

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ISSN 0135-3748

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

СИБИРСКИЙ ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА,
ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

ИССЛЕДОВАНИЯ

ПО ГЕОМАГНЕТИЗМУ, АЭРОНОМИИ
И ФИЗИКЕ СОЛНЦА

Выпуск 83



«НАУКА»

УДК 523.98

О ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В СОЛНЕЧНОМ ПЯТНЕ
А. А. Певцов

ON A TWO-COMPONENT MODEL OF MAGNETIC FIELD
AND VELOCITY FIELD IN A SUNSPOT

A. A. Pevtsov

A comparative analysis of maps of line-of-sight velocities and magnetic fields in AR SD 42/86 obtained on the Sayan Observatory vector-magnetograph has confirmed the previous conclusion about mass motion across magnetic field lines in a sunspot. It is pointed out that these results contradict other observers' conclusions. An explanation for such apparent conditions for a non-frozen-in field to the plasma in terms of a known two-component model of sunspot penumbra is proposed. It is suggested that the penumbra consists of two kinds of elements, namely a dark component with a nearly horizontal magnetic field of greater strength, and a light component with a nonhorizontal field of smaller strength. In the dark component material flows out of the spot (at maximum velocity of $4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), whereas in the light component material descends into the spot (at the velocity of $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). By averaging such fine structure by means of the magnetograph aperture one gets the observed distribution of magnetic field and line-of-sight velocity. This model explains reasonably well the discrepancies associated with the field frozen in to plasma conditions as well as the fine structure ("flags") of the Evershed effect.

Магнитное поле и поле скоростей в полутени развитого солнечного пятна неоднородны по своей структуре. По наблюдениям Беккерса и Прётера [1] магнитное поле в темных волокнах полутени почти горизонтально и имеет большую напряженность, чем поле в светлых волокнах. Эффект Эвершеда (вытекание вещества из пятна в фотосферу) также наблюдается в темных волокнах, а в светлых - вещество медленно втекает в пятно. Обзор этих наблюдений дан Обриджко [2]. Однако большая часть современных фотоэлектрических наблюдений магнитных полей и лучевых скоростей в солнечных пятнах проводится с низким пространственным разрешением ($1-2''$). Получаемые результаты в этом трактуются в рамках однородной полутени, что приводит порой к противоречивым выводам. Это относится, в частности, к вопросу о замороженности магнитного поля в плазму в пятне. Например, наблюдения Котова [3] показывают хорошее совпадение нулевых линий и холмов поля и скорости, у нас же наблюдалась их пространственная ан-

तिकорреляция [4]. Несовпадение нулевых линий магнитного поля и лучевых скоростей отмечалось многими авторами (впервые, очевидно, в работе [5]). Куклин и Степанов [6] такое несовпадение отождествляли с движением магнитного поля, Мальтби и Эриксен [7] описали эффект Эвершеда в терминах акустической волны, распространяющейся поперек силовых линий поля.

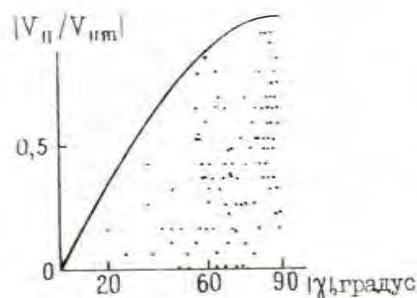
В данной работе сделана попытка объяснить противоречия, связанные с вмороженностью, в рамках двухкомпонентной модели магнитного поля и поля скоростей в солнечном пятне.

