

523.98

Изменения профиля линии Ni I 6768 Å в солнечной вспышке и их влияние на измерения магнитного поля на SOHO/MDI

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 26 января 2007 г.

Аннотация. Представлены наблюдательные данные об изменении профиля линии Ni I 6768 Å в течение импульсной и послеимпульсной фазы белой вспышки 18 июля 2002 г. в узле, давшем излучение в оптическом континууме, и в других вспышечных узлах. Также исследованы профили линии в местах интенсивных фотосферных движений в активных областях. Проведены оценки влияния изменений профиля линии Ni I на измерения магнитных полей на SOHO/MDI. Результаты исследования дают возможность сделать следующие заключения.

1. Наблюдается существенное изменение термодинамической структуры фотосферных слоев во время вспышки, проявляющееся в изменении профиля линии NiI, особенно в месте свечения вспышки в оптическом континууме. В это время значительно уменьшается глубина профиля, однако эмиссионного обращения линии не происходит. Затем наблюдается относительно медленное возвращение к условиям невозмущенной фотосферы.

2. Методика измерений магнитных полей на SOHO/MDI малочувствительна к таким изменениям линии, поэтому обнаруженные изменения во вспышке не привели к заметным ошибкам в измерениях продольного магнитного поля на MDI.

3. Появление в некоторых местах активной области интенсивных движений на уровне фотосферы приводит к тому, что в этих местах профиль линии расширен, смещен в целом и асимметричен. При измерениях с MDI такие изменения профиля приводят к занижению магнитного поля примерно на 10% при лучевой скорости фотосферного выброса около 1.6 км/с.

VARIATION OF THE NiI 6768 Å LINE PROFILE DURING THE SOLAR FLARE AND ITS INFLUENCE ON THE SOHO/MDI MEASUREMENTS OF MAGNETIC FIELDS, *by A.N. Babin and A.N. Koval.* Observations of the NiI 6768 Å line during the impulsive and post impulsive phase of the 2002 July 18 white light flare at site of the WLF emission and in other flare kernels are presented. The line profiles in the regions of intensive photospheric motions have been studied too. By computer simulations of the MDI observables the influence of observed variations of the NiI 6768 Å line profile on the measurements of the magnetic fields on SOHO/MDI are carried out. We found that:

1) the significant changes in the thermodynamical structure of the photospheric layers take place at the time of the flare. As a result, the line profile becomes flatter and the line depth reduces significantly, especially at the time of white emission, but the line does not show any emission reversal.

2) MDI uses a method of measurement of magnetic fields that is insensitive to the line depth, so the substantial variations of the NiI 6767.8 Å line profile during the 2002 July 18 flare did not cause noticeable errors in the MDI measurements.

3) In the places of intensive photospheric motions the NiI 6767.8 Å line profiles become more wide, asymmetrical and shifted as a whole. Such changes of the profile lead to an underestimate of MDI magnetic measurements approximately 10% if the line of sight velocity is about 1.6 km/s.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, магнитные поля, контуры линий

1 Введение

Структура и динамика магнитных полей имеет определяющее значение для многих проявлений солнечной активности, однако характер изменений магнитных полей в активной области, связанный со вспышками, до сих пор остается невыясненным.

Анализ наблюдений как сильных, так и слабых магнитных полей, полученных с высоким временным и пространственным разрешением, показал, что во время импульсной фазы вспышки на ограниченных участках активной области происходят быстрые изменения магнитных полей. Они заключаются в резком изменении магнитного поля в течение 1 – 10 минут и в последующем его восстановлении (Танака, 1978; Зирин и Танака, 1981; Паттерсон и Зирин, 1981; Коваль и Степанян, 1983; Косовичев и Жаркова, 2001; Бабин и Коваль, 2003). Существует проблема с интерпретацией изменений магнитных полей, полученных при наблюдениях с магнитографами, т.к. во время сильных вспышек в некоторых линиях металлов на короткое время появляется эмиссия, и эти изменения профиля линий могут повлиять на данные измерений с магнитографом. Возникает вопрос: достаточны ли эти изменения линий для того, чтобы быть ответственными за появление магнитных транзиентов (Зирин и Танака, 1981; Паттерсон и Зирин, 1981)?

