

УДК 523.98

Анализ структуры магнитного поля в группе солнечных пятен № 135 за 24 июня 1984 г.

А. В. Баранов, В. М. Григорьев

Аппроксимация поля в данной группе бессильным или потенциальным полем дает нереальные результаты. Оценка электромагнитной силы показывает, что она играет важную роль в балансе давлений в пятне.

ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD STRUCTURE OF SUNSPOT GROUP № 135 JUNE 24 1984, by Baranov A. V., Grigor'ev V. M.—Approximation of the magnetic field in the sunspot group by force-free or potential field is shown to be incorrect. It is estimated that electromagnetic force is very significant in the sunspot pressure balance.

В настоящее время наблюдения на магнитографах позволяют получить карты напряженности магнитного поля H на нескольких уровнях атмосферы Солнца и, следовательно, построить пространственное распределение H в активной области. Однако эти уровни не всегда соответствуют тем высотам в атмосфере, на которых происходят различные активные процессы. Кроме того, существуют определенные трудности при сравнении результатов измерений поля в разных линиях, что усложняет количественное описание изменения магнитного поля с высотой. По этим причинам широко используются методы экстраполяции [4, 5 и др.], позволяющие восстанавливать структуру поля во всем объеме активной области.

В настоящей работе высказаны соображения о степени применимости этих методов. Использовалась карта полного вектора поля группы № 135 (по бюллетеню «Солнечные данные»), полученная 24 июня 1984 г. на Саянской обсерватории СибИЗМИР. Средний момент записи поля — $1^{\text{h}}24^{\text{m}}\text{UT}$, линия Fe I λ 525.02 нм, пространственное разрешение по карте — $4'' \times 4''$.

Исзуемая группа возникла 21 июня на видимой стороне диска, 25 июня она имела максимальную площадь (532 м. д. п., площадь главного пятна — 280 м. д. п.), а с 27 июня началось быстрое уменьшение площади главного пятна и всей группы в целом. С 29 июня общая площадь группы уже составляла менее 100 м. д. п., т. е. группа была короткоживущей и неустойчивой. В течение всего периода наблюдений главным в группе оставалось хвостовое пятно. Таким образом, по многим параметрам группа была аномальной.

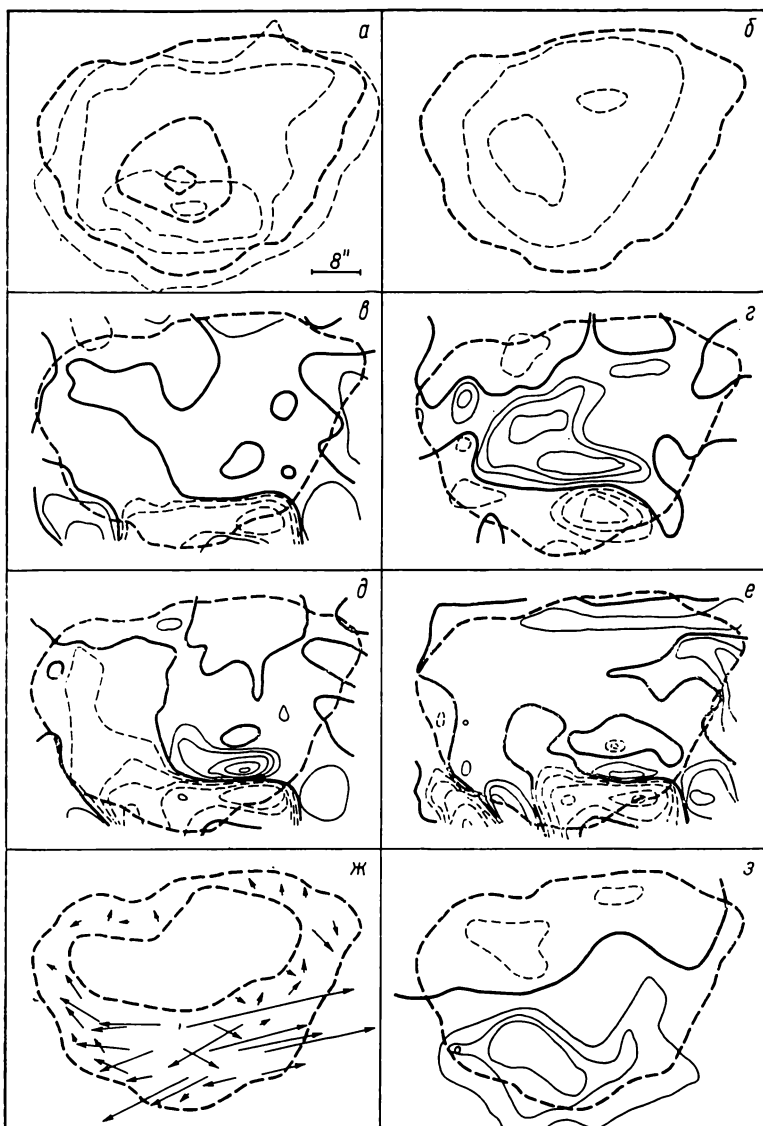
Поскольку все основные методы экстраполяции дают сходные результаты [3], мы провели расчеты только по методу Зехафера [5], позволяющему по формулам

