

УДК 523.985 + 523.37

Магнитные поля в солнечных вспышках: данные спектрально-поляризационных измерений и полуэмпирические модели

*В.Г. Лоцицкий*¹, *Э.А. Барановский*², *О.Б. Осыка*¹

¹ НДЛ “Астрономическая обсерватория” кафедры астрономии и физики космоса Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, 04053, Киев, ул. Обсерваторная, 3

² Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Аннотация. Изучаются солнечные вспышки 25 октября и 5 ноября 2004 г. баллов C7.0/1N и M4.1/1B соответственно. На основании анализа профилей $I \pm V$ десяти линий FeI, FeII, CrII, SrII and TiII найдены свидетельства существенной неоднородности магнитного поля во вспышках как по высоте, так и в горизонтальном направлении. В более слабой вспышке магнитное поле в наиболее ярком узелке было монополярным, тогда как в более мощной вспышке оно, по-видимому, содержало пространственно неразрешимые структуры с сильными полями противоположной полярности.

MAGNETIC FIELDS IN SOLAR FLARES: DATA OF SPECTRAL-POLARIZED MEASUREMENTS AND SEMI-EMPIRICAL MODELS, by *V.G. Lozitsky, E.A. Baranovsky, O.B. Osika*. The solar flares on October 25 and November 5, 2004 of C7.0/1N and M4.1/1B class, respectively, are studied. The observational evidences of the essential vertical and horizontal inhomogeneities were found using the analysis of the Stokes $I \pm V$ profiles of ten lines FeI, FeII, CrII, SrII and TiII. Magnetic field in the most bright flare knots was monopolar in the first more weak flare, whereas in the second one it had likely spatially unresolved magnetic structures of opposite polarity.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, магнитные поля, полуэмпирические модели

1 Введение

Первые наиболее важные результаты по исследованиям магнитных полей в области солнечных вспышек были получены в КрАО под руководством акад. Северного А.Б. в конце 50-х – начале 60-х гг. XX в. (Северный, 1988). Записи магнитного поля на магнитографе, а также визуальные измерения магнитных полей показали, что вспышки возникают преимущественно в активных областях со сложной структурой магнитного поля, в местах с высокими его горизонтальными градиентами. Наиболее яркие узлы вспышек возникают недалеко ($< 10''$) от “нейтральной линии” продольного магнитного поля B_{\parallel} , а также мест резкого поворота вектора поперечного магнитного поля B_{\perp} . После мощной вспышки структура магнитного поля заметно упрощается, горизонтальные градиенты – падают. Напряженности и магнитные потоки перед вспышкой растут, а в ее процессе и после нее – падают.

Из зарубежных исследований наибольший интерес в свое время вызвал результат группы Г. Зирин, касающийся обнаружения магнитных “транзиентов” во вспышках по данным видеоманитографических наблюдений (Зирин и Танака, 1981). Однако в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Тараса Шевченко на основании анализа спектральных данных было показано, что эффект магнитного транзиента имеет,

вероятно, инструментальную природу (Лоцицкая, Лоцицкий, 1982). Эти и другие данные указывали на важность именно спектральных исследований магнитных полей во вспышках.

Спектрально-поляризационные наблюдения выявили, что даже если вспышечный узелок располагается в области магнитного поля одной полярности, в этом месте имеются сильные (в несколько килогаусс) субтелескопические магнитные поля противоположной полярности (Лоцицкий и Лоцицкий, 2005). Весьма неоднородна вспышка и в вертикальном направлении: отмечены узкие (~ 100-150 км) слои в фотосфере, где величина магнитного поля превышает в 2–3 раза то поле, которое существует вне этих слоев (Лоцицкий и др., 2000). Подобные особенности найдены и для распределения температуры. Вместо монотонного падения температуры в толще фотосферы (~500 км), типичного для невозмущенной атмосферы, во вспышках отмечались один или два узких экстремума, где температура повышена на 500–2000 К. Существенные отклонения от невозмущенной атмосферы отмечались и в высотном распределении турбулентных скоростей и концентрации плазмы.