В настоящее время систематические измерения магнитных полей проводятся на спутнике SOHO при помощи инструмента MDI (Шеррер и др., 1995). Используется линия поглощения Ni I 6767.8 Å, которая имеет фактор Ланде 1.426, магнитное расщепление $g\lambda^2 = 65.3 \cdot 10^{-10}$ см², потенциал возбуждения нижнего уровня $p_{low} = 1.83$ эВ, роуландовскую интенсивность в спектре фотосферы $I_{ph} = 5$, эквивалентную ширину 83 мÅ (Мур и др., 1966). Линия имеет слабую температурную чувствительность и образуется в фотосфере на высоте 100 - 200 км (Брулс, 1993; Динг и др., 2002; Солана и др., 2005).

Анализ наблюдений магнитных полей, полученных на MDI с высоким временным и пространственным разрешением во время вспышки 14 июля 2002 г., выявил импульсные изменения, подобные транзиентам (Косовичев и Жаркова, 2001). Они заключались в резком уменьшении магнитного поля на протяжении 1 - 10 минут и последующем его восстановлении, и сопровождалась импульсными изменениями доплеровской скорости и континуума. Самый сильный транзиент коррелировал с основным всплеском жесткого рентгеновского излучения.

Методика определения магнитных полей с SOHO/MDI имеет ряд особенностей (Шеррер и др., 1995), благодаря которым результаты измерений малочувствительны к изменению наклона крыльев и глубины линии, но чувствительны к изменению ширины линии. Модельные расчеты образования линии Ni I 6767.8 Å (Динг и др., 2002) привели авторов к заключению, что наблюдаемые импульсные уменьшения магнитного поля могут быть вызваны появлением эмиссии в ядре линии во время вспышки.

Прямые измерения профиля линии Ni I 6767.8 Å во время сильных вспышек не проводились. В настоящей работе мы приводим наблюдательные данные об изменениях профиля этой линии во время вспышки 18 июля 2002 г. и оцениваем их влияние на измерения магнитных полей по методике, используемой на MDI.

2 Наблюдения

Вспышка оптического балла 1В, рентгеновского класса X1.8 произошла в активной области NOAA 10030; координаты вспышки N18, W34. По наблюдениям GOES вспышка началась в 7:40 UT, достигла максимума в 7:44 UT и закончилась в 8:10 UT.

Микроволновое излучение вспышки на частоте 2.85 ГГц по наблюдениям станции Кацевели (НИИ “КрАО”) приведено на рис. 1. Из него видно, что постепенное увеличение радиоизлучения

