

*А. В. Баранов, Н.Н. Баранова Н. Н, О.В. Буркина*

## **СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОЩАДИ**

Несколько десятилетий назад зависимость напряженности магнитного поля  $H$  от площади солнечного пятна  $S$  считалась очевидной и достаточно интенсивно изучалась. По данным рутинных наблюдений [4,6] зависимость имеет значительный,  $> 0,8$ , коэффициент корреляции. Сравнение патрульных наблюдений  $H$ , полученных при удовлетворительном и хорошем качестве изображения [4], показывает, что занижение  $H$  в пятнах площадью меньше 10 миллионов долей полусферы (м. д. п.) составляет в первом случае почти 300 Э (обозначения здесь общеприняты). Имеется факт значительного уменьшения наблюдаемой  $H$  в малых пятнах, связанный с искажениями профилей линий паразитным светом. При подобных измерениях представляется важным присутствие наблюдательной селекции – магнитное поле измеряется в тех малых пятнах, где заметно расщепление линии. По этой причине малые пятна с малой напряженностью поля, если они есть, в статистику наблюдений не попадут. Понятно, что при анализе визуальных измерений магнитного поля в любом случае остается неопределенность, связанная с отмеченными эффектами. Важным является то, что имеются образования малого масштаба, в которых есть значительные, около 2000 Э магнитные поля, что получено как из анализа профилей спектральных линий [2,8,9], так и визуальными измерениями [3,4,7,10]. Однако проблема существования малых образований с относительно небольшим магнитным полем, как нам кажется, не решена. Здесь мы сталкиваемся с двумя вопросами: насколько тесна связь  $H$  и  $S$  и есть ли пятна одинаковой площади, имеющие различную максимальную напряженность магнитного поля?

Частью авторов данной работы была сделана попытка изучить зависимость  $H$  и  $S$ , анализируя с помощью теории Унно профили Стокса линии  $Fe\ I\ \lambda\ 6302.5\ \text{\AA}$  [3] и шести линий трех разных эле-

ментов [4]. При расчете профилей интенсивности и круговой поляризации в [3] использовалась температурная модель пятна Кнеера [11]. Доплеровская полуширина линии при этом полагалась постоянной по глубине и равной  $25\ \text{m\AA}$ , а значение постоянной затухания  $a = 0,19$  полагалось равным ее величине на уровне эффективного образования линии, что, несомненно, вносило неточности в определение поля. Тем не менее при анализе  $\gamma_V$ -профилей в значительной степени устранялось влияние рассеянного света. Зависимость  $H$  и  $S$  при этом проявлялась очень четко.

К настоящему времени у нас собран большой наблюдательный материал, современная техника позволяет проводить массовую фотометрическую обработку спектральных линий и подбирать для каждого конкретного профиля наиболее подходящий теоретический профиль, рассчитанный для реальной модели пятна без использования каких-либо упрощающих предположений [3,4]. Поэтому нами была поставлена задача: с учетом возможных ошибок, используя теорию образования спектральных линий в магнитном поле, проанализировать по наблюдаемым профилям линии  $Fe\ I\ \lambda\ 6302.5\ \text{\AA}$  связь величин  $H$  и  $S$  и меру ее неоднозначности.

Спектры были получены на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 в четвертом порядке спектрографа АСП-20 при дисперсии  $2,57\ \text{\AA}/\text{мм}$ . Ширина инструментального профиля  $26\ \text{m\AA}$ . Спектральное окно захватывало диапазон длин волн  $\lambda\lambda\ 6210\text{--}6340\ \text{\AA}$ . Полученный материал в перспективе позволяет изучать напряженность магнитного поля примерно по 30 спектральным линиям разных элементов и ставить соответствующие задачи. Фокусировка была выполнена на длине волны  $\lambda \sim 6270\ \text{\AA}$ . В течение всего августа 1989 г. было очень высокое качество изображения, дрожания на лучших снимках не превышали  $1\text{--}2''$ , практически полностью отсутствовал ореол, поэтому за основу исследования был взят именно этот временной интервал, который дополняли спектрограммы высокого качества, полученные в другое время. Дополнительным критерием отбора была отчетливая видимость в спектре пятна молекулярных линий.