1. Магнитное поле и скорости активной области СД 42/86

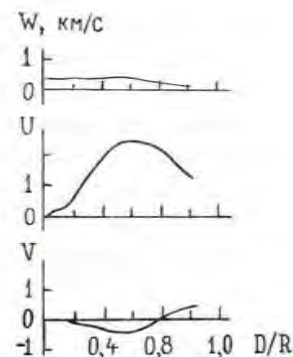
Униполярное солнечное пятно А0 СД 42/86 наблюдалось на вектор-магнитографе Саянской обсерватории 25 августа и с 30 августа по 2 сентября 1986 г. Подробное описание прибора и методики обработки приведено в работе [8]. Наблюдения проводились в линии FeI 525,0 нм, пространственное разрешение составляло $2 \times 2''$, скорость сканирования $2''/с$. Дрожание изображения достигало $4-6''$. Одновременно с регистрацией всех компонентов магнитного поля записывался сигнал лучевой скорости от компенсатора лучевых скоростей. Всего было проведено 16 серий наблюдений.

Карты распределения продольной компоненты $H_{||}$ магнитного поля и лучевых скоростей $V_{||}$, построенные по этим наблюдениям, показывают пространственную антикорреляцию, описанную нами ранее [9]. На 15 картах максимум $V_{||}$ лежит на нулевой линии $H_{||}$, возникающей за счет проекции, либо в пределах $2-4''$ от нее. Наблюдение от 30 августа было исключено из такого сопоставления, поскольку пятно в этот день находилось вблизи центра диска ($\cos \theta = 0,932$), эффект Эвершеда в нем не наблюдался.

Кроме прямого сравнения для каждой карты строилась зависимость модуля лучевой скорости (нормированной на максимальную лучевую скорость $V_{||m}$ на карте) от величины угла наклона $|\chi|$ вектора магнитного поля к лучу зрения. При параллельности поля и скорости наибольшие $V_{||}$ должны соответствовать наименьшим χ . Полученные нами соотношения между $V_{||}$ и χ указывают на ортогональность движения и поля. На рис. 1 приведен пример такой зависимости для наблюдения от 1 сентября (I,02-I,21UT), где сплошная линия соответствует $\sin|\chi|$. Видно, что максимальные лучевые скорости находятся вблизи больших углов χ , т. е. в тех местах, где магнитное поле почти перпендикулярно лучу зрения. Далее, для всех 15 карт в предположении круговой симметрии рассчитывалось распределение вектора скорости по радиусу пятна. Для расчетов использовался метод, описанный в работе [4]. Возможный наклон поля скоростей к поверхности Солнца [9] не учитывался, поскольку, как уже говорилось, в центре диска эффект Эвершеда в пятне исчезал.



Р и с. 1. Зависимость лучевой скорости от модуля угла χ . Сплошная линия - $\sin|\chi|$



Р и с. 2. Компоненты вектора скорости для А0 СД 42/86

Полученное распределение трех компонент вектора скорости для упомянутого выше наблюдения показано на рис. 2. Преобладающее движение в этом пятне - вытекание (U - радиальная составляющая скорости), максимальная скорость $2,5 \text{ км/с}$ приходится на $D/R = 0,6$ (D/R - расстояние от центра пятна в долях его радиуса), по всему пятну (как и в [9]) наблюдается опускание со скоростью около $0,3-0,4 \text{ км/с}$ (W - вертикальная составляющая). Тангенциальная (V) компонента скорости показывает сложный характер вращения вещества в пятне (максимальное значение $0,4 \text{ км/с}$, знак "+" соответствует вращению против часовой стрелки). Такое распределение вектора скорости соответствует описанному ранее (например, в [9]), однако следует обратить внимание на то, что практически по всей поверхности пятна скорости движения вещества направлены поперек силовых линий магнитного поля. Это хорошо заметно на рис. 3, где показаны проекции векторов скорости (стрелки) и силовых линий магнитного поля (штриховые линии) на плоскость, перпендикулярную поверхности Солнца (для того же наблюдения). Вектор магнитного поля также находился из предположения круговой симметрии.

Описанные выше результаты свидетельствуют или о невмороженности поля в плазму в солнечном пятне, или требуют другого объяснения, если не отказываться от вмороженности. В поисках ответа мы попытались разделить магнитное поле и скорость на два компонента так, чтобы один компонент давал больший вклад в сигнал поля, а другой - в сигнал скорости.