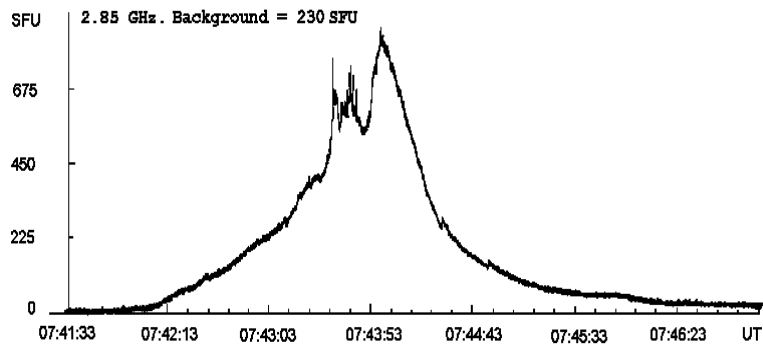


Рис. 1. Микроволновое радиоизлучение вспышки на частоте 2.85 ГГц

началось в 7:42:00 UT и продолжалось до 7:43:25 UT. Затем на постепенный компонент наложились три импульсных всплеска с максимумами в 7:43:33 UT, 7:43:40 UT и самым мощным в 7:43:58 UT. Спектральные фотографические наблюдения вспышки на коронографе КГ-2 КрАО были начаты в 7:43:00 UT. Использовалась система, позволяющая одновременно получать спектрограммы в области 6765 - 6778 Å в третьем порядке дифракционного спектрографа и в области 6555 - 6575 Å во втором порядке. Через H_{α} -фильтр проводился визуальный контроль развития вспышки, наиболее энергичные места устанавливались на щель спектрографа и далее одновременно со спектрами регистрировалось изображение Солнца на щели. Такая методика позволяла оценить мощность вспышки в данном узле по спектральным наблюдениям в H_{α} и отождествить это место в линии Ni I 6767 Å. Изображение вспышки в свете $H_{\alpha} \pm 1 \text{ \AA}$ в 7:43:30 UT и пример исследуемых спектрограмм приведены на рис. 2. Щель спектрографа во время наблюдений пересекала различные вспышечные узлы, но основные наблюдения относятся к узлу вспышки, где в 7:43:30 – 7:43:36 UT было зарегистрировано излучение в оптическом континууме.

3 Результаты измерений

Сравнение моментов получения спектрограмм с ходом радиоизлучения (рис. 1) показывает, что наши наблюдения относятся к импульсной и послепульсной фазам вспышки.

Эмиссионный профиль линии H_{α} в месте свечения вспышки в континууме представлен на рис. 3. Он имеет протяженные крылья, но обращение в центре линии отсутствует. Контраст непрерывной эмиссии в области 6769 Å составляет около 10%. Максимальное значение контраста зарегистрировано на первой спектрограмме этого узла, полученной в 7:43:30 UT. На уровне фотосферы в месте свечения в континууме не наблюдалось заметных движений. Мощное излучение в линии H_{α} и появление излучения в континууме одновременно с всплесками микроволнового радиоизлучения указывает на принадлежность данной вспышки к I типу белых вспышек (Мачадо и др., 1986; Фанг и Динг, 1995).

Наблюденные профили линии Ni I в месте свечения вспышки в континууме в различные моменты времени, а также в активной области вне вспышки представлены на рис. 4. Контуры линии в двух других вспышечных узлах приведены на рис. 5. Профиль линии сильнее всего изменялся в месте излучения вспышки в континууме: значительно уменьшилась глубина линии (почти в три раза!) и крутизна крыльев, причем наибольшие изменения наблюдались в период свечения в континууме. Полуширина контура оставалась практически постоянной. Затем происходило относительно медленное возвращение к условиям невозмущенной фотосферы. Характер изменения профиля линии в данном узле указывает на существенное изменение термодинамической структуры фотосферы. В других вспышечных узлах воздействие вспышки на фотосферу было гораздо слабее

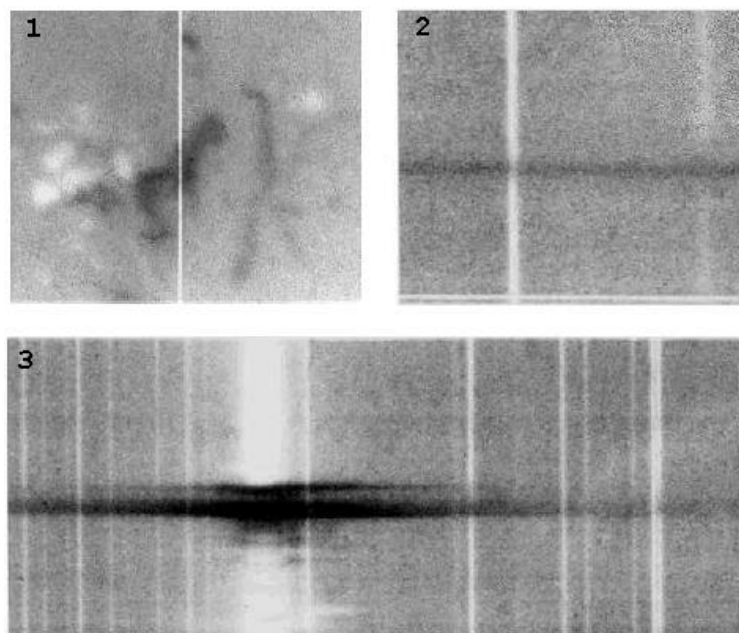


Рис. 2. Вспышка на щели (1) в $H_{\alpha} \pm 1 \text{ \AA}$ (E слева, S сверху) и одновременные спектрограммы в области 6768 \AA (2) и H_{α} (3) в 7:43:30 UT (негативные изображения)

(рис. 5). Отметим, что в изучаемой вспышке профили линии симметричны, не смещены из-за лучевых скоростей и не показывают эмиссионного обращения.

