

*А.В. Баранов, Н.Н. Баранова, В.М. Григорьев*

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В РАЙОНЕ МАЛЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

В первом столбце даны величины расщепления в условных единицах, при этом величина 0,001 соответствует значению напряженности поля 52 Э. Во второй строке даны наборы логарифмов сил осцилляторов, для которых приведены расчеты положения максимумов  $f$  в миллиангстремах. Реальные значения  $\lg(gf)$  составляют для линии 630,25 нм -1,24, а для линии 630,15 нм  $\lg(gf) = -0,94$ . Остальные данные для различных  $\lg(gf)$  приведены для оценки влияния коэффициента поглощения на положение максимумов  $f$  в реальной атмосфере. Мы видим, что при изменении величины поля в 20 раз – от 52 до 1040 Э – изменение расстояния максимума  $f$  от центра линии не превышает 50 %. Изменение  $gf$  линии 630,15 в 8 раз может приводить к различиям до 30 %. Таким образом, мы видим, что для реальной атмосферы положение максимумов величин  $f$  и  $s$  все-таки зависит от  $H$  и  $\eta_0$ , однако зависимость эта слаба и формулы (17) и (18) в значительной мере отражают картину и для реальной атмосферы. Несомненно, что расчеты должны проводиться для каждого конкретного случая сравнения величин магнитных полей в разных линиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В. Поведение экстремумов профилей Стокса магнитоактивных линий в спокойной солнечной фотосфере // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 3-14. (Тр.УАФО; т.8, вып. 8).
2. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Государственное издательство физ. – мат. литературы, 1962. 892 с.
3. Мустель Э. Р. Звездные атмосферы. М.: Государственное издательство физ. – мат. литературы, 1960. 444 с.
4. Kneer F. Line Profiles in Sunspots // Astron. and Astrophys. 1972. V.18, N 2. P. 39-47.

Малые солнечные вспышки составляют подавляющее большинство явлений этого класса, т. е. именно они являются типичным процессом энерговыделения в атмосфере Солнца. Соответственно механизм вспышки прежде всего должен объяснить особенности малых и маломощных процессов этого типа.

В работе [2] А.В. Барановым и Н.Н. Барановой был подтвержден известный факт возгорания узлов микровспышек в  $H_\alpha$  вблизи нулевой линии продольного поля. Кроме того, было найдено, что возгорание вспышек происходит там, где близки к нулю градиенты вертикальных составляющих напряженности магнитного поля и электрического тока.

Целью данной работы было изучение особенностей электрических токов  $\mathbf{j}$  и электромагнитных сил  $\mathbf{F}$  в районах, непосредственно прилегающих к местам активной области (АО), где происходили малые солнечные вспышки.

Методика расчета  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$  приведена в работе [3] и вкратце сводится к следующему.

На некотором уровне  $l$  в атмосфере Солнца, где энергия магнитного поля много больше газового давления, можно принять, что магнитное поле близко к потенциальному. Тогда применим следующий метод расчета  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$ .

Из уравнения  $\text{div}\mathbf{H} = 0$  имеем

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = -\frac{\partial H_x}{\partial x} - \frac{\partial H_y}{\partial y}.$$

Следовательно, на высоте  $l$  получаем

$$H_z(l) = H_z(0) + \frac{\partial H_z}{\partial z} l.$$

Зная распределение  $H_z$  на уровне  $l$  и учитывая, что на этом уровне  $rot\mathbf{H}=0$ , можно, используя решение задачи Дирихле, рассчитать структуру  $\mathbf{H}$ .

Имея карту вектора магнитного поля на одном уровне и значения составляющих  $\mathbf{H}$  на верхнем уровне, мы можем определить изменение  $\mathbf{H}$  с высотой и рассчитать структуру электрических токов и электромагнитных сил.

Объектом исследования являлась активная область N 135 СД июня 1984 г., хорошо известная по итогам кооперативных программ наблюдений и отдельным исследованиям.

Материалом для исследования служили карты полного вектора магнитного поля, полученные в ИСЗФ СО РАН 23 июня 1984 г.,  $H_\alpha$ -фильтрограммы и фотогелиограммы Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН, а также материалы, опубликованные в работах [4–6]. Программы расчета разработаны в УАФО ДВО РАН.

Обстоятельства наблюдений (время получения карт магнитного поля, время и положение вспышек в активной области) подробно описаны нами в [1].

