отмечено, что при совмещении карт продольной составляющей магнитного поля и поля лучевых скоростей максимальная скорость в области пятна в основном приходится на нулевую линию магнитного поля. Исследуется зависимость лучевой скорости от угла наклона вектора магнитного поля к лучу зрения. В предположении цилиндрической симметрии восстановлены векторы скорости и магнитного поля для лидирующего пятна группы СД 135/84.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии двух систем движений. Вещество в пятне в основном движется поперек силовых линий магнитного поля, однако в тени пятна существует область, в которой направления магнитного поля и скорости движения вещества совпадают.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN MAGNETIC FIELD AND VELOCITY FIELD IN A SUNSPOT, by Grigor'ev V. M., Pevtsov A. A.— The paper deals with studying the relationship between magnetic field and velocity field in sunspots at the early stage of their development using the observations with the vector magnetograph of the Sayan observatory. It is pointed out that when the maps of the magnetic field longitudinal component and the radial velocity are superimposed, the maximum velocity in the sunspot region corresponds mainly to the magnetic field zero line. A dependence of the radial velocity on the slope of the magnetic field vector to the line of sight is investigated. The approximation of cylindrical symmetry is used to reconstruct the velocity and magnetic field vectors for the leading sunspot of the group SD 135/1984. The results obtained testify to the existence of two systems of motions. The matter within the sunspot is moving mainly across the magnetic field lines but the sunspot umbra involves the region in which the directions of the magnetic field and of mass motion are the same.

Движение вещества в солнечных пятнах уже неоднократно изучалось. Обзор и обширная библиография по этому вопросу приведены в работах [3, 7]. Из последних публикаций отметим статьи [8, 9]. Связь магнитного поля с полем скоростей на фотосферном уровне изучалась в [1, 4, 5, 8]. Результаты этих исследований достаточно противоречивы. Так, наблюдения, представленные в [4, 5], соответствуют общепринятой в настоящее время схеме движения вещества вдоль силовых линий магнитного поля. Согласно [1], угол между вектором скорости и направлением магнитного поля, возможно, составляет 7° . В работе [2] отмечено совпадение холмов магнитного поля с нулевой линией лучевой скорости, что противоречит параллельности поля и движения. Все перечисленные результаты получены для развитых пятен. В нашей работе изучается связь магнитного поля и поля скоростей для молодых развивающихся пятен.

Материалом для работы послужили карты магнитных полей (H_{\parallel} и H_{\perp}) и лучевых скоростей (V_{\parallel}), полученные на вектор-магнитографе Саянской обсерватории [10] в линии Fe I λ 525.0 (пространственное разрешение $4 \times 2''$, скорость сканирования $4''/с$, скорости регистрировались с помощью компенсатора лучевых скоростей). Для сравнительного анализа использовались аналогичные карты обсерватории Окаяма (Япония), любезно предоставленные нам М. Макитой, и опубликованные данные [9]. Количественные оценки основаны на наблюдениях двух биполярных групп солнечных пятен (23—26 июня АО СД 135/84

и 9 июля АО СД 148/84). Всего было обработано 18 карт (13 карт для АО СД 135 и 5 карт для АО СД 148). Обе группы находились на ранней стадии развития.

При сопоставлении одновременно полученных карт продольной составляющей магнитного поля (H_{\parallel}) и лучевых скоростей (V_{\parallel}) обращает на себя внимание пространственная антикорреляция H_{\parallel} и V_{\parallel} .

Довольно часто максимальное значение V_{\parallel} приходится на нулевую линию H_{\parallel} , появляющуюся за счет проекции, а нулевая линия V_{\parallel} попадает на максимум H_{\parallel} . Это впервые было отмечено в работе [8]. Сопоставление опубликованных [9] карт H_{\parallel} и V_{\parallel} (скорости наблюдались по немагниточувствительной линии Fe I λ 557.6) показывает сходную антикорреляцию. Такое поведение магнитного поля и лучевых скоростей не соответствует общепринятой картине движения

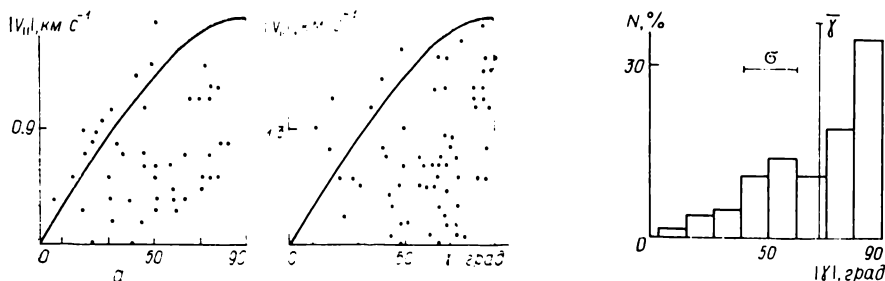


Рис. 1. Зависимость лучевой скорости от модуля угла γ для лидирующего (а) и хвостового (б) пятен АО СД 135/84; 25.06.84; 2^h42^m—4^h16^m UT

