

523.985 + 523.37

Модель фотосферы солнечной вспышки балла 2N/M2 18 июля 2000 года

Е. С. Андриец¹, Н. Н. Кондрашова², Е. В. Курочка¹, В. Г. Лозицкий¹

¹ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Т. Шевченко,
04053, Киев, Украина
andrietselena@gmail.com, lozitsky@observ.univ.kiev.ua

² ГАО НАН Украины, 03680, Киев-127, Украина
kondr@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 11 ноября 2011 г.

Аннотация. Исследованы параметры физического состояния фотосферы в солнечной вспышке 2N/M2 18 июля 2000 г. перед ее максимумом с использованием эшелльных зееман-спектрограмм, полученных на ГСТ АО КНУ (Курочка и др., 1980) в ортогональных круговых поляризациях. Моделирование фотосферы выполнено с помощью программы SIR (Руиз Кобо, дель Торо Иньеста, 1992). Модель фотосферы вспышки имела двухкомпонентную структуру: магнитная силовая трубка и ее немагнитное окружение. В обоих компонентах получены распределения по высоте следующих физических параметров: температуры, напряженности магнитного поля и лучевой скорости.

Температура в магнитной силовой трубке имела немонотонный ход по высоте с максимальным значением 5100 К в слое 250–400 км. Напряженность магнитного поля резко уменьшалась от нижней фотосферы (2600 Гс) к средней (100 Гс) с градиентом около 12 Гс/км. Параметры модели немагнитного окружения мало отличались от их значений в невозмущенной фотосфере.

PHOTOSPHERE MODEL OF THE SOLAR FLARE 2N/M2 ON 18 JULY 2000, *by O.S. Andriiets, N.N. Kondrashova, E.V. Kurochka, V.G. Lozitsky.* The physical state in the photosphere of the 2N/M2 solar flare on 18 July 2000 before its maximum was studied. We used Echelle Zeeman spectrograms obtained in orthogonal circular polarizations using the solar spectrograph of the Astronomical observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kurochka et al., 1980). Semiempirical models are derived from the inversion with SIR code, described by Ruiz Cobo and del Toro Iniesta (1992). The photosphere model of the flare had a two-component structure: a magnetic flux tube and nonmagnetic surroundings. The height dependences of the temperature, magnetic field, and line-of-sight velocity were obtained for two components.

The temperature enhancement to approximately 5100 K was found in the upper photospheric layer from 250 km to 400 km in the magnetic flux tube. The magnetic field strength decreased from 2600 G ($h = 0$ km) to 100 G ($h = 200$ km) with a gradient of about 12 G/km. The non-magnetic surrounding model differed a little from the model of the undisturbed photosphere.

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

1 Введение

Солнечная вспышка является быстротекущим процессом, происходящим в присутствии сильных магнитных полей, поэтому параметры магнитного поля и термодинамические условия вспышечной атмосферы следует находить в комплексе. Наиболее надежно позволяют это сделать спектрополяриметрические данные (параметры Стокса).

Полученные в предыдущих работах модели фотосферы вспышек преимущественно основывались лишь на I профилях линий и были однокомпонентными. Моделированию различных областей вспышек посвящено много работ. Модели вспышек на фотосферном уровне были представлены, например, Барановским и др. (1991), Лозицким и др. (2000), Аликаевой и Кондрашовой (2006), Черногор и Кондрашовой (2008). Основным результатом этих исследований было существование в моделях одного или нескольких слоев с повышенной или пониженной относительно модели невозмущенной фотосферы температурой. Получены различные высотные распределения температуры в зависимости от балла вспышки и ее фазы.