$$\text{rot } \mathbf{H} = \alpha \mathbf{H}, \quad \alpha = \text{const}, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

и карте продольной составляющей поля $H_z(x, y)$ рассчитать пространственную конфигурацию поля. При расчетах использовался фрагмент карты 48×24 значения, охватывающий все районы активной области с $|\mathbf{H}| \geq 10$ мТ. Массив коэффициентов Фурье разложения H_z содержал $288 (24 \times 12)$ элементов.

Проанализируем структуру поля в главном пятне группы. Вначале находилось поле в потенциальном приближении, т. е. в формулах (1) полагалось $\alpha = 0$. Рассчитанные для пятна значения H_z в пределах ошибок метода (0.18, согласно [2]) совпадают с истинными H_z . Очень большие различия имеют измеренные ($H_{\text{и}}$) и рассчитанные ($H_{\text{р}}$) значения

величины полного поля. Все это иллюстрирует рисунок, на котором штриховой светлой линией показаны изолинии $H_{\Sigma}=25, 50, 100, 200$ мТ (карта а) и $H_p=25$ и 50 мТ (карта б). Штриховой жирной линией обозначены изолинии $\varphi=0.3, 0.5$ и изолиния относительной интенсивности $\varphi=0.9$, которую при расчетах и сравнениях мы принимали как условную границу пятна (последняя приведена также на картах в—з).



Карты параметров магнитного поля, электромагнитной силы и лучевой скорости в главном пятне группы

Видно, что различия рассчитанных и измеренных значений в пятне достигают 150 мТ, что, вероятно, превышает любые возможные ошибки наблюдений.

Примерно такие же расхождения получаются и при сравнении истинного поля с полем, рассчитанным в бессиловом приближении при $\alpha=5.5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$. Отмеченные значения α составляют 0.8 максимально возможного для метода [5] значения. Следовательно, в данной группе пятен структура магнитного поля на уровне измерений не удовлетворяет системе уравнений (1).

Поскольку в нашем распоряжении были все три составляющие \mathbf{H} , мы рассчитали структуру магнитного поля в пятне для $\alpha \neq \text{const}$. В этом случае система уравнений имеет вид

$$\text{rot } \mathbf{H} = \alpha \mathbf{H}, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0, \quad (\text{grad } \alpha \cdot \mathbf{H}) = 0 \quad (2)$$

и позволяет однозначно определить пространственную структуру α и \mathbf{H} . Эти уравнения решены методом конечных разностей для массива равноотстоящих узлов с шагом, равным разрешению ($4''$).