Рис. 2. Гистограмма распределения максимальных лучевых скоростей для АО СД 135/84 и СД 148/84

вещества вдоль силовых линий магнитного поля. При совпадении направлений магнитного поля и скорости движения в пятне должны примерно совпадать их нулевые линии и максимумы. Такого совпадения на обработанных картах нет. Имеющиеся в нашем распоряжении материалы наблюдений позволяют кроме различных компонент вектора магнитного поля получить угол (γ) наклона этого вектора к лучу зрения. Для всех 18 карт были построены графики зависимости лучевой скорости от модуля угла γ .

Очевидно, что, если скорость движения вещества совпадает с вектором магнитного поля и одинакова во всех точках пятна, зависимость $|V_{\parallel}| = f(|\gamma|)$ будет иметь вид $|V_{\parallel}| = |V_{\parallel \max}| \cos|\gamma|$, а при ортогональности поля и движения — соответственно $|V_{\parallel}| = |V_{\parallel \max}| \sin|\gamma|$. Если скорости в различных местах пятна неодинаковы, точки на графике будут располагаться под названной кривой. На рис. 1 приведены типичные примеры $|V_{\parallel}| \leq f(|\gamma|)$ для лидирующего и хвостового пятен группы СД 135 (кривые на рисунке соответствуют функции $\sin|\gamma|$). Видно, что и эта зависимость свидетельствует об ортогональности векторов магнитного поля и скорости. То же, на наш взгляд, подтверждают и гистограммы распределения $V_{\parallel \max}$ по 10-градусным интервалам, построенные по всем картам. На рис. 2 показана единая гистограмма для всех пятен серии. Максимальные скорости попадают в промежуток $70^\circ < \gamma \leq 90^\circ$ (54 % всех случаев), $40^\circ < \gamma \leq 70^\circ$ (36 %), $0^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$ (10 %). Среднее значение γ для этой гистограммы $\gamma = 67 \pm 19^\circ$.

Несмотря на хорошее соответствие $|V_{\parallel}| \leq f(|\gamma|)$ случаю ортогональности поля и скорости на каждом из таких графиков (для АО СД 135/84) имеется небольшая группа точек, выпадающих из этой зависимости более чем на 300 м/с (максимально возможная ошибка в определении скоростей не превышает этой величины). Анализ карт

лучевых скоростей показал, что все «выскакивающие» точки находятся в тени пятна на каждой карте, а положение области этих точек не изменяется от карты к карте. Такое распределение лучевых скоростей, по-видимому, имеет неслучайный характер и может быть интерпретировано как наличие двух систем движений в солнечном пятне — поперек силовых линий в полутени и вдоль них в тени пятна.

26 июня лидирующее пятно группы СД 135 имело приблизительно симметричную форму и установившийся эффект Эвершеда. Кроме того, в этот день наблюдения были выполнены с более высоким разрешением

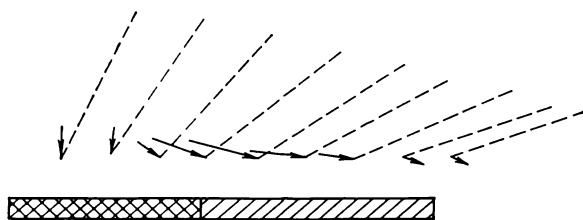
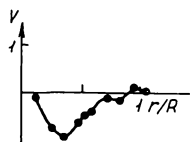
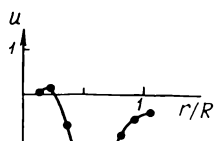
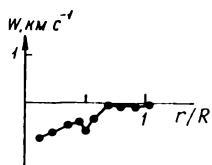


Рис. 4. Проекция векторов скорости и средние углы наклона силовых линий магнитного поля для лидера АО СД 135/84

Рис. 3. Компоненты вектора скорости для лидера АО СД 135/84. R — радиус пятна. Внизу показаны тень и полутень пятна