Все указанные выше особенности важно проверить и уточнить по данным для других вспышек, включая и вспышки меньшей мощности. В настоящей работе с этой целью сравниваются физические условия для двух вспышек, имевших рентгеновские баллы С и М.

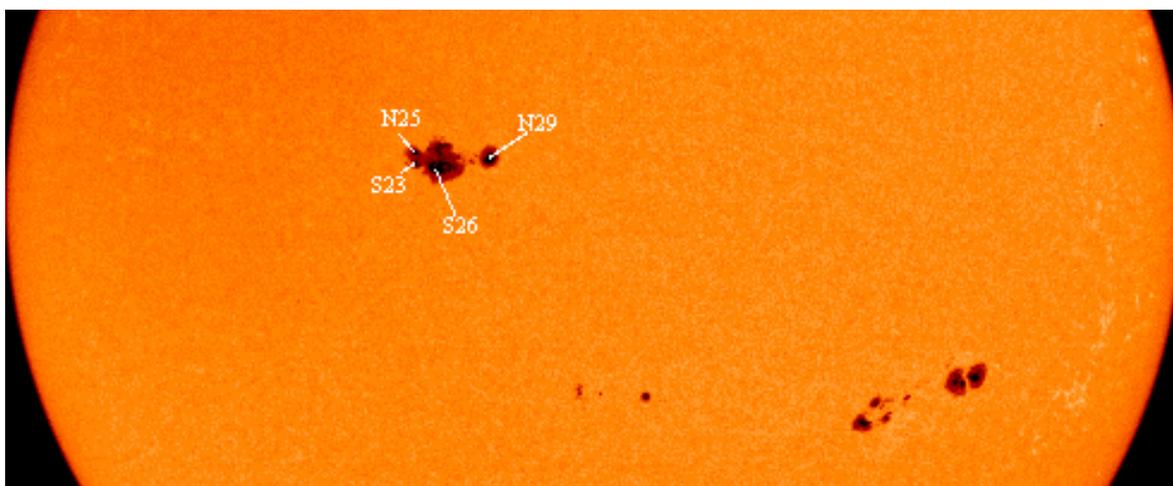


Рис. 1. Активная область NOAA (наиболее крупная на данной гелиограмме), в которой возникла вспышка 5 ноября 2004 г. балла M4.1/1B. Наиболее яркий узелок вспышки располагался в хвостовой части активной области, в области двух пятен противоположной полярности N25 и S23. На приводимой иллюстрации вид Солнца в белом свете – согласно SOHO/MDI, а результаты измерений магнитных полей в пятнах – по данным в линии FeI 5250.2, полученным в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Т. Шевченко

2 Материал наблюдений

Вспышка 5 ноября 2004 г. возникла в области NOAA 10696 (рис. 1) и имела балл M4.1/1B. Она началась в 11^h 30^m UT, достигла максимума в 11^h 33^m и практически закончилась в 12^h 00^m. На эшелюном спектрографе горизонтального солнечного телескопа АО КНУ одним из авторов (Л.В.) получено 5 зееман-спектрограмм вспышки в ортогональных круговых поляризациях, позволяющих анализировать стоксовы профили $I \pm V$. Здесь мы анализируем только спектры, полученные в 11^h 35^m UT. Магнитные поля и другие физические условия во вспышке

находились путем исследования профилей 10 линий: FeII 4923.9, FeII 5018.4, FeII 5234.6, CrII 5237.3, ScII 5239.8, FeI 5250.2, FeI 5250.6, FeII 5264.8, FeI 6301.5 и FeI 6302.5E.

Вспышка 25 октября 2004 г. балла C7.0/1N возникла в активной области AR 10687 и имела координаты 12° N, 15° E. На ГСТ АО КНУ с $10^{\text{h}} 29^{\text{m}}$ по $10^{\text{h}} 41^{\text{m}}$ UT было получено три зееман-спектрограммы в ортогональных круговых поляризациях. Ниже анализируется спектрограмма, наиболее близкая к ее максимуму ($10^{\text{h}} 29^{\text{m}}$).