На рисунке (в) приведена карта α для главного пятна. Сплошной жирной линией обозначена изолиния $\alpha=0$, сплошной светлой — изолинии $\alpha=10^{-6}$ и 10^{-5} м^{-1} , штриховой светлой — соответствующие изолинии отрицательных значений α . Необходимо отметить, что ошибка в определении $\alpha = \text{rot}_z \mathbf{H} \cdot H_z^{-1}$ довольно значительна, поскольку в центральной части пятна значения H_x и H_y для соседних узлов карты близки, и ошибки определения их производных по координатам, как правило, велики. Возможны ошибки в определении координат точек измерений \mathbf{H} , хотя хорошее совпадение изофот группы, полученных с помощью магнитографа и по фотогелиограмме, свидетельствует об отсутствии систематических погрешностей. Предполагая, что погрешность в измерении составляющих \mathbf{H} определяется только шириной шумовой дорожки записи, оцениваем минимальный уровень ошибок значений α . В центральной части пятна наблюдается хорошее совпадение изолинии $|\mathbf{H}| = 100 \text{ мТ}$ и изолинии, ограничивающей область, где ошибка $\delta\alpha \leq 3 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$. Изолинии $|\mathbf{H}| = 25 \text{ мТ}$ неплохо соответствует изолиния, ограничивающая область $\delta\alpha \leq 10^{-7} \text{ м}^{-1}$. Отметим, что даже минимальные ошибки в определении α того же порядка, что и максимально возможные α для метода экстраполяции бессилового поля [5], и прямое сравнение не позволит отличить такое поле от потенциального. В области больших значений α , эта величина находится с точностью, в лучшем случае, равной нескольким десяткам процентов, поэтому можно говорить лишь о количественной оценке, а не об изменении α в пятне. Тем не менее видно, что в значительной части пятна значение α в десятки раз больше, чем максимально возможные, для которых применим метод экстраполяции [5]. В этом и заключается причина плохого соответствия истинного поля и рассчитанного в бессиловом приближении для $\alpha = \text{const}$.

Рассмотрим особенности построения реальной пространственной структуры магнитного поля по имеющейся карте и уравнениям (2). На рисунке (г) приведена карта градиентов продольного поля $\frac{\partial H_z}{\partial z}$, найденных из уравнения $\text{div } \mathbf{H} = 0$. Сплошной жирной линией обозначена изолиния $\frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$, штриховой светлой — изолинии положительных значений $\frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 \text{ мТ/км}$, сплошной светлой — изолинии отрицательных градиентов той же величины. Наибольшее значение положительных градиентов составляло 0.04, отрицательных — 0.08 мТ/км. Отмеченные результаты соответствуют данным В. А. Котова [1], Витмана [6] и других исследователей, определявших вертикальные градиенты подобным методом, хотя максимальные значения $\frac{\partial H_z}{\partial z}$ у нас несколько выше. Однако прямая экстраполяция поля на высоту 1000 км приводит к тому, что на рассчитанной карте H_z появляются области резкого увеличения поля и зоны смены знака поля. И то и другое противоречит наблюдениям. Если некоторое усиление поля с высотой и отмечалось [3], то оно, как правило, было на уровне ошибок измерений. Смена знака поля над пятном, насколько нам известно, еще ни разу

не наблюдалась. Единственная возможность согласовать рассчитанную картину с наблюдениями заключается в предположении, что $\frac{\partial H_z}{\partial z}$ быстро уменьшается с высотой: по абсолютной величине — в районах $\frac{\partial H_z}{\partial z} < 0$, со сменой знака — в районах $\frac{\partial H_z}{\partial z} > 0$. Первое уже неоднократно подтверждалось наблюдениями [3, 6].

Изменение с высотой поперечных составляющих поля определяется соотношением

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \alpha H_y + \frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial z} = -\alpha H_x + \frac{\partial H_z}{\partial y}. \quad (3)$$

Карты величин $\frac{\partial H_x}{\partial z}$ и $\frac{\partial H_y}{\partial z}$ представлены на рисунке (д, е). Сплошной жирной линией обозначены линии нулевых градиентов, штриховой светлой — изолинии положительных градиентов 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 мТ/км, сплошной светлой — изолинии отрицательных градиентов той же величины.