(пространственное разрешение $2 \times 2''$, скорость сканирования $2''/с$). Все это позволило определить вектор скорости на различных расстояниях r от центра пятна в предположении цилиндрической симметрии. Компоненты вектора скорости определялись по формулам, приведенным в работе [9]:

$$W(r) = \frac{1}{2\pi \cos \omega} \int_0^{2\pi} V_{\parallel}(r, \theta) d\theta,$$

$$U(r) = \frac{1}{\pi \sin \omega} \int_0^{2\pi} V_{\parallel}(r, \theta) \cos \theta d\theta,$$

$$V(r) = \frac{-1}{\pi \sin \omega} \int_0^{2\pi} V_{\parallel}(r, \theta) \sin \theta d\theta,$$

где W , U , V — вертикальная, горизонтальная и азимутальная компоненты скорости; ω — гелиоцентрическое расстояние пятна; θ — угол интегрирования в солнечном пятне.

На рис. 3 приведены результаты такого расчета. В тени пятна наблюдается опускание газа (скорость 0.8 км/с), радиальная составляющая указывает на вытекание вещества из пятна и достигает максимума (1.7 км/с) в полутени, ближе к границе тень—полутень. В тени пятна, вблизи границы тень—полутень, обнаружена большая азимутальная составляющая скорости (около 1 км/с против часовой стрелки). В целом полученная картина движений согласуется с результатами подобных исследований многих авторов.

После определения вектора скорости находился угол наклона этого вектора к солнечной поверхности. На рис. 4 показаны проекции век-

тора (стрелки) скорости на плоскость, перпендикулярную поверхности Солнца. Кроме того, нанесены углы наклона (штриховые линии) вектора магнитного поля, построенные по нашим наблюдениям для этого пятна. Найденная таким способом усредненная картина движений вещества в пятне не противоречит предложенной выше схеме.

Полученные результаты можно интерпретировать двумя различными способами: либо вещество в пятне действительно движется поперек силовых линий, либо кажущаяся ортогональность магнитного поля и скорости создается движением магнитного поля [6]. Анализ карт лучевых скоростей показывает, что на нулевой линии H_{\parallel} наблюдаются скорости примерно 2 км/с, направленные от наблюдателя. Такие лучевые скорости могут быть связаны либо с расширением магнитного поля, либо с его погружением. Скорость расширения магнитного поля можно определить из изменения площади пятна, если считать, что расширение магнитной трубки приводит к увеличению размеров солнечного пятна. Чтобы получилась наблюдаемая лучевая скорость, скорость расширения должна составлять 5—6 км/с. Такого большого изменения площади пятен не происходило. Далее, согласно общепринятым представлениям о возникновении пятен, магнитное поле обеих групп должно было всплывать, но не погружаться. Таким образом, следует принять, что на ранней стадии развития вещество в пятне в основном движется поперек силовых линий магнитного поля, однако в тени пятна скорость движения преимущественно направлена вдоль вектора магнитного поля.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность В. Л. Селиванову и Б. Ф. Осаку за помощь в проведении наблюдений.

1. Абдусаматов Х. И. Структура магнитного поля сложного пятна и ее связь с движением вещества // Солнеч. данные.— 1979.— № 11.— С. 93—97.
2. Баранов А. В., Лазарева Л. Ф. Магнитные поля и доплеровские скорости в группе пятен, находящейся на спокойной фазе развития // Там же.— № 9.— С. 96—102.
3. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна.— М.: Мир, 1967.—383 с.
4. Бумба В. Связь между магнитным полем и движением в одиночных солнечных пятнах // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1960.—23.— С. 277—290.
5. Котов В. А. Вращение вещества в солнечном пятне // Там же.— 1976.—54.— С. 184—200.
6. Кушлин Г. В., Степанов В. Е. Движение газа и магнитного поля в солнечном пятне // Солнеч. данные.— 1963.— № 2.— С. 43—50.
7. Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности.— М.: Наука, 1985.— 256 с.
8. Berton R. Basic geometrical properties of the velocity and magnetic field in sunspots // Astron. and Astrophys.— 1985.—149, N 2.— P. 291—294.
9. Dialelis D., Mein P., Alissandrakis C. E. The Evershed flow as a steady-state homogeneous phenomenon // Ibid.— 1985.—147, N 1.— P. 93—102.
10. Grigoryev V. M., Kobanov N. I., Osak B. F. et al. Vector-magnetograph of Savan Solar Observatory // NASA Conference Publication 2374.— Springfield: NASA Sci. and Techn. Inform. Branch, 1985.— P. 231—256.

Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
Сиб. отд-ния АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию
09.06.86