Согласно результатам Барановского и др. (1991), напряженность магнитного поля во вспышке достигала 1000 Гс. Лозицкий и др. (2000) получили значения напряженности магнитного поля около 4000 Гс в зоне верхней фотосферы – температурного минимума средней атмосферы, которому во вспышке соответствовал пик температуры. В работе Барановского и др. (2000) при расчетах была принята модель магнитной трубки, в которой напряженность магнитного поля изменялась от 1500 Гс в нижней фотосфере до 500 Гс в верхней. Абраменко и Барановский (2004) нашли, что напряженность продольного магнитного поля увеличивалась с глубиной в фотосфере от 0 до 3500 Гс. В работе Курочки и др. (2008) получено, что во вспышке напряженность продольного магнитного поля имела неоднородное распределение с высотой с градиентом 3 Гс/км и достигала максимального значения 2000 Гс в верхней фотосфере. Прямые же измерения напряженности магнитного поля (по расщеплениям линий) для трех слабых вспышек рентгеновского балла C дали ее величину от 200 до 2200 Гс (Андриец, 2011). Следует отметить, что эти результаты были получены преимущественно с использованием лишь I профилей линий, в то время как V-профили не принимались во внимание. В вышеперечисленных работах рассчитывалась, в основном, однокомпонентная модель. Применяв программу SIR (Руиз Кобо, дель Торо Иньеста, 1992), мы можем также учитывать и V-профили, которые позволяют вычислить не только термодинамические параметры, но и характеристики магнитного поля.

2 Наблюдения

Вспышка 18 июля 2000 года балла 2N/M2 возникла в активной области NOAA 9077 в 04^h58^m UT, достигла максимума в $05^h05^m05^s$ UT и закончилась в 06^h38^m UT. Ее координаты N18W57. На эшелюном спектрографе ГСТ АО КНУ В.Г. Лозицким получены зееман-спектрограммы вспышки в ортогональных круговых поляризациях, позволяющие анализировать комбинацию стоковых профилей I и V. В данной работе для моделирования фотосферы вспышки используется одна из спектрограмм для момента 05^{02} UT, полученная за 3 минуты перед максимумом вспышки. При моделировании использованы профили фраунгоферовых линий FeI 5247.1, Cr I 5247.6, FeI 5250.2, FeI 5250.6, FeI 6301.5, FeI 6302.5, FeI 5576. Ошибка центральной глубины наблюдаемых I-профилей составляла 2–3 %, а V-профилей – 8–10 %.

3 Моделирование и результаты

Программа SIR, используемая в данной работе, дает возможность получить двухкомпонентную модель, основанную на I и V наблюдаемых профилях. В этой программе принято условие локального термодинамического равновесия (ЛТР). Наша модель вспышки включает две компоненты: тонкую магнитную трубку и ее немагнитное окружение. В качестве исходной модели в расчетах принята

Гарвардско-Смитсоновская модель фотосферы (Гингерич, 1971). При расчетах проводилось согласование наблюдаемых и вычисленных профилей до их лучшего совпадения. На рис. 1 и 2 приведен пример такого согласования для линии FeI 5247.1 I- и V-профилей соответственно.

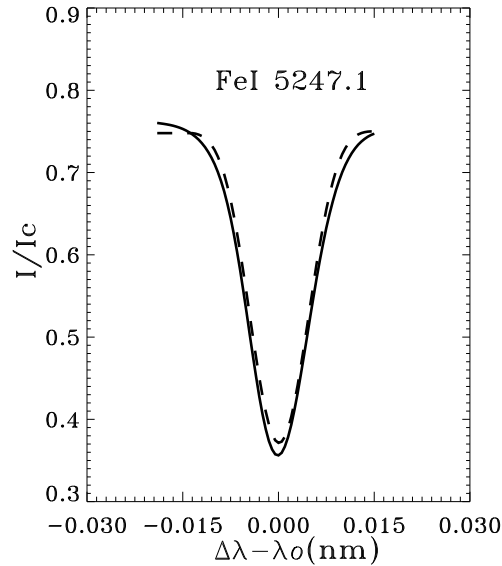


Рис. 1. Наблюдаемые (пунктирная линия) и теоретические (сплошная линия) I-профили линии FeI 5247.1

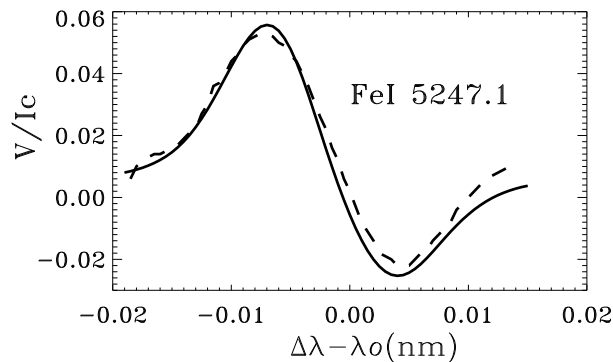


Рис. 2. Наблюдаемые (пунктирная линия) и теоретические (сплошная линия) V-профили линии FeI 5247.1

Макротурбулентные скорости и фактор заполнения предполагались неизменными с глубиной. В результате были получены высотные распределения температуры, напряженности магнитного поля, а также лучевой скорости. Модель фотосферы вспышки была трансформирована в систему локальных гелиоцентрических координат.