В данной работе проанализированы отдельные аспекты связи напряженности магнитного поля  $H$  и площади  $S$  для 78 солнечных пятен. На примере главных пятен группы N 289 СД от 1.08.1989 г. ( $S = 824$  м. д. п.,  $r/R = 0,57$ , пятно 1) и группы N 301 СД от 9.08.1989 г. ( $S = 121$  м. д. п.  $r/R = 0,46$ , пятно 2) рассмотрим основные особенности величины  $H$  в пятнах различной площади.

При сравнении анализировались профили линии  $Fe\ I\ \lambda\ 6302,5\ \text{\AA}$  в спектрах право- и левокруговой поляризации ( $r_+$  и  $r_-$ ). Характерные примеры этих профилей для двух пятен приведены на рис.1,а и 2,а соответственно. Рассчитаны профили интенсивности  $r_I = r_+ + r_-$  (рис.1,б и 2,б) и круговой поляризации  $r_V = r_+ - r_-$  (рис.1,в и 2,в), по которым определены  $H$ .

В пятне 2  $r_V$ -профиль (рис.2,в) показывает обращение знака у центра линии, что характерно для магнитного поля значительной величины. Для пятна малой площади это отмечено впервые и говорит о том, что величина паразитного света в его спектре мала. Величина  $H_\sigma$ , найденная по положению  $\sigma$ -компонентов  $r_+$ - и  $r_-$ -профилей, составляет 2070 Э. По теории образования линий в магнитном поле  $H_\sigma \leq H$ . Величина  $H_V$ , определенная по положению максимумов  $r_V$ -профилей, составляет 2260 Э и согласно теории  $H_V \geq H$ . Истинное значение  $H_\sigma \leq H \leq H_V$ .

В пятне 1 величина  $H_\sigma = 2750$  Э, величина  $H_V = 2820$  Э и  $H_\sigma \leq H \leq H_V$ . Если принять, что контраст пятна по отношению к фотосфере составляет 0,10–0,15, то поправка при учете действия на профили Стокса линии рассеянного из фотосферы света получается такой величины, что полностью убирает из профиля интенсивности линии  $\pi$ -компонент расщепления (отметим, что для крупных пятен эта ситуация является типичной). В то же время мы видим на профиле круговой поляризации линии инверсию  $r_V$ -профиля, присущую при величине  $H > 2000$  Э углу наклона силовых линий к лучу зрения  $\gamma > 30^\circ$ . При таких  $\gamma$  глубина  $\pi$ -компонента линии на теоретически рассчитанных профилях составляет около 0,5 глубины  $\delta$ -компонента и почти одинакова для любой использованной в расчетах модели пятна. Это в значительной мере ограничивает величину коррекции профиля линии при учете рассеянного света, и указан-

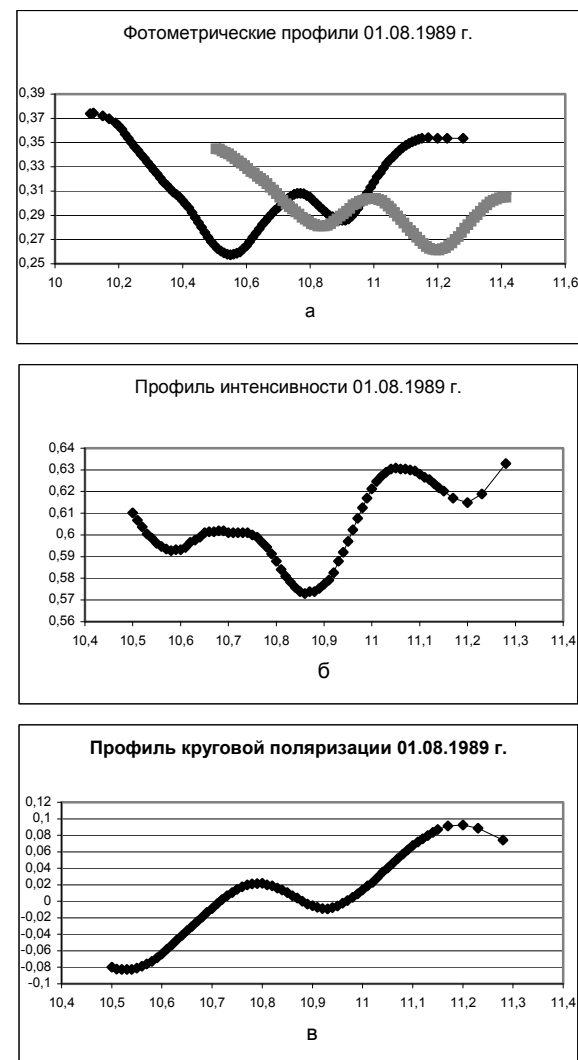


Рис.1. Фотометрические профили и профили интенсивности и круговой поляризации для большого пятна. По горизонтальной оси отсчеты даны в миллиметрах. По вертикальной оси – не калиброванные на интенсивность непрерывного спектра значения величин