Представляет интерес выяснить, насколько типичны такие изменения профиля Ni I. Исследования показывают, что воздействие вспышки на спектральные линии существенно зависит от интенсивности и потенциала возбуждения линий, а также от того, к каким химическим элементам они принадлежат. В линиях металлов наблюдается разная степень изменения профилей: от значительного эмиссионного обращения до незначительного уменьшения глубины.

Визуальные оценки интенсивности линий металлов во вспышках (Северный и др., 1960; Мачадо и Раст, 1974; Галлегес и др., 1971) и результаты фотометрической обработки (Коваль и Стешенко, 1963; Донати-Фальчи и др., 1984) показывают, что центральная интенсивность даже наиболее сильных линий никеля во вспышках существенно ниже интенсивности непрерывного спектра. В линиях с остаточной интенсивностью $I_0 > 0.47$ изменений профиля при визуальных оценках вообще не отмечалось. Все эти факты указывают на то, что изменения профиля линии Ni I во вспышке не должны быть радикальными, что и подтверждает рис. 5.

4 Влияние изменений профиля линии на измерения магнитных полей

Особенность методики измерений магнитных полей на MDI заключается в том, что при наблюдениях используется практически весь профиль линии. Для получения фильтрограмм в линии Ni I применяется система фильтров, которые выделяют узкую полосу спектра шириной 94 m\AA . Система состоит из входного окна с полосой пропускания 50 \AA , блокирующего фильтра с полосой 8 \AA , фильтра Лио с полосой пропускания 465 m\AA и двух перестраиваемых интерферометров Майкельсона с синусоидальными полосами пропускания с периодами 377 m\AA и 189 m\AA . Фильтрограммы в свете любой части линии Ni I 6768 \AA получаются сдвигом максимумов пропускания только интерферометров (Шеррер и др., 1995).

При стандартных наблюдениях данные о продольных магнитных полях, лучевых скоростях и интенсивности континуума получают из набора фильтрограмм, полученных при пяти положениях

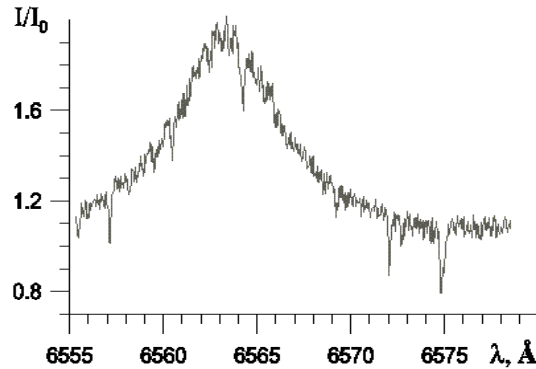


Рис. 3. Фотометрическая запись спектра узла вспышки, излучающего континуум, в области H_α в единицах невозмущенного континуума

полосы пропускания (94 мÅ), расположенной равномерно через промежутки 75 мÅ в синем и красном крыле в пределах линии поглощения: F_1 и F_4 - интенсивности на фильтрограммах, центрированных на крылья линии, F_2 и F_3 на участок вблизи ядра линии, F_0 - вблизи континуума.

Параметр доплеровского смещения α определяется из отношения разности интенсивностей фильтрограмм по формуле:

$$\alpha = \begin{cases} (F_1 + F_2 - F_3 - F_4)/(F_1 - F_3), & \text{если числитель} > 0 \\ (F_1 + F_2 - F_3 - F_4)/(F_4 - F_2), & \text{если числитель} \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Зависимость α от доплеровской скорости V определяют расчетным путем, задавая V различные значения и используя реальный контур полосы пропускания, а также усредненный профиль линии 6768 Å. Результаты представлены на рис. 12 в статье Шеррера и др. (1995) в виде графика зависимости α от V .