3 Измерения магнитных полей методом “центров тяжести”

Измерения этим методом являются традиционными и наиболее простыми: измеряется относительный сдвиг вдоль длин волн профиля линии $I+V$ относительно профиля $I-V$ и этот сдвиг, постулируемый как удвоенное зеемановское расщепление $2\Delta\lambda_n$, выражается в величинах индукции магнитного поля B .

Результаты измерений магнитного поля в линиях FeI 6301.5 и FeI 6302.5 представлены на рис. 2 и 3. Типичные ошибки измерений равны 7.5 мТл (75 Гс) по первой линии и 5 мТл – по второй.

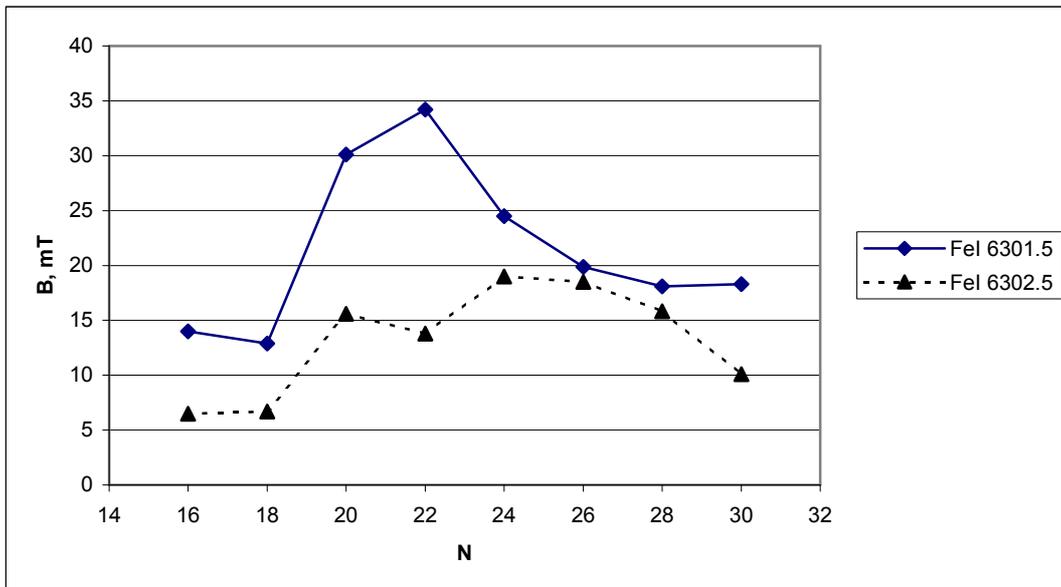


Рис. 2. Сопоставление измерений магнитного поля во вспышке 25 октября 2004 г. по линиям FeI 6301.5 и FeI 6302.5. По оси ординат отложены номера фотометрических разрезов с дискретностью, соответствующей 1000 км на Солнце. Наиболее яркая эмиссия вспышки соответствует $N = 22$

Из сопоставления рис. 2 и 3 видно, что в первой более слабой вспышке магнитное поле по линии FeI 6301.5 заметно выше, чем по линии FeI 6302.5 (т. е. $B(6301.5) / B(6302.5) > 1$), тогда как во второй вспышке имеем обратное соотношение. Именно это обратное соотношение было отмечено ранее для нескольких вспышек средней мощности (Лозицкий и Лозицкий, 2005). Это было интерпретировано тем, что во вспышках имелись сильные (в несколько килогаусс) субтелескопические магнитные поля противоположной полярности, даже если вспышечный узелок располагался в некотором отдалении от линии раздела полярностей продольного магнитного поля. Действительно, поскольку эти линии принадлежат к одному мультиплету железа, имеют близкие высоты формирования в атмосфере Солнца и температурные

чувствительности, но разные факторы Ланде (1.67 и 2.49 соответственно), для них различие измеренных напряженностей может возникнуть лишь в случае “насыщения” (недооценки) спектральных вкладов от тех мелкомасштабных структур, в которых имеется достаточно сильное магнитное поле (Стенфло, 1973). При одинаковой полярности основного и мелкомасштабного поля должно быть $B(6301.5)/B(6302.5) > 1$, а поскольку у нас обратное соотношение, полярность мелкомасштабного поля должна быть противоположной по отношению к “фону”.

