

УДК 523.985-337

**В. Г. Лозицкий, В. В. Лозицкий, Ю. А. Чеснок**Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,  
04053 Киев, ул. Обсерваторная 3**Структура и эволюция магнитного поля  
в солнечной вспышке 29 марта 2001 г.**

*Представлены предварительные результаты исследования вспышки 29 марта 2001 г. балла X1.7/1B. Эшельные зееман-спектрограммы вспышки получены на горизонтальном солнечном телескопе Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Измерения продольного магнитного поля  $B_{\parallel}$  методом «центров тяжести» показало, что это поле по линиям Fe I  $\lambda\lambda$  630.25 и 630.15 нм увеличивалось первые восемь минут вспышки (включая и ее максимум), причем систематически  $B_{\parallel}(630.25) > B_{\parallel}(630.15)$ . Исследование Стоксовых профилей I и V линий Fe I  $\lambda\lambda$  617.33 и 602.41 нм обнаружило определенную корреляцию между флюктуациями интенсивности в «красном» и «фиолетовом» крыльях линий и прилегающем спектральном континууме. При этом между такими флюктуациями для Стоксового параметра I наблюдалась умеренная положительная корреляция (до значений  $r = +0.54$ ,  $p < 0.001$ ), тогда как для параметра V — антикорреляция (до величин  $r = -0.49$ ,  $p < 0.001$ ). Учитывая, что названные эффекты наблюдались на довольно больших расстояниях от центров линий (до 64 пм), а также учитывая знак круговой поляризации в этих спектральных участках, можно заключить следующее. Наиболее яркий (в линии  $H_{\alpha}$ ) узелок вспышки проецировался на область с тесным контактом мелкомасштабных магнитных полей противоположного знака и дискретным набором напряженностей, включая значения  $\pm 0.1$ ,  $+0.18$ ,  $-0.55$ ,  $-2.3$  и  $-2.9$  Тл. Горизонтальный градиент магнитного поля составлял здесь порядка 1 мТл/км.*

**СТРУКТУРА ТА ЕВОЛЮЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У СОНЯЧНОМУ СПАЛАХУ 29 БЕРЕЗНЯ 2001 Р., Лозицький В. Г., Лозицький В. В., Чеснок Ю. А.** — Подаються попередні результати дослідження спалаху 29 березня 2001 р. балу X1.7/1B. Ешельні зееман-спектрограми спалаху отримані на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Вимірювання поздовжнього магнітного поля  $B_{\parallel}$  методом «центрів ваги» показало, що це поле за лініями Fe I  $\lambda\lambda$  630.25 і 630.15 нм збільшувалось перші вісім хвилин спалаху (до максимуму включно), причому систематично  $B_{\parallel}(630.25) > B_{\parallel}(630.15)$ . Дослідження Стоксових профілів I та V ліній Fe I  $\lambda\lambda$  617.33 і 602.41 нм виявило певну кореляцію між флюкту-

аціями інтенсивності в «червоному» та «фіолетовому» крилах ліній та сусідньому спектральному континуумі. При цьому між флуктуаціями для Стоксового параметра  $I$  спостерігалась помірна позитивна кореляція (до значень  $r = +0.54$ ,  $p < 0.001$ ), тоді як для параметра  $V$  — антикореляція (до величин  $r = -0.49$ ,  $p < 0.001$ ). Враховуючи, що ці ефекти спостерігались на досить значних відстанях від центрів ліній (до 64 нм), а також враховуючи знак кругової поляризації у цих спектральних ділянках, можна зробити такий висновок. Найяскравіший (у лінії  $H_\alpha$ ) вузлик спалаху проектувався на область з тісним контактом маломасштабних магнітних полів протилежних знаків і дискретним набором напруженостей, включаючи такі значення:  $\pm 0.1$ ,  $+0.18$ ,  $-0.55$ ,  $-2.3$  та  $-2.9$  Тл. Горизонтальний градієнт магнітного поля дорівнював тут приблизно 1 мТл/км.