На рис. 3. Проекция векторов скорости (стрелки) и ориентация наклона силовых линий магнитного поля (штрихи). Внизу показаны тень и полутень пятна



2. Двухкомпонентная модель магнитного поля полутени пятна

Представим, что реальное магнитное поле в полутени пятна состоит из двух независимых компонентов: темного с сильным горизонтальным полем и светлого с более вертикальным магнитным полем. Такая модель достаточно хорошо соответствует наблюдениям с высоким пространственным разрешением [2]. При наблюдении с низким разрешением сигналы от этих двух компонентов будут смешиваться и давать некий результирующий (усредненный) сигнал

$$\begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = A_d \begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_d + (1 - A_d) \begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_s, \quad (1)$$

где J, Q, U, V - соответствующие параметры Стокса; A_d - характеризует вклад темного компонента (здесь и далее индексы d и s относятся к темному и светлому компонентам соответственно).

Коэффициент A_d определяется как

$$A_d = \frac{I_d}{I_{pu}} (1 - d), \quad (2)$$

где I_d - яркость темного компонента относительно фотосферы, d - доли поверхности, занятая светлыми элементами. Яркость полутени I_{pu} находим из уравнения

$$I_{pu} = (1 - d)I_d + dI_s. \quad (3)$$

Таким образом, имея измеренное (усредненное) магнитное поле и задав поле в темном компоненте, можно попытаться восстановить поле в светлом компоненте.

Следуя Витману (см. [2]), аппроксимируем величину усредненного поля функцией

$$H(\rho) = H_0 (1 + \rho^2 + \rho^4 + \rho^8 + \rho^{16})^{-1}, \quad (4)$$

где H_0 - максимальная напряженность поля; ρ - расстояние от центра пятна в долях радиуса полутени. Распределение угла наклона δ вектора поля к вертикали возьмем из работы [10] (см. табл. I, столбец 3). Согласно данным Мюллера [11], положим, что $I_d = 0,52$, $I_s = 0,9$ для внутренней полутени и $I_d = 0,6$, $I_s = 0,95$ для внешней полутени, $d = 0,43$. Величину H_0 для усредненного поля примем равной 2900 Гс. Для темного компонента будем считать $H_0 = 3050$ Гс с тем же распределением (4) по ρ и горизонтальным направлением поля (такой выбор H_0 для темного элемента обусловлен желанием иметь напряженность $H_d = 1700$ Гс при $\rho = 0,7$ для сравнения с наблюдениями Абдусаматова [12]). Перечисленные параметры полностью

описывают усредненное поле (H, δ), поле темного компонента (H_d, δ_d) и позволяют рассчитать по (1)-(3) поле яркого компонента (H_s, δ_s) полутени.

С помощью калибровочных кривых, рассчитанных Штауде [13], по заданным H и δ , H_d и δ_d определялись соответствующие параметры Стокса:

$$\begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_d.$$

Затем по формулам (1)-(3) находились $\begin{pmatrix} J \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_s$

и, наконец, H_s и δ_s . В табл. I приведены результаты этого расчета.

Таблица I

ρ	$H, \text{Гс}$	δ°	$H_d, \text{Гс}$	δ_d°	$H_s, \text{Гс}$	δ_s°
0,4	2445	59	2571	90	2100	44
0,5	2203	70	2317	90	2100	51
0,6	1925	78	2024	90	2000	68
0,7	1619	83	1703	90	1600	75
0,8	1291	87	1358	90	1300	85
0,9	941	89	990	90	800	90
1,0	580	90	610	90	500	90

Рассчитанное магнитное поле в светлых элементах вполне удовлетворяет наблюдаемым характеристикам. Так, угол наклона вектора к вертикали изменяется от 44° на внутренней границе полутени до 90° на ее внешней границе. Напряженность магнитного поля в светлом элементе на 100-300 Гс меньше, чем в темном. По оценке [12] эта разность составляет 100-400 Гс. Изменение свободного параметра H_0 для темного компонента меняет лишь величину H_s , но практически не сказывается на углах δ_s .