Наибольшее положительное значение $\frac{\partial H_x}{\partial z}$ составляло 1.4, отрицательное —

0.39 мТ/км. Для $\frac{\partial H_y}{\partial z}$ эти величины равны соответственно 0.32 и 0.11 мТ/км.

Найденные градиенты поперечных составляющих поля значительно больше, чем $\frac{\partial H_z}{\partial z}$. Подобный результат — прямое следствие того, что для согласования наблюдаемого поля с уравнениями (2) приходится принимать слишком большие значения α . Пользуясь формулами (2), несложно оценить, что в области больших значений α и малых H_z

$$\frac{\Delta H_{x,y}}{\Delta z} : \frac{\Delta H_z}{\Delta z} \sim \alpha \cdot \Delta L, \quad (4)$$

где ΔL — расстояние между точками измерения поля ($2.9 \cdot 10^6$ м).

Анализируя карту (рисунок, в), легко убедиться, что для довольно обширной области пятна правая часть соотношения (4) явно больше единицы. Следовательно, можно ожидать значительно большие изменения с высотой по сравнению с изменением H_z .

Методом Рунге — Кутты мы рассчитали карту вектора поля на уровне $z=290$ км (0.1 величины разрешения по поверхности). В отдельных областях пятна расчет дал поля до 500 мТ, что явно противоречит наблюдениям. Таким образом, в изучаемой группе пятен для данного момента времени экстраполяция поля бессиловой моделью с $\alpha \neq \text{const}$ не привела к удовлетворительным результатам. Поэтому мы попытались оценить роль электромагнитных сил в данном пятне.

Запишем уравнение магнитогидростатического равновесия в развернутом виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) H_z - \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) H_y \right] = F_x, \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) H_x - \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) H_z \right] = F_y, \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) H_y - \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) H_x \right] = F_z. \end{aligned} \quad (5)$$

Видно, что для определения составляющих сил необходимы карты вектора поля как минимум на двух уровнях. Однако в районах пятна, где H_z значительно меньше, чем H_x и H_y , такое определение возможно.

Формулы для расчета составляющих силы в горизонтальной плоскости получаем, полагая в (5) $H_z=0$. Отметим, что в силу приближенного характера полученных формул и по причинам, изложенным при обсуждении точности определения α , можно говорить лишь о количественной оценке сил.

В области, ограниченной снаружи изолинией относительной интенсивности 0.9, и внутри — изолинией углов наклона силовых линий к поверхности $\gamma=30^\circ$ (штриховые жирные линии на карте *ж*), были рассчитаны горизонтальные составляющие векторов сил F_T в 64 точках пятна. Результаты расчетов приведены на этой карте. Наибольшее из приведенных значений F_T равно $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$. В области $\gamma \geq 30^\circ$ значения F_T не указаны, поскольку в этой зоне по данной методике получаются неуверенные результаты.

Анализ карты *ж* позволяет выявить следующие особенности. 1. Полученная картина подтверждает существование горизонтальных напряжений в пятне [1]. 2. Несмотря на кажущуюся хаотичность в расположении, большинство векторов сил имеет составляющие, направленные из пятна. Если за центр пятна принять точку, соответствующую максимуму модуля магнитного поля, то у 51 из 64 векторов есть радиальные составляющие сил F_T , направленные из пятна. По сравнению со всеми другими точками, условно принимаемыми за центр пятна, максимальной для данной точки является сумма F_T по всем 64 случаям.

Средняя (по рассмотренным случаям) горизонтальная составляющая градиента газового давления равна $2.3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$. При радиусе пятна $1.5 \cdot 10^4 \text{ км}$ разность газового давления между центром пятна и его границей составит $3.5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$, т. е. величину, близкую к газовому давлению в фотосфере на уровне измерений. Таким образом, можно считать, что по порядку значений электромагнитная сила в пятне сравнима с градиентом газового давления. Следовательно, для данного пятна роль магнитного поля в балансе давлений весьма существенна.