*STRUCTURE AND EVOLUTION OF THE MAGNETIC FIELD IN THE SOLAR FLARE OF 29 MARCH 2001, by Lozitsky V. G., Lozitsky V. V., Chesnok Yu. A. — Preliminary results on the solar flare of 29 March 2001 of importance X1.7/1B are presented. The echelle Zeeman spectrograms of the flare were obtained on the horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of the Kyiv Shevchenko University. Measurements of the longitudinal magnetic field strength  $B_{\parallel}$  by the «center of gravity» method showed that the field observed in the Fe I 630.25 and Fe I 630.15 lines increased during the first 8 min of the flare, including the flare peak, and systematically  $B_{\parallel}(630.25) > B_{\parallel}(630.15)$ . The Stokes I and V profiles of Fe I  $\lambda\lambda$  617.33 and 602.41 lines display a correlation between the intensity fluctuations in the «red» and «violet» wings of two lines and in the adjacent continuum. There is a moderate positive correlation for Stokes I (to  $r = +0.54$ ,  $p < 0.001$ ), but the correlation is negative for Stokes V (to  $r = -0.49$ ,  $p < 0.001$ ). Taking into account that such effects were observed at large distances from line centers (to 64 pm), and allowing for the sign of circular polarization at these wavelengths, we can conclude the following. The observed bright H-alpha flare knot projected on a peculiar space region with a close contact of small-scale magnetic structures of opposite polarity and discrete values of field strengths, including the following ones:  $\pm 0.1$ ,  $+0.18$ ,  $-0.55$ ,  $-2.3$ , and  $-2.9$  T. The horizontal magnetic field gradient was about 1 mT/km here.*

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки являются исключительно мощными и нестационарными процессами в солнечной атмосфере, охватывающими большой диапазон высот, от фотосферы до короны. В настоящее время не вызывает сомнений, что источником энергии вспышек являются магнитные поля на Солнце. На это указывает тесная связь вспышек с магнитными полями, а также простые энергетические оценки объемной плотности различных видов энергии в солнечной атмосфере, показывающие, что только энергия магнитного поля напряженностью 0.1 Тл может обеспечить наблюдаемую длительность энерговыделения вспышек [1].

Для уточнения физических моделей солнечных вспышек требуются надежные наблюдательные данные о магнитных полях непосредственно в местах возникновения вспышек. В частности, для воссоздания истинной картины физических процессов, происходящих во вспышках, необходимо иметь трехмерные данные о магнитных полях и термодинамических условиях в солнечной атмосфере. Но в настоящее время с помощью солнечного магнитографа получают, как правило, только двумерные карты магнитных полей. Кроме того, солнечный магнитограф, с помощью которого

получается львиная доля информации о солнечных магнитных полях, является не лучшим инструментом для измерений магнитных полей во вспышках. В нем вместо прямого измерения зеемановского расщепления  $\Delta\lambda_n$  измеряется величина круговой  $V$  (иногда также линейной) поляризации в сфере спектральной магниточувствительной линии, зависящая как от магнитных, так и от немагнитных параметров плазмы.

Поэтому для вспышек более адекватными являются методы измерений, основанные на данных о всей форме профиля магниточувствительной линии. Таковыми являются измерения с инструментами типа стоксметра (в частности на основе фурье-спектрометра [22]), а также традиционные спектральные наблюдения с анализаторами поляризации излучения. Преимуществом таких наблюдений (перед магнитографическими) является также то, что они позволяют исследовать неоднородность магнитного поля по глубине, используя спектральные линии с различной глубиной образования. Общим же недостатком и фурье-спектрометра, и спектральных наблюдений является то, что они дают информацию лишь об отдельных площадках на Солнце или же об отдельных сечениях его изображения. Вдобавок фурье-спектрометр, обеспечивая рекордно высокое отношение сигнал/шум (порядка  $10^4$ ), регистрирует достаточно широкие спектральные интервалы крайне медленно — за минуты и даже десятки минут. Такое низкое временное разрешение неприемлемо для изучения столь быстрых процессов, как солнечные вспышки. С другой стороны, вспышки зачастую дают настолько сильные спектральные эффекты (единицы и десятки процентов от уровня спектрального континуума), что столь высокое отношение сигнал/шум может быть и необязательным. В этом отношении спектральные (фотографические) наблюдения, обладая временным разрешением в единицы—десятки секунд и эффективным отношением сигнал/шум около 50—100, являются оптимальными для наблюдения вспышек.