Магнитограммы продольного магнитного поля получаются на основании вычислений доплеровского сдвига ($\Delta\lambda_D/\lambda = V/c$, где λ - длина волны, c - скорость света) отдельно на фильтрограммах в лево- и право-поляризованном по кругу свете. Разница сдвигов в двух поляризациях дает величину зеемановского расщепления $\Delta\lambda_H$, которая пропорциональна плотности магнитного потока, или продольному магнитному полю, усредненному по разрешаемому элементу.

Для оценки влияния наблюдаемых изменений профиля линии Ni I 6768 Å во вспышке 18.07.2002 г. на измерения магнитных полей при помощи MDI были приведены следующие вычисления. Для упрощения полагаем профиль полосы пропускания прямоугольным (шириной 94 мÅ) и, рассчитав зависимость α от $\Delta\lambda_D$ для такой полосы и профиля линии Ni I 6768 Å, полученного нами для неспышечной фотосферы, построим график, аналогичный рис. 12 (Шеррер и др., 1995). Далее берем наблюдаемые профили линии Ni I 6768 Å в различные моменты вспышки, задаем им сдвиг ± 30 мÅ (что соответствует напряженности магнитного поля $H = 1000$ Гс) и определяем потоки F_1, F_2, F_3, F_4 , прошедшие через прямоугольную полосу пропускания при смещении ее на -112.5 мÅ, -37.5 мÅ, $+37.5$ мÅ, $+112.5$ мÅ относительно положения центра невозмущенной линии. По формуле (1) вычисляем α для $+30$ мÅ и для -30 мÅ. Затем по нашей зависимости α от $\Delta\lambda_D$ находим $\Delta\lambda_D$ для $+30$ мÅ и для -30 мÅ. Полусумма найденных значений дает $\Delta\lambda_V$ - величину доплеровского сдвига исследуемой линии из-за лучевой скорости, а полуразность дает $\Delta\lambda_H$ - величину зеемановского смещения. Сравнивая вычисленные значения $\Delta\lambda_H$ с заданным (30 мÅ), можно оценить влияние формы профиля на точность определения $\Delta\lambda_H$ и, соответственно, продольного магнитного поля H . Взятая для оценки величина 1000 Гс близка к тем полям, которые обнаруживали быстрые изменения во время вспышки 14 июля 2002 г. (Косовичев и Жаркова, 2001).

Результаты вычислений представлены в табл.1 (последний столбец). Здесь также приведены центральные глубины линии $1 - r_0$, ширины линии на половине интенсивности $\Delta\lambda_{1/2}$, наклон крыла

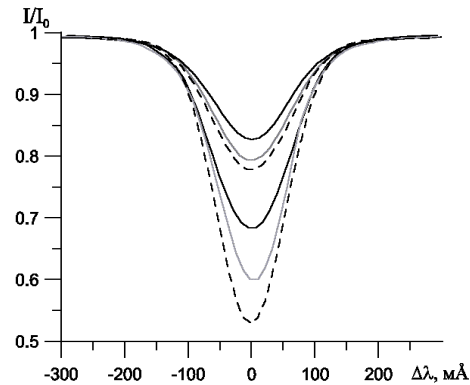


Рис. 4. Профили линии Ni I 6768 Å в месте вспышки в континууме в 7:43:30, 7:43:33, 7:43:36, 7:46:00, 7:48:05 и вне вспышки (сверху вниз)

Таблица 1. Результаты вычислений $\Delta\lambda_H$ для вспышки

Время, UT	Узел вспышки	$1 - r_0$	$\Delta\lambda_{1/2}$, мÅ	$\Delta I/\Delta\lambda$	$\Delta\lambda_H$, мÅ
7:43:30	п.н.э.	0.17	149	1.48	30.07
7:43:33	п.н.э.	0.21	149	1.89	30.04
7:43:36	п.н.э.	0.22	152	1.98	30.09
7:47:00	то же место	0.32	149	2.95	29.98
7:48:05	то же место	0.40	131	3.85	29.94
7:43:30	вне вспышк	0.48	132	5.02	30.00

линии $\Delta I/\Delta\lambda$ на участке 35 - 80 мÅ от центра линии, п.н.э. - полоска непрерывной эмиссии. Из таблицы следует, что наблюдаемые во вспышке 18.07.2002 г. существенные изменения профиля линии Ni I не приводят к заметным ошибкам в измерениях продольного магнитного поля на SOHO/MDI.