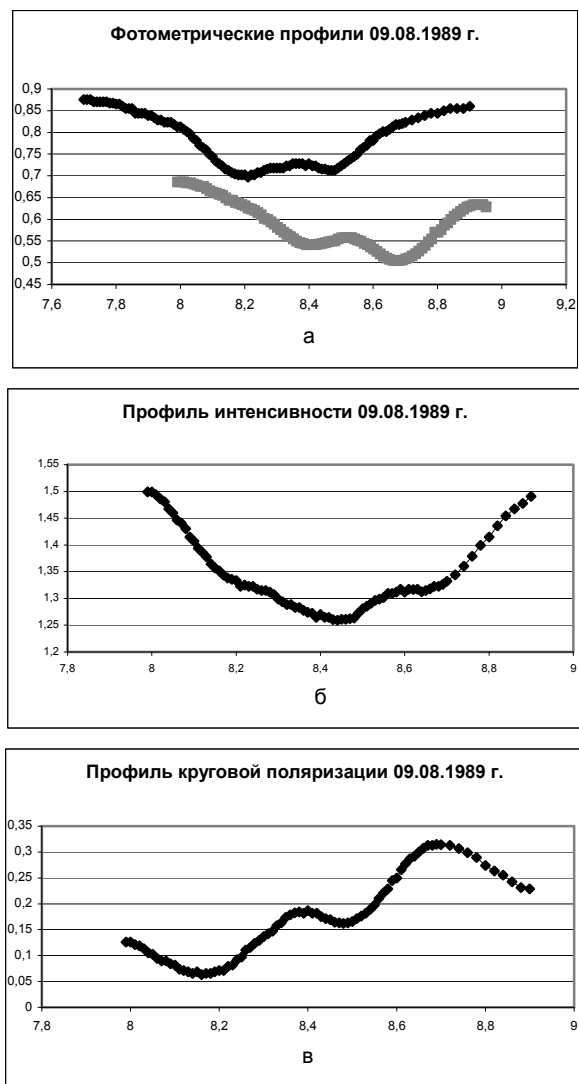


Рис.2. Фотометрические профили, а также профили интенсивности и круговой поляризации для малого пятна. По горизонтальной оси отсчеты даны в миллиметрах. По вертикальной оси – не калиброванные на интенсивность непрерывного спектра значения величин

ные выше величины  $H$  являются истинными верхней и нижней границами возможного значения напряженности поля.

По результатам анализа полученных нами профилей максимально возможное значение  $H$  поля в малом пятне на 490 Э меньше минимально возможного значения  $H$  в большом пятне. Различие подобной величины показано и на приведенном в статье рис.2. Во всех данных случаях напряженность поля в большом пятне больше, причем различия  $H$ , определенные с помощью теории, находятся в пределах от 480 до 650 Э. При этом среднее различие  $H$  составляет 600 Э.

Никакими разумными предположениями о величине замыкания изображения и форме профилей, искажающих  $r_1$ - и  $r_V$ -профили линии, такое различие получить нельзя. Данные не укладываются в общепринятую картину практического отсутствия зависимости  $H$  от  $S$ , поэтому закономерен вопрос об исследовании связи этих величин.

Результаты анализа связи  $H$  и  $S$  по профилям линии в 78 пятнах таковы.

Разность величин  $\delta H = H_V - H_\sigma$  с ростом  $H_V$  уменьшается от значений 300–400 Э при  $H_V < 1800$  Э до значений 20–60 Э при  $H_V \sim 3000$  Э. Подобное изменение может быть как согласно теории, так и в результате искажения профилей линии рассеянным светом. Важным представляется то, что в больших пятнах величины  $H_V$  и  $H_\sigma$  практически совпадают.

Отчетливо проявляется связь величин  $H_\sigma$  и  $S$ . Ни одно из измеренных пятен с  $S < 90$  м. д. п. не имеет значений  $H_\sigma$  больше 2320 Э и меньше 1400 Э. В то же время все пятна с  $S > 90$  м. д. п. имеют напряженность поля в диапазоне  $H_\sigma$  от 2000 до 3240 Э.