В нашей работе представлены предварительные результаты изучения магнитных полей в солнечной вспышке 29 марта 2001 г. По-видимому, именно с этой вспышкой были связаны значительные возмущения геосферы и околоземного пространства, включая и полярные сияния на умеренных широтах. В ночь с 31 марта на 1 апреля 2001 г. такое сияние наблюдалось под Киевом (Ф. И. Кравцовым), а также в Запорожской области (В. Г. Морылем).

#### МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Материал наблюдений получен на эшелюном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [3]. Инструмент позволяет зафиксировать за одну экспозицию весь спектр Солнца  $\lambda\lambda = 380\text{...}660$  нм. Длительность экспозиции, в зависимости от степени прозрачности атмосферы, высоты Солнца над горизонтом и сорта фотоматериала, составляет от 1 до 15 с.

Вспышка 29 марта 2001 г. возникла в мощном активном комплексе, центр которого имел координаты  $17^\circ$  N,  $9^\circ$  W. В западной части этого комплекса была локальная дельта-конфигурация магнитного поля, и именно в этом месте возник наиболее яркий узелок вспышки. Фотографировались спектры центральной части этого узелка, где магнитное поле имело S-полярность.

По нашим наблюдениям вспышка началась примерно в  $10^{\text{h}}02^{\text{m}}$  UT и имела оптический балл 1В. По данным Internet, помещенным на сайте [http://www.sel.noaa.gov/rt\\_plots/xray\\_5m.html](http://www.sel.noaa.gov/rt_plots/xray_5m.html), балл вспышки в рентгене

## Исследованные магниточувствительные линии Fe I

Номер линии	$\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$W$ , пм	EP, эВ	$g_H/g_B$	$g_{эф}$
1	602.4066	1178	11.7	4.55	1.25/1.26	1.30
2	617.3343	62	5.0	2.22	2.499/0	2.499
3	630.1515	816	12.7	3.65	1.835/1.503	1.669
4	630.2507	816	8.3	3.69	2.487/0	2.487

был X1.7. Нами были получены шесть зееман-спектрограмм вспышки, но только первые четыре из них (соответствующие моментам  $10^h04^m05^s$ ,  $10^h06^m35^s$ ,  $10^h09^m40^s$  и  $10^h12^m35^s$  UT) относятся к одному и тому же месту вспышки. Все эти спектрограммы получены с анализатором круговой поляризации и фиксируют период от начала вспышки до ее максимума. Длинная и узкая (подобная «усам») эмиссия бальмеровских линий в начальной фазе свидетельствовала о том, что вспышка началась непосредственно с взрывной фазы, без предварительного прогрева атмосферы. Конец вспышки в оптике был примерно в  $10^h45^m$  UT. Все спектры этой вспышки были сфотографированы с экспозицией 15 с на фотопластинках WP3 ORWO. Пространственное разрешение прямых наблюдений составляет 3—5", т. е. примерно 2—3 тыс. км.

Исследованные магниточувствительные линии приведены в таблице. Данные об атомных параметрах линий и их эквивалентных ширинах  $W$  заимствованы из работ [19, 20], а об эмпирических факторах Ланде для нижнего и верхнего термов ( $g_H$  и  $g_B$  — из работы [2]). Для линии № 1 эмпирические факторы Ланде  $g$  неизвестны, поэтому для нее были рассчитаны теоретические значения  $g$  в предположении об LS-связи.

Первоначально планировалось ограничить исследование лишь линиями № 3 и 4, которые являются весьма удобными для измерений солнечных магнитных полей, поскольку вблизи них в спектре расположены теллурические линии  $O_2$ , которые можно использовать в качестве реперных. Однако в процессе изучения спектров обнаружилось, что для проверки некоторых спектральных эффектов следует детально исследовать достаточно «чистые» от бленд спектральные участки большой протяженности, порядка  $\pm 50$  пм от ядер спектральных линий. Поэтому были добавлены еще линии № 1 и 2, которые удовлетворяют этому критерию и имеют к тому же триплетное (линия № 2) или квазитриплетное (линия № 1) расщепление.