5 Изменение профиля линии NiI 6767.78Å в местах сильных фотосферных движений

Поскольку импульсные изменения магнитного поля, обнаруженные Косовичевым и Жарковой (2001), сопровождались импульсными изменениями скорости, представляет интерес рассмотреть изменения профиля линии, вызванные фотосферными движениями вещества, и оценить их влияние на измерения магнитных полей и лучевых скоростей на MDI. Как уже отмечалось, в исследуемой нами вспышке контуры линии NiI 6767.78Å симметричны и не смещены из-за лучевых скоростей. Однако в некоторых местах активных областей, особенно в местах выхода нового магнитного потока и в полутени пятен, на уровне фотосферы наблюдаются движения вещества со скоростями до нескольких километров в секунду. Размер области со значительными скоростями ограничен несколькими угловыми секундами. Особенности таких движений и связанных с ними изменений профилей линий исследованы ранее (Бумба, 1960; Бабин и Коваль, 1992; Бабин и Коваль, 2001). При этом было установлено, что величина смещения линии и характер изменения профилей различны для линий разной роуландовской интенсивности. Для исследования влияния движений на профиль линии 6767.78Å на телескопе КГ-2 были проведены спектральные наблюдения исследуемой

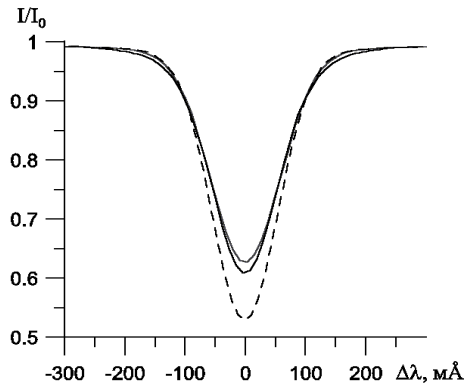


Рис. 5. Профили линии Ni I 6768 Å в двух других узлах вспышки (сверху вниз) в 7:43:06 UT, 7:43:30 UT и вне вспышки

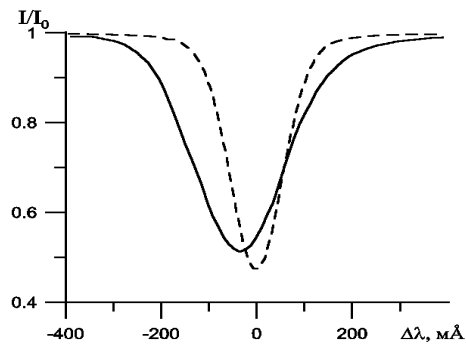


Рис. 6. Профили линии Ni I 6768 Å в фотосферном выбросе (сплошная линия) и в спокойном месте активной области

линии в нескольких активных областях.

В качестве примера на рис. 6 представлены профили линии Ni I в фотосферном выбросе 11 сентября 2001 г. и в спокойном месте активной области. Видно, что профиль в выбросе несколько смещен в целом в синюю область спектра, расширен и асимметричен. Оценим, как скажутся такие изменения профиля на измерения магнитных полей на MDI. Результаты вычислений, аналогичных проведенным для вспышки, приведены в табл. 2. Они показали, что наблюдаемые в выбросе изменения профиля линии Ni I при заданном поле 1000 Гс приведут к измеренному значению около 870 Гс. В исследуемом выбросе лучевая скорость движения вещества составляет около 1.6 км/с. Но в некоторых случаях наблюдаемые скорости фотосферных движений достигали 6 - 8 км/с (Бабин, Коваль, 1992), такие скорости могут привести к более существенным ошибкам при измерении магнитных полей и лучевых скоростей с прибором MDI.