Для сравнения все изученные пятна были поделены на группы, соответствующие интервалам, приведенным в головке таблицы. В каждом из интервалов были посчитаны средние значения  $H_\sigma$  и среднеквадратическое отклонение от среднего  $\delta H_\sigma$  (строка 1, значения  $H_\sigma$  приведены в сотнях эрстед). Оно в данном случае характеризует не ошибку измерения, которая значительно меньше (напомним, что

истинное значение поля находится в пределах  $H_{\sigma} \leq H \leq H_V$ ), а разброс значений  $H_{\sigma}$  для пятен данного интервала. Нами также выполнено сопоставление  $H_V$  и  $S$ . Значения  $H_V$  и ее дисперсии  $\delta H_V$  приведены в строке 2 таблицы. Несложно видеть, что разность значений в 1 и 2-й строках таблицы соответствует среднему по интервалу значению  $\delta H = H_V - H_{\sigma}$ , (диапазону, в котором находится истинное значение  $H$ ). Анализ данных позволяет утверждать, что зависимость  $H_V$  от  $S$  выражена несколько более четко чем связь  $H_{\sigma}$  и  $S$ . Это видно и из данных таблицы, для всех интервалов которой отмечается неравенство  $\delta H_V \leq \delta H_{\sigma}$ .

S, м.д.п.	<16	16–40	40–100	100–250	>250
$H_{\sigma} \pm \delta H_{\sigma}(\text{Э})$	16,0±2,5	18,3±1,6	19,1±1,8	24,0±3,1	25,9±3,4
$H_V \pm \delta H_V(\text{Э})$	18,7±2,1	20,3±1,5	21,3±1,6	25,3±2,9	27,1±3,3

Однако как для  $H_{\sigma}$ , так и для  $H_V$  в пятнах с  $S > 16$  м. д. п. отмечена общая особенность – увеличение разброса их значений с ростом величины магнитного поля. Так, для величины  $H_V$  74 из 78 ее значений лежат внутри области, ограниченной на графике линиями  $H_V(\text{Э}) = 1312 + 815 \lg S$  (м. д. п.) сверху и  $H_V(\text{Э}) = 1250 + 410 \lg S$  (м. д. п.) снизу. При этом само уравнение связи величин имеет вид  $H_V(\text{Э}) = 1305 + 533 \lg S$  (м. д. п.). Примечательно, что все три прямые пересекаются практически в одной точке при значениях  $H_V \sim 1200$  Э и  $S \sim 0,4-0,9$  м. д. п. Подобная операция для величины  $H_{\sigma}$  показывает качественно тот же результат, но из-за большего разброса ее значений в области  $S < 100$  м. д. п. “граничные” линии на графике проводятся менее уверенно. Тем не менее 73 из 78 значений  $H_{\sigma}$  лежат внутри области, ограниченной на графике линиями  $H_{\sigma}(\text{Э}) = 1100 + 900 \lg S$  (м. д. п.) сверху и  $H_{\sigma}(\text{Э}) = 1020 + 400 \lg S$  (м. д. п.) снизу. Уравнение связи величин имеет вид  $H_{\sigma}(\text{Э}) = 1000 + 600 \lg S$  (м. д. п.). Пересечение линий происходит при  $H_{\sigma} \sim 800-1000$  Э и  $S \sim 0,5 - 1,2$  м. д. п.

Таким образом, более четко выраженная картина связи наблюдается при сравнении  $H_V$  и  $S$ . Большой разброс значений  $H_{\sigma}$  объясняется тем, что профили линий в пятнах, особенно малых, сильно искажены рассеянным из фотосферы светом. При этом профили фо-