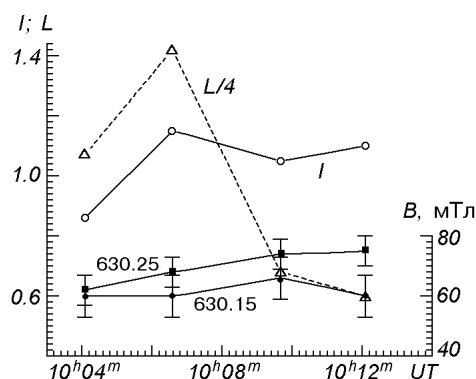
## ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ «ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ»

При использовании анализатора круговой поляризации (в нашем случае — пластинки в четверть волны в сочетании с призмой-расщепителем из исландского шпата) получают два спектра, которые соответствуют одним и тем же местам на Солнце, но ортогональным круговым поляризациям, или величинам  $I + V$  и  $I - V$  в параметрах Стокса. Профотометрировав эти спектры и взаимно «привязав» их по длинам волн  $\lambda$ , можно простым суммированием и вычитанием интенсивностей определить параметры Стокса  $I$  и  $V$  в отдельности. Затем по формуле

$$B_{\parallel} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda V d\lambda / (4.67 \cdot 10^{-8} g \lambda^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I d\lambda), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — в нм,  $B_{\parallel}$  — в Тл, может быть найдена продольная составляющая

Рис. 1. Эволюция в течение первых восьми минут центральной интенсивности  $I$  в линии  $H_{\alpha}$  (по отношению к интенсивности континуума в фотосфере вне вспышки), длины крыльев эмиссии в этой линии  $L$ , а также измеренной напряженности  $B_{\text{obs}} = B_{\parallel}$  в линиях Fe I  $\lambda\lambda$  630.15 и 630.25 нм во вспышке 29 марта 2001 г.



$B_{\parallel}$  вектора поля. Заметим, что это выражение является корректным лишь в случае однородного и не слишком сильного ( $< 0.1$  Тл) магнитного поля. Если эти условия не выполняются, величина  $B_{\parallel}$  будет иметь иной физический смысл. Тем не менее, поскольку обычная калибровка магнитографических наблюдений эквивалентна использованию именно этого выражения, полезно рассчитать его хотя бы потому, чтобы можно было сравнивать данные разных методов измерений.

Спектрофотометрия спектров вспышки 29 марта 2001 г. выполнялась на микрофотометре МФ-4 с шагом фотометрии 0.77 пм. После получения профилей  $I + V$  и  $I - V$  в интенсивностях были найдены параметры Стокса  $I$  и  $V$  и определена величина  $B_{\parallel}$  по линиям Fe I  $\lambda\lambda$  630.15 и 630.25 нм (рис. 1).

Видно, что длина крыльев  $L$  линии  $H_{\alpha}$  была максимальной (около 0.6 нм) примерно в  $10^{\text{h}}06^{\text{m}}$  UT, и именно в это время достигла максимума и интенсивность центральной эмиссии  $I$  в этой линии. В последующие пять минут эта эмиссия почти не изменилась, а длина крыльев сократилась более чем в два раза.

В первые 5–6 мин вспышки наблюдалось постепенное увеличение напряженностей  $B_{\parallel}$  от значений примерно 60 мТл до 70–75 мТл, а затем, по-видимому, наступила фаза их стабилизации или даже уменьшения (по линии Fe I  $\lambda$  630.15 нм). Хотя этот эффект едва превосходит вероятные ошибки измерений, он качественно одинаков по обеим линиям, и это свидетельствует о его реальности.