3. Структура скорости в полутени

Предположим теперь, что в полутени наряду с двумя структурами магнитного поля существует и две независимые системы движений: вдоль темных и светлых элементов соответственно. Конечно, введение в модель скоростей скажется и на следующем шаге: должны измениться H_s и δ_s рассчитанного магнитного поля, однако, поскольку мы

Таблица 2

ρ	$V_{ }$, км/с	γ°	ρ	$V_{ }$, км/с	γ°
1,0	-0,51	45	0,4	1,21	-76
0,9	-0,82	44	0,5	1,48	-65
0,8	-1,05	42	0,6	1,41	-57
0,7	-1,14	38	0,7	1,30	-52
0,6	-1,18	33	0,8	1,11	-48
0,5	-1,08	25	0,9	0,82	-46
0,4	-0,76	14	1,0	0,51	-45

строим только качественную модель, в первом приближении можно пренебречь такими изменениями.

Будем считать, что движение вещества из пятна происходит вдоль горизонтальной (темной) компоненты магнитного поля, а скорость такого движения в максимуме равна 4 км/с и изменится по тому же закону, что и радиальная компонента U на рис.2. В светлых элементах с более вертикальным полем происходит опускание вещества со скоростью I км/с. Для таких условий рассчитывалось усредненное поле скоростей. Скорости определились следующим образом. Прежде всего строился профиль спектральной линии. Интенсивность в таком профиле можно записать как

$$J(\lambda) = (1-d)J_d(\lambda + \Delta\lambda_d) + dJ_b(\lambda - \Delta\lambda_b),$$

где λ - длина волны; $\Delta\lambda$ - сдвиги линий для скоростей разных компонентов; остальные обозначения прежние. Для интенсивности континуума I_c используем соотношение (3). Остаточная интенсивность в линии тогда определится как

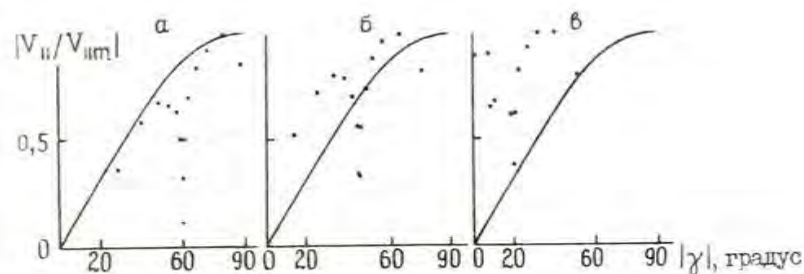
$$r(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{I_c} = \frac{\Gamma_d(\lambda + \Delta\lambda_d) + \frac{d}{(1-d)\varphi} \Gamma_b(\lambda - \Delta\lambda_b)}{1 + \frac{d}{(1-d)\varphi}},$$

где $\varphi = I_d / I_b$ - контраст темных элементов относительно светлых.

После определения $r(\lambda)$ вычислялись интегралы

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) d\lambda$$

в правом и левом крыльях линии. Пределы интегрирования соответствовали краям выходной щели фотометра вектор-магнитографа Саянской обсерватории ($\lambda_1 = 37 \text{ m\AA}$ - один край щели, $\lambda_2 = 95 \text{ m\AA}$ - другой край щели от центра несмещенной линии). Затем при неподвижных щелях (пределах интегрирования) контур $r(\lambda)$ сдвигался до достижения равенства интегралов в его крыльях. Такая процедура опреде-



Р и с. 4. Зависимости лучевой скорости от модуля угла γ для различных угловых расстояний пятна: а - $\theta = 30^\circ$; б - $\theta = 45^\circ$; в - $\theta = 70^\circ$