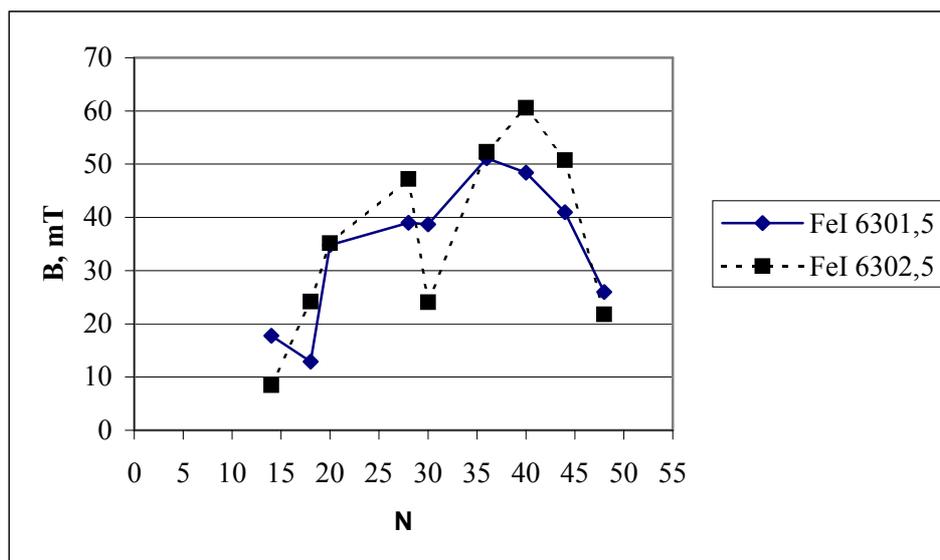


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для более мощной вспышки 5 ноября 2004 г. Центр наиболее яркого узелка вспышки соответствует $N = 40$

В нашем случае (на новом наблюдательном материале) мы видим, что такая структура магнитного поля действительно подтверждается для более мощной вспышки балла М, тогда как для относительно слабой вспышки балла С соотношение полей $B(6301.5)/B(6302.5)$ является обычным для невоспыхечных областей. Это может говорить о том, что наиболее мощные вспыхечные процессы разыгрываются именно там, где из-под фотосферы всплывают мелкомасштабные поля противоположной полярности.

4 Полуэмпирическая модель вспышки

Используя полученные из наблюдений профили линий, с помощью программы Барановского (1993) произведен расчет распределения температуры T , турбулентной скорости V_t и магнитного поля B в зависимости от оптической глубины τ на длине волны 5000Å.

Критерием приемлемости модели считалось как можно лучшее согласование теоретических и полученных из наблюдений профилей следующих линий: FeI 6302.5, 6301.5, 5250.6, 5250.2, FeII 5264.8, 5234.6, 4923.9, ScII 5239.8 и CrII 5237.3 Å. Полученные результаты представлены на рисунках 4-5 (показаны два варианта моделей). Невозмущенная модель фотосферы взята из работы Вернацца и др. (1981).

Из рис. 4 видно, что распределение магнитного поля с глубиной в области вспышки 5 ноября 2004 г. было немонокотным – отмечался максимум поля в нижней ($\lg \tau_5$ около -0.5) и верхней фотосфере. Магнитное поле здесь достигало значений 300 мТл (3000 Гс), хотя, как

видно из рис. 1, по данным визуальных измерений в ближайших пятнах поле было не выше 250 мТл.