Интересно сравнить поведение различных параметров в области максимальных электромагнитных сил. На рисунке (з) дана карта лучевых скоростей в пятне. Сплошной жирной линией обозначена изолиния $v_a=0$, сплошной светлой — изолинии положительных $v_a=0.5, 0.8, 1 \text{ км/с}$, штриховой светлой — изолиния отрицательных скоростей $v_a=-0.5 \text{ км/с}$. Сравнивая карты *а* и *з*, видим, что области максимальных \mathbf{H} и максимальных скоростей опускания вещества хорошо согласуются между собой. Выше отмечалось, что сумма радиальных составляющих электромагнитной силы максимальна, если центром пятна принимается точка с наибольшей напряженностью поля. В то же время сравнение с картой относительной интенсивности (рисунок, *а*) показывает, что минимум этой величины смещен по отношению к «магнитному центру» пятна примерно на $5''$, если вести сравнение по экстремальным значениям, и до $10''$ в случае сравнения положений изолинии $|\mathbf{H}|=160 \text{ мТ}$ и изолинии $\phi=0.5$. Причина подобного нарушения связи $|\mathbf{H}|$ и ϕ не ясна.

В заключение отметим основные особенности малого пятна — лидера данной группы. 1. Области положительных и отрицательных α в пятне примерно равны по площади. Характерные значения $|\alpha| \sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ при максимальных положительных $\alpha = 10^{-6}$ и максимальных отрицательных $\alpha = -6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$, что на порядок меньше, чем в главном пятне. 2. Область уменьшения H_z с высотой занимает 70 % площади пятна. Характерные значения $\frac{\partial H_z}{\partial z} \sim 0.01 \text{ мТ/км}$ при максимальных положительных

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.027 \text{ мТ/км (пятно отрицательной полярности) и отрицательных}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = -0.009 \text{ мТ/км.}$$

3. Для 18 точек в области пятна с преимущественно горизонтальным магнитным полем оценены векторы сил. В 15 из 18 случаев векторы имеют радиальную составляющую, направленную из пятна, т. е. картина, наблюдаемая в большом пятне, подтверждается. 4. Среднее (по рассмотренным случаям) значение градиента газового давления равно $4 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$. При радиусе пятна $8 \cdot 10^3 \text{ км}$ имеем $\bar{F}_r R = 3.2 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$, что примерно на два порядка меньше, чем газовое давление в фотосфере. Причина значительно меньших градиентов заключается в том, что в области преимущественно поперечного поля его напряженность примерно в три раза ниже, чем в крупном пятне.

1. Котов В. А. Магнитное поле и электрические токи униполярного солнечного пятна // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1970.—41/42.— С. 67—88.
2. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики.— М.: Атомиздат, 1972.— 400 с.
3. Обридо В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности.— М.: Наука, 1985.—256 с.
4. Nakagawa V., Raadu M. A. On practical representation of magnetic field // Solar Phys.— 1972.—25, N 1.— P. 127—135.
5. Seehafer N. On a reliable representation of a class of forcefree solar magnetic fields // Astron. Nachr.— 1975.—296, N 4.— P. 177—183.
6. Wittmann A. Computation and observation of Zeeman multiplet polarization in Fraunhofer lines. Magnetic field structure of spot Mt. Wilson 18 488 // Solar Phys.— 1974.—36, N 1.— P. 29—44.

Сев.-Вост. комплексный НИИ ДВНЦ АН СССР,
Горнотаежное
Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн.
Сиб. отд-ние АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию 24.02.86,
после доработки 30.05.86

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 523.72

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МГД ВОЛН В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ / Маловичко П. П. (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-86—137Р)

Исследовано распространение МГД волн в солнечном ветре. Найдена зависимость декремента и амплитуды волны от гелиоцентрического расстояния. Показано, что затухание может существенно влиять на показатель спектра волн, формирующегося вблизи Солнца.