6 Заключение

Проведенные исследования изменений профиля линии Ni I 6767.78 Å во вспышке 18 июля 2002 г. и в местах интенсивных фотосферных движений и оценки влияния этих изменений на измерения продольных магнитных полей на SOHO/MDI позволяют сделать следующие выводы.

1. Происходит существенное изменение термодинамической структуры фотосферы в месте свечения вспышки в оптическом континууме. Глубина линии в момент максимума свечения в

Таблица 2. Результаты вычислений $\Delta\lambda_H$ для выброса

Дата	$1 - r_0$	$\Delta\lambda_{1/2}$, мÅ	$\Delta I/\Delta\lambda$	$\Delta\lambda_H$, мÅ
11.09.2001	0.48	221	2.61	26.05

континууме уменьшилась примерно в три раза по сравнению с невозмущенной фотосферой, но эмиссионного обращения линии не наблюдалось. Анализ спектров нескольких вспышек балла 1 – 3 показал, что только в наиболее сильных линиях никеля наблюдается эмиссия, однако её максимальная интенсивность не достигает и половины интенсивности непрерывного спектра.

2. Методика измерений магнитных полей на SOHO/MDI мало чувствительна к изменению глубины линии. Проведенные вычисления показали, что обнаруженные во вспышке 18 июля 2002 г. существенные изменения профиля линии не приводили к заметным ошибкам в измерениях продольного магнитного поля на MDI.

3. Профиль линии Ni I в местах интенсивных фотосферных движений в активной области расширен, смещен в целом и асимметричен. Такие изменения профиля приводят к занижению продольного магнитного поля при наблюдениях на MDI примерно на 10% при лучевой скорости фотосферного выброса около 1.6 км/с. Динамика таких движений во время вспышек мало изучена.

Авторы благодарны Ю.Ф. Юровскому за предоставление наблюдений микроволнового излучения вспышки.

Литература

- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 86.
 Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1992. Т. 86. С. 152.
 Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 91. С. 43.
 Бумба В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 23. С. 253.
 Брулс (Bruls J.H.M.J.) // Astron. Astrophys. 1993. V. 269. P. 509.
 Галлегес и др. (H. Grossi Galleges, H. Molnar, and J.R. Seibold) // Solar Phys. 1971. V. 16. P. 120.
 Динг, Куи и Ванг (Ding M.D., Qui J., and Wang H.) // Astrophys. J. 2002. V. 576. L. 83.
 Донати-Фальчи и др. (Donati-Falchi A., Falciani R., Sumbuco A.M., and Smaldone L.A.) // Astron. Astrophys. Sup., 1984. V. 55. P. 45.
 Зирин и Танака (Zirin H. And Tanaka K.) // Astrophys. J. 1981. V. 250. P. 791.
 Коваль А.Н., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 68. С. 3.
 Коваль А.Н., Стешенко Н.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 30. С. 200.
 Косовичев, Жаркова (Kosovichev A.G., Zharkova V.V.) // Astrophys. J. 2001. V. 550. L. 105.
 Мачадо и др. (Machado E.M., Avrett E.H., Falciani R. et al) // 1986. Neidig D.F.(ed.) "The lower atmosphere of solar flares", National Solar Observatory, Sunspot N.M. 483.
 Мачадо и Раст (Machado M.E. and Rust D.M.) // Solar Phys. 1974. V. 38. P. 499.
 Паттерсон и Зирин (Patterson A.P. and Zirin H.) // Astrophys. J. 1981. V. 243. L. 99.
 Северный А.Б., Стешенко Н.В., Хохлова В.Л. // А.Ж. 1960. Т. 37. С. 23.
 Солана и др. (D. Cabrera Solana, L.R.Bellot Rubio and del Toro Iniesta J.C.) // Astron. Astrophys. 2005. V. 439. P. 687.
 Танака (Tanaka K.) // Solar Phys. 1978. V. 58. P. 149.
 Фанг и Динг (Fang C. and Ding M.D.) // Astron. Astrophys. Suppl. 1995. V.110. P.99.
 Шеррер и др. (Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.L. et al) // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 129.