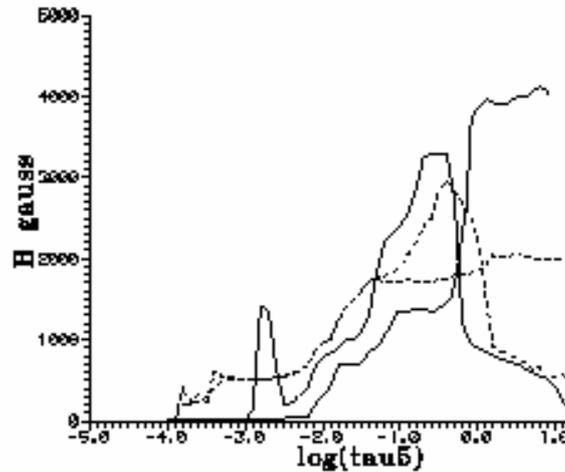


Рис. 4. Распределение магнитного поля в зависимости от $\lg \tau_5$ во вспышке 5 ноября 2004 г. для момента 11^h35^m UT. Сплошная вспышка, пунктир-полутень

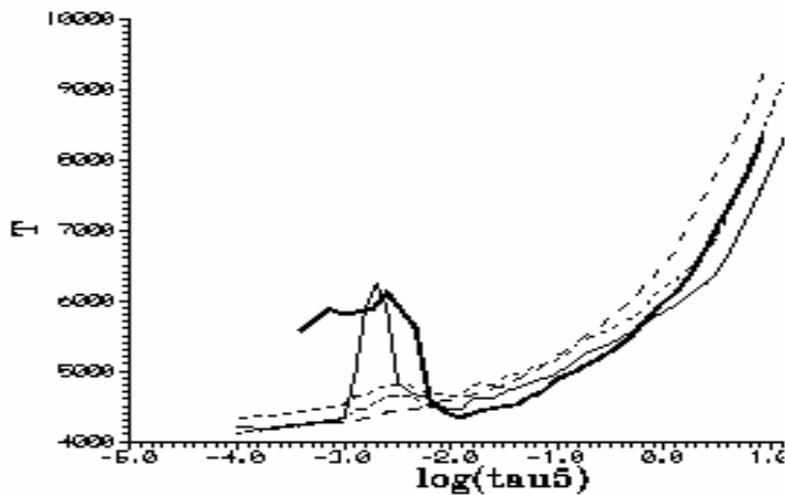


Рис. 5. Распределение температуры в зависимости от $\lg \tau_5$ во вспышке 5 ноября 2004 г. на момент 11^h35^m UT. Сплошная вспышка, пунктир-полутень, длинный пунктир - невозмущенная фотосфера

Ранее немонотонный ход магнитного поля во вспышке отмечен Лозицким и др. (2000). Однако Абраменко и Барановский (2005) нашли иной ход магнитного поля во вспышке: его практически монотонное усиление вглубь фотосферы. Возможно, в разных вспышках реализуются весьма различные варианты высотных изменений магнитного поля.

На распределении температуры с высотой (рис. 5) во вспышке имеется максимум около 6000 K в верхней фотосфере. В модели полутени увеличение температуры здесь не превышает 100-200 K. Ранее в других вспышках находились экстремумы температуры. Очевидно, здесь

необходимы дополнительные исследования для выяснения зависимости термодинамических параметров и движений плазмы от структуры магнитного поля во вспышках.

Литература

- Абраменко и Барановский (Abramenko V.A. & Baranovsky E.A.) // *Solar Phys.* 2005.
- Барановский (Baranovsky E.A.) // *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.* 1993. V. 23. P. 107.
- Вернацца и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R.) // *Astr. J. Suppl. Ser.* 1981. V. 45. P. 635.
- Зирин и Танака (Zirin H. & Tanaka K.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 250. P. 791.
- Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г. // *Письма в Астрон. журн.* 1982. Т. 8. С. 500.
- Лозицкий В.Г., Косовичев А.Г. // *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* 2002. Т. 98. С. 199.
- Лозицкий В.Г., Лозицкий В.В. // *Вісник Київського націон. ун-ту ім. Т. Шевченка. Астрономія.* 2005. Вип. 41-42. С.10.
- Лозицкий и др. (Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M.) // *Solar Phys.* 2000. V. 191. № 1. P. 171.
- Северный А.Б. // “Некоторые проблемы физики Солнца”. М. “Наука”. 1988. С. 224.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // *Solar Phys.* 1973. V. 32. P. 41.