На рис. 3 приведены модели магнитной силовой трубки и ее окружения. Для сравнения даны модели спокойной фотосферы (HSRA) и флоккула (Беллот Рубио и др., 2000). Как видно из рис. 3, температура в модели окружающей среды лишь незначительно отличается от ее значений в модели HSRA, тогда как во вспышечной магнитной силовой трубке ход температуры с высотой

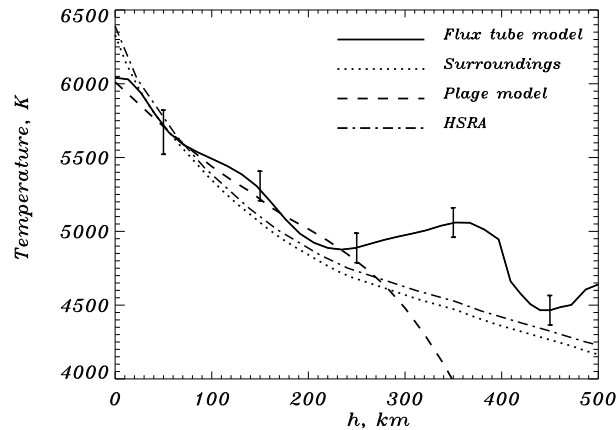


Рис. 3. Высотное распределение температуры в силовой трубке (непрерывная линия) и в окружении (пунктир). Для сравнения приведена модель флоккула из работы Беллота Рубио и др. (2000) (штриховая линия) и HSRA-модель (пунктирно-штриховая линия). Вертикальными линиями указаны суммарные ошибки наблюдений и расчетов

имеет немонотонный характер. При этом имеются три слоя с повышенной температурой. Максимум температуры 5100 К соответствует высоте фотосферы 350 км. Для магнитной трубки фактор заполнения принимался постоянным по высоте и получился равным 75 %, тогда как в модели флоккула он увеличивается с высотой от 50 % (0 км) до 100 % (300 км).

Зависимости напряженности магнитного поля от высоты в моделях магнитной силовой трубки исследуемой нами вспышки и спокойного флоккула (Беллот Рубио и др., 2000) приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, напряженность магнитного поля в трубке резко уменьшается с высотой в

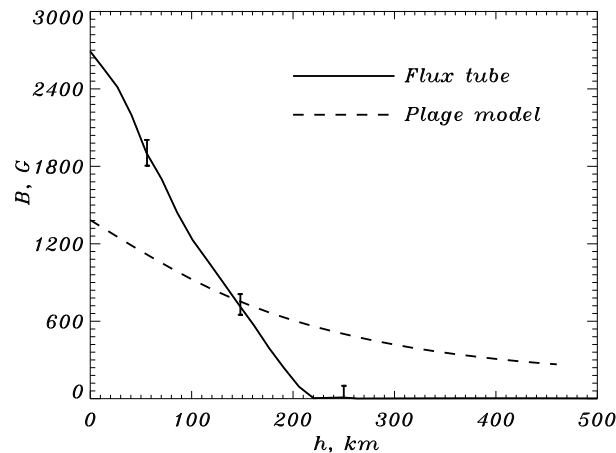


Рис. 4. Изменение напряженности магнитного поля с высотой в полученной модели силовой трубки (сплошная линия). Для сравнения представлено распределение с высотой напряженности магнитного поля во флоккуле (Беллот Рубио и др., 2000) (штриховая линия). Вертикальными линиями отмечены ошибки

фотосфере, ее градиент составляет 12 Гс/км. Резкое падение с высотой напряженности магнитного поля получено также Абраменко и Барановским (2004).

На рис. 5. представлено высотное распределение лучевой скорости для модели силовой магнитной трубки, ее окружения, а также, для сравнения, для модели силовой трубки спокойного флоккула.