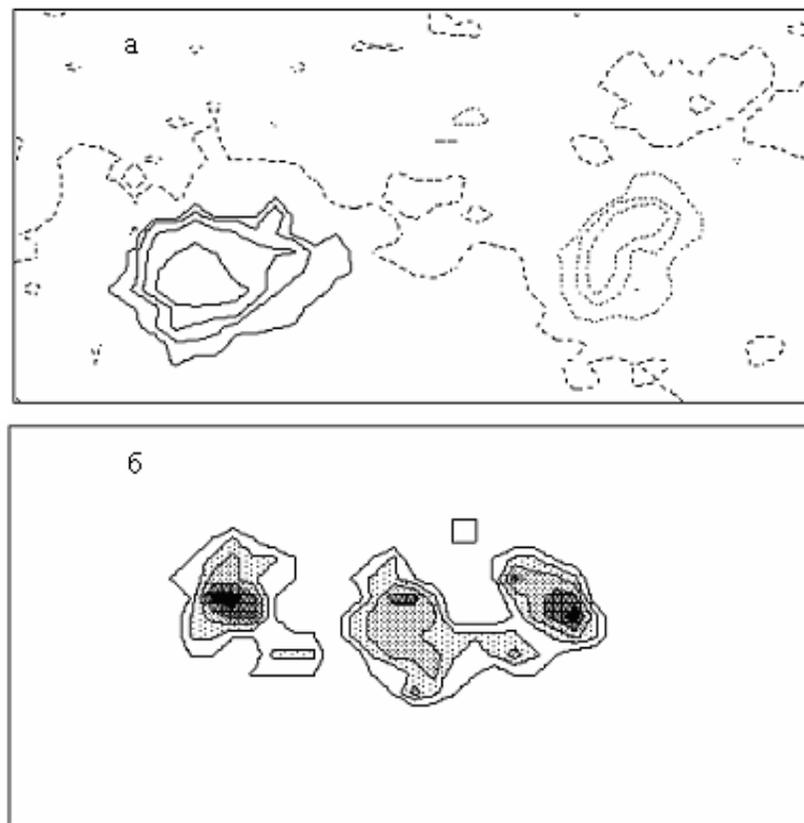
Основные результаты анализа таковы.

В дополнение к сведениям, приведенным в статье [2], следует отметить, что микровспышки, как правило, расположены в областях, где вертикальная компонента магнитного поля  $H_z$  не превышает 400 Э для всей совокупности вспышек и не более 200 Э в местах их наибольшей концентрации (рисунк, б). Напомним, что микровспышки располагаются в областях, прилегающих к нулевой линии  $H_z$ , но не совпадающих с ней. Примерно в половине случаев отмечено совпадение узлов микровспышек с локальными холмами продольной составляющей поля, что отмечалось нами в [3] для узлов крупной вспышки.

Отметим сразу, что приводимые ниже величины  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$  выражены в относительных единицах (о. е.). Для значений электрического тока 1 о. е. =  $10^2$  единиц CGSE; для значений электромагнитной силы 1 о. е. =  $10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>. Большая часть вспышечных узлов на картах расположена в областях  $\mathbf{j}$ , соответствующих значениям 20–80 о. е. при максимальных значениях  $\mathbf{j} = 200\text{--}500$  о. е. Для всех изученных карт магнитного поля найдено, что отношения величин  $j_z/|\mathbf{j}|$  для

областей возгорания микровспышек составляет 0,1–0,3, т. е. вертикальная составляющая тока много меньше горизонтальных.

Максимальные значения  $\mathbf{F}$ , отмеченные на рассмотренных картах, находятся в пределах 500–2200 о. е. а отношения  $F_z/|\mathbf{F}|$ , как правило, составляют 0,3–0,5, т. е. вертикальная составляющая электромагнитной силы явно меньше горизонтальной.



Изолинии продольной составляющей магнитного поля для карты, полученной 23 июня 1984 г в 8:06–8:26 UT(а), соответствующие значениям поля 0, 200, 400, 800 Э, и пространственная плотность распределения микровспышек. Более темная площадка соответствует большей плотности (б). Максимальная плотность соответствует пятикратной повторяемости вспышек в данном месте

Области возгорания микровспышек соответствуют областям, где значения  $|\mathbf{j}|$  и  $|\mathbf{F}|$  избегают максимальных и минимальных значений. Примерно 2/3 случаев показывают, что микровспышки находятся в областях значительных горизонтальных градиентов величин  $|\mathbf{j}|$  и  $|\mathbf{F}|$ .

Помимо выявленной в [2] тенденции расположения вспышек вблизи указанных выше линий достаточно хорошо выявляется близость (не совпадение!) узлов микровспышек к нулевой линии вертикальной составляющей электромагнитной силы

$$F_z=0.$$

Это хорошо заметно при сравнении *рис.1,а*, где пунктиром показаны нулевые линии  $F_z$  на карте для момента времени  $8^{\text{h}}06^{\text{m}}-8^{\text{h}}26^{\text{m}}$  за 23.06.1984 г., и карты (*б*), на которой дана плотность распределения микровспышек по совокупности наблюдательных данных. Описанная картина является типичной для всего промежутка времени наблюдений, за которое было получено пять карт вектора магнитного поля и шесть случаев возгорания узлов микровспышек. Ввиду того что в формулы для определения  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$  входят производные от компонент магнитного поля, эти величины отягощены значительными ошибками. По этой причине не представляется возможным проследить динамику анализируемых величин. Нами рассмотрены и показаны в работе только те особенности, которые присутствуют на всех пяти картах.