Р и с. 5. Схема тонкой структуры линии в эффекте Звершеда: а - $\theta = 45^\circ$; б - $\theta = 70^\circ$

ления скорости аналогична работе компенсатора лучевых скоростей магнитографа. Результаты, полученные этим способом, приведены в табл.2. Угловое расстояние пятна $\theta = 45^\circ$, Π обозначает лимбовую сторону полутени. Там же приведены углы γ для среднего поля. Положительная скорость соответствует движению от наблюдателя. Для приведенного случая видно, что большие скорости лежат в области больших углов γ . В целом распределение $V_{||}$ соответствует наблюдаемой усредненной картине эффекта Звершеда.

Рассмотрим, как будет меняться картина распределения $V_{||}$ с изменением углового расстояния θ пятна от центра диска. На рис.4 представлены зависимости $|V_{||}/V_{||m}|$ от $|\gamma|$ для трех значений углов θ . Для $\theta = 30^\circ$ (рис.4,а) эта зависимость хорошо соответствует ортогональности движения и поля, с ростом θ ($\theta = 45^\circ$, рис.4,б) эта кажущаяся ортогональность начинает нарушаться и для больших угловых расстояний ($\theta = 70^\circ$, рис.4,в) меняется на параллельность поля и скорости. Наблюдения Котова [3] как раз и соответствуют последнему случаю ($\theta = 66^\circ$), тогда как наши наблюдения имеют место при $\theta < 50^\circ$.

Рассмотренная модель движений в пятне объясняет и другую особенность в эффекте Звершеда - наблюдавшиеся Булбой [14] "плажки". Действительно, при усреднении двух полей скорости при различных соотношениях между ними результирующий контур линии покажет либо

асимметрию (рис.5,а), либо даже расщепится на два контура: почти несмещенную линию и сильно смещенный слабый спутник (рис.5,б).

Таким образом, рассмотренная модель двухкомпонентной структуры полутени хорошо согласуется с наблюдаемым распределением магнитного поля и скорости в пятне и объясняет некоторые противоречия, связанные с вмороженностью поля в плазму в солнечном пятне.

Автор выражает благодарность В.М.Григорьеву и В.Л.Селиванову за помощь в проведении наблюдений.

Л и т е р а т у р а

1. Beckers J.M., Schröther E.H. // Solar Phys. 1969. Vol.10, N 2. P.384-403.
2. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985. 256 с.
3. Котов В.А. // Изв.Крымской астрофиз.обсерв. 1976. Т.54. С.184-200.
4. Григорьев В.М., Певцов А.А. // Кинематика и физика небесных тел. 1986. Т.3, № 3. С.3-6.
5. Степанов В.Е. // Изв.Крымской астрофиз.обсерв. 1961. Т.25. С.154-173.
6. Куклин Г.В., Степанов В.Е. // Солнечные данные, 1963, № 2. С.43-50.
7. Maltby P., Eriksen G. // Solar Phys. 1967. Vol.2, N 2. P.249-257.
8. Grigoryev V.M., Kobanov N.I., Ovak et al // NASA Conference publication 2374. 1985. P.231-256.
9. Гопасяк С.И. // Изв.Крымской астрофиз.обсерв. 1977. Т.57. С.107-121.
10. Wittman A. // Solar Phys. 1974. Vol.36, N 1. P.29-44.
11. Muller R. // Solar Phys. 1973. Vol.32, N 2. P.409-420.
12. Abdusamatov H.I. // Solar Phys. 1976. Vol.48, N 1. P.117-119.
13. Staude J. // NHI-STP-Report. 1982, N 14. P.24-56.
14. Бумба В. // Изв.Крымской астрофиз.обсерв. 1960. Т.23. С.253-276.

Сибирский институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
СО АН СССР

Статья поступила
в декабре 1987 г.