тосферных линий практически не поляризованы и, сильно искажая профили интенсивности  $r_1 = r_+ + r_-$  (см. рис.1,б и 2,б), существенно не изменяют профили круговой поляризации  $r_V = r_+ - r_-$  (см. рис.1, в и 2,в). Соответственно, величина  $r_1 + r_V$ , по которой определяется величина  $H_{\sigma}$ , сильно искажена, причем в разной степени при разных условиях наблюдений. Тем не менее в больших пятнах нами получено практическое равенство величин  $H_{\sigma}$  и  $H_V$  (различие находится в пределах 100 Э). При этом различия величин  $H_{\sigma}$  и  $H_V$  в разных крупных пятнах большой площади достигает 940–1030 Э. Это позволяет считать, что связь  $H$  и  $S$  неоднозначна. Приведенные здесь результаты позволяют предполагать, что существует некоторые пороговые значения напряженности поля, ниже которых у соответствующей площади пятен значений не бывает и указанный “порог” в первом приближении можно описать выражением

$$H_V(\text{Э}) = 1250 + 410 \lg S \text{ (м. д. п.)}$$

Данные таблицы показывают, что разброс напряженности поля с ростом площади пятен возрастает, т. е. напряженность магнитного поля в малых пятнах в абсолютных значениях меньше, чем в больших.

Результаты являются предварительными, но, на наш взгляд, определяют направление и показывают необходимость исследований указанных особенностей связи  $H$  и  $S$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М.: Мир, 1967. 275 с.
2. Баранов А. В. Магнитные поля малых солнечных пятен // Астроном. циркуляр. 1974. № 847. С. 3-5.
3. Баранов А. В. Аппроксимация усредненных характеристик магнитного поля солнечного пятна на основе потенциальной модели // Исследование магнитных полей и активных образований на Солнце. Владивосток, 1984. С. 33-48.
4. Баранов А. В. Баранова Н. Н. Связь напряженности магнитного поля и площади солнечных пятен // Методы и результаты исследования Солнца. Владивосток, 1986. С. 66-75.

5. Баранов А. В. Зависимость магнитного поля солнечного пятна от площади по различным линиям поглощения: Препр. Владивосток, 1987. 14 с.
6. Ихсанов Р. Н. О связи между напряженностью магнитного поля и площадью солнечных пятен // Изв. ГАО. 1966. №180. С.41-50.
7. Стещенко Н. В. Магнитные поля малых солнечных пятен и пор // Изв. КрАО. 1967. № 37. С.21-28.
8. Beckers J. M., Schroter E. N. The Intensity, Velocity and Magnetic Structure of a Sunspot Region. I. Observational technique; Properties of magnetic knots // Solar Phys. 1968. V. 4, № 2. P. 142-164.
9. Brants J. J., Zwaan G. The Structure of Sunspots. IV. Magnetic Field Strengths in Small Sunspots and Pores // Solar Phys. 1982. V. 80, № 2. P. 251-258.
10. Bumba V. Magnetic Fields in Small and Young Sunspots // Solar Phys. 1967. V. 1, № 2. P. 371-376.
11. Kneer F. Line Profiles in Sunspots // Astron. and Astrophys. 1972. V.18, № 2. P. 47-50.

**А.В. Баранов, Г.И. Корниенко**

## **АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ АКТИВНОГО ВОЛОКНА**

Известно, что приближение потенциального магнитного поля удовлетворительно описывает поле активных областей. Однако существует класс структур, где оно не выполняется, что указывает на наличие в солнечной атмосфере электрических токов. К таковым относятся прежде всего суперполутени солнечных пятен, чья тонкая структура показывает спиральную закрученность, и жгутообразные волокна, состоящие из тонких скрученных нитей.

Расчеты, выполненные с использованием карт полного вектора магнитного поля, позволили сделать вывод о существовании в активных областях Солнца как глобальных, так и локальных мелко-масштабных электрических токов с плотностью до  $10^{-4}$  А/м<sup>2</sup> и полным током до  $10^{12}$  А (см., напр., [6]). Подобные токи играют важную роль в энергетике активных областей и протекающих в них нестационарных процессов.

Скрученные жгуты волокон наблюдаются достаточно часто. Их можно видеть на H $\alpha$ -фильтрограммах как в проекции на диск Солнца, так и за лимбом. Появление жгутообразных волокон может быть определенной стадией развития активного волокна. Есть данные о том, что в процессе солнечной вспышки скрученность связанного с ней волокна уменьшается [7,11]. По наблюдениям над солнечным лимбом было обнаружено, что радиусы жгутов достигают  $10^4$  км, а поперечники составляющих их волокон около  $10^3$  км [12]. Скрученное волокно в течение длительного времени может оставаться устойчивым, а потом стать эруптивным, либо вблизи него происходит вспышка.

Скрученность жгутов волокон явно указывает на текущие в них электрические токи. Если магнитное поле жгута разложить на две компоненты ( $B_1$  – поле вдоль оси жгута (аксиальное поле) и  $B_\phi$  –