Сравнивая результаты данной работы, [2] и [3], можно видеть, что микровспышки и крупная вспышка происходили в областях АО, характеризуемых одним и тем же набором характеристик:

$$H_z=0, dH_z/dz=0, j_z=0, F_z=0. \quad (1)$$

Следовательно, они должны описываться моделями, близкими по своей физической сущности.

И, наконец, нами рассмотрены особенности  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$  в области без вспышек, находящейся внутри кольца, образованного микровспышками. В дополнение к изложенному в [2] необходимо отметить, что в 3 случаях из 5 в области находится колечко, образованное изолинией  $f_z=0$ , а в двух других случаях отрезок изолинии  $f_z=0$  имеет

явно большую протяженность, чем в окружающих область площадок с микровспышками. Численные значения величин  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$  в области без вспышек свидетельствуют о том, что в ней малы значения как  $F_z$ , так и  $|\mathbf{F}|$  и их производных в горизонтальной плоскости.

Представляется интересным выяснить, возможны ли конфигурации поля, для которых указанный набор условий выполняется.

Плотность электрического тока рассчитывается по формуле

$$\mathbf{j} = \text{rot}\mathbf{H} \cdot c/4\pi. \quad (2)$$

Если имеются карты вектора магнитного поля  $\mathbf{H}$  на двух уровнях солнечной атмосферы, то  $\mathbf{j}$  определяется напрямую. Если имеется карта  $\mathbf{H}$  на одном уровне, без дополнительных предположений о структуре  $\mathbf{H}$  рассчитывается только вертикальная составляющая тока  $j_z$ .

Определение плотности электромагнитных сил проводится по формуле

$$\mathbf{F} = \text{rot}\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}/4 \cdot \pi = \mathbf{j} \cdot \mathbf{H}/c, \quad (3)$$

расчет по которой возможен при наличии карт  $\mathbf{H}$  на двух уровнях атмосферы. К этим условиям необходимо добавить уравнение

$$\text{div}\mathbf{H} = 0. \quad (4)$$

Зададим конфигурацию поля в следующем виде:  $\mathbf{H}=[H_x(y), 0, H_z(y)]$ .

Из (4) имеем условие

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0,$$

которому заданная конфигурация удовлетворяет. Для составляющих электрического тока имеем

$$j_x = \frac{c}{4\pi} \frac{\partial H_z}{\partial y},$$

$$j_y = 0,$$

$$j_z = \frac{c}{4\pi} \frac{\partial H_x}{\partial y}.$$

В рассмотренной выше ситуации должно быть  $\frac{\partial H_z}{\partial y} \gg \frac{\partial H_x}{\partial y}$ ,

т. е. неоднородность вертикальной составляющей магнитного поля в горизонтальной плоскости много больше, чем горизонтальной составляющей. Для составляющих электромагнитной силы получаем

$$\begin{aligned} F_x &= 0, \\ F_y &= \frac{1}{4\pi} \left( -\frac{\partial H_z}{\partial y} H_z - \frac{\partial H_x}{\partial y} H_x \right), \\ F_z &= 0. \end{aligned}$$

Ситуация довольно близка к той, которая получена при расчетах  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$ , выполненных выше. Понятно, что можно подобрать и более реалистические конфигурации, описываемые соотношениями (1).

Подводя итоги работы, следует отметить, что полученные здесь результаты позволяют сделать определенные выводы о структуре магнитного поля и механизме вспышки.

Найдены особенности распределения  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{F}$ , подтверждающие гипотезу о том, что в результате микровспышки происходит некоторое изменение формы магнитной петли либо деформация поверхности токового слоя в данной области [7].

Данная работа выполнена частично в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце – Земля”.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В., Григорьев В.М. Связь эволюции группы солнечных пятен и структуры электромагнитных сил // Структура и динамика солнечной короны: Тр. междунар. конф. по физике Солнца. Троицк, 1999. С. 26-31.
2. Баранов А.В., Баранова Н.Н. Особенности структуры магнитного поля в районе малых солнечных вспышек // Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 5-13. (Тр. УАФО; т. 7, вып. 7).

3. Баранов А.В., Корниенко Г.И. Процессы в активной области AR 5395 марта 1989 года и их связь с электрическими токами и электромагнитными силами // Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 17-28. (Труды УАФО; т. 6, вып. 6).

4. Боровик А. В. Малые солнечные вспышки в активной области №135 СД 23 июня 1984 г. // Астрон. циркуляр. 1985. № 1413. С. 2-4.

5. Боровик А. В., Григорьев В. М. и др. Эволюция активной области СД № 135 в июне 1984 г. и ее связь с крупномасштабными магнитными полями на Солнце // Тр. астрон. обсерватории Скалнате Плесо. 1986. Т. 15. С. 211-242.

6. Григорьев В. М., Селиванов В. Л. Структура и динамика конвективных движений в активной области во время ее возникновения и развития // Астрономический циркуляр. 1985. № 1412. С. 1-3.

7. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир. 1985. 592 с.