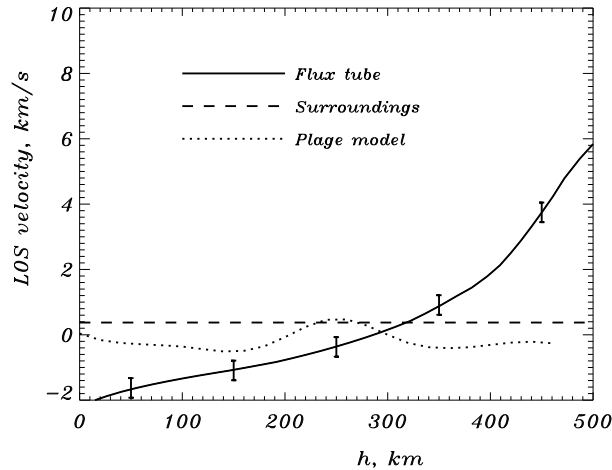


Рис. 5. Распределение лучевой скорости с высотой в полученной модели силовой трубки (сплошная линия) и в окружении (штриховая линия). Для сравнения представлена лучевая скорость в модели флоккула (Белот Рубио и др., 2000) (пунктирная линия). Вертикальными линиями обозначены ошибки

Как следует из расчетов по программе SIR, в окружающей трубку фотосфере лучевая скорость практически постоянна, тогда как в магнитной трубке она довольно резко растет с высотой от 0 до 6 км/с и сильно отличается от скорости в модели спокойного флоккула. В трубке на высотах от 0 до 300 км происходит подъем вещества, а в верхних слоях – его опускание. Согласно Беллот Рубио и др. (2000), в спокойном флоккуле существует подъем вещества по всей толще фотосферы. Получено, что макротурбулентная скорость в силовой трубке составляла 1.55 км/с, а микротурбулентная скорость изменялась в пределах от 0.3 до 1.0 км/с. Во вспышке высоты образования линий отличаются от их величин, рассчитанных по модели невозмущенной фотосферы (HSRA). Их смещение вглубь фотосферы при $\lg \tau = -1$ составляет 44 км, а при $\lg \tau = -2$ – 100 км. По нашей оценке влияние НЛТР-эффектов небольшое, в пределах ошибок наблюдений.

4 Выводы

Изучено физическое состояние фотосферы 2N/M2 вспышки, которая происходила в активной области NOAA 9077 18 июля 2000 года. В результате были получены полуэмпирические модели магнитной силовой трубки и ее окружения в фотосферной части вспышки за 3 минуты перед ее максимумом. Основным результатом исследования является увеличение температуры на 500 К в трубке в верхней фотосфере от 250 до 400 км. Напряженность магнитного поля с высотой уменьшалась от 2600 Гс ($h = 0$ км) до 100 Гс ($h = 200$ км). Градиент магнитного поля составлял 12 Гс/км. Лучевая скорость увеличивалась с высотой и достигала значения 6 км/с, причем в нижних слоях фотосферы происходил подъем вещества, а в верхних – опускание.

Литература

- Абраменко, Барановский (Abramenko V.I., Baranovsky E.A.) // Solar Phys. 2004. V. 220. Issue. 1. P. 81.
- Аликаева К.В., Кондрашова Н.Н. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2006. Т. 22. № 3. С. 163.
- Андриец Е.С. (Андрієць О.С.) // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія. 2011. Вип. 47. С. 14.
- Барановский Э.А., Кондрашова Н.Н., Пасечник М.Н. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2000. Т. 16. № 5. С. 387.
- Барановский Э.А., Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1991. Т. 7. № 3. С. 52.
- Беллот Рубио и др. (Bellot Rubio L.R., Ruiz Cobo B., Collados M.) // Astrophys. J. 2000. V. 535. Issue. 1. P. 489.
- Гингерич и др. (Gingerich O., Noyes R.W., Kalkofen W., Cuny Y.) // Solar Phys. 1971. V. 18. Issue. 3. P. 347.
- Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г. и др. // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. 1980. Вып. 22. С. 48.
- Курочка Е.В., Лозицкий В.Г., Осыка О.Б. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2008. Т. 24. № 4. С. 308.
- Лозицкий и др. (Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M.) // Solar Phys. 2000. V. 191. P. 171.
- Руиз Кобо, дель Торо Иньеста (Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C.) // Astrophys. J. 1992. V. 398. P. 375.
- Чорногор, Кондрашова (Chornogor S.N., Kondrashova N.N.) // Solar Phys. 2008. V. 250. P. 303.