Заметим, что немонотонное изменение напряженностей  $B_{\parallel}$  (с максимумом их величины в максимуме вспышки) замечено ранее нами [15, 16] во вспышке 16 июня 1989 г. балла 2B, у которой также наблюдалась взрывная фаза, а также во вспышке 26 июня 1981 г. балла 1N [17], у которой взрывной фазы не было. В то же время недавние измерения магнитных полей с помощью MDI/SOHO магнитографа, выполненные в большой вспышке X5.7/3B 14 июля 2000 г. (известной под названием «вспышки дня Бастилии»), дали в этом отношении иные результаты. В работе [14] отмечено два типа изменений: а) непрерывное постепенное уменьшение градиента напряженности магнитного поля с развитием вспышки и б) резкое, в течение нескольких минут, уменьшение напряженности магнитного поля в момент возрастания мощности или в максимуме вспышки. Последний эффект, таким образом, не согласуется с данными фотографических измерений [15–17], согласно которым в максимальной фазе вспышки происходит резкое увеличение напряженностей, притом как продольной составляющей  $B_{\parallel}$ , так и модуля поля  $B$ , определенного в работах [15–17]

по специальной методике. Данные MDI/SOHO магнитографа вызывают у нас некоторые сомнения по следующей причине. Измерения выполнялись в линии Ni I  $\lambda$  676.7778 нм ( $g = 1.5$ ), ядро которой формируется в верхней фотосфере [1]. Подобные линии в наиболее мощных вспышках имеют значительную эмиссию в их ядрах. Как было показано ранее в работе [4], в таких случаях возможны значительные ошибки магнитографических измерений, вплоть до ошибок в знаке магнитного поля.

Еще одной интересной особенностью представленных на рис. 1 результатов является систематическое преобладание магнитного поля по линии Fe I  $\lambda$  630.25 нм над полем по линии Fe I  $\lambda$  630.15 нм. Это является как бы «двойным нарушением» найденных ранее закономерностей. Сначала магнитографическим способом [13] (для неспышечных областей), а затем фотографическим [5, 8] (для вспышек и неспышечных областей) было установлено, что чем ниже магнитная чувствительность линий  $g\lambda^2$ , тем в целом выше измеренные значения  $B_{\parallel}$ . Позже наблюдения с ламбдаметром [21], относящиеся к факелам и активным областям, показали, что величины  $B_{\parallel}$  по разным спектральным линиям в целом увеличиваются при увеличении эквивалентной ширины  $W$ . Оба эти эффекта возможны лишь в случае существенной неоднородности магнитного поля, хотя вероятные параметры этой неоднородности можно ожидать весьма различными в различных образованиях [5, 6, 9, 10].

В случае вспышки 29 марта 2001 г. можно ожидать еще каких-то других особенностей параметров тонкой структуры магнитного поля, но каких именно, можно установить лишь при детальном исследовании Стоксовых профилей  $I$  и  $V$ .

#### ПРОФИЛИ СТОКСА $I$ И $V$

Умеренно сильное магнитное поле ( $B_{\parallel} = 60\text{—}70$  мТл), измеренное во вспышке по линиям Fe I  $\lambda\lambda$  630.25 и 630.15 нм (рис. 1) формально соответствует небольшим зеемановким расщеплениям  $\Delta\lambda_H$ , существенно меньшим спектральной полуширины  $\Delta\lambda_{1/2}$  названных линий. В таком случае, согласно теории образований линий в магнитном поле [23], можно ожидать, что форма параметра Стокса  $V$  будет соответствовать распределению градиента интенсивности  $dI/d\lambda$  в спектре:

$$V(\lambda) \propto \frac{dI(\lambda)}{d\lambda} \Delta\lambda_H. \quad (2)$$

Поэтому простейший диагностический тест на предмет возможной неоднородности магнитного поля состоит в сравнении наблюдаемого вида параметра Стокса  $V$  с распределением градиента  $dI/d\lambda$ . Поскольку линии Fe I  $\lambda\lambda$  630.25 и 630.15 нм блендированы теллурическими линиями, такое сравнение лучше произвести по иным более «чистым» линиям. Линии Fe I  $\lambda\lambda$  602.4066 и 617.3343 нм (таблица) в этом отношении гораздо удобнее, и именно по ним был произведено соответствующее сравнение.

Для того чтобы выявить наиболее существенные закономерности, наблюдаемые профили параметра Стокса  $I$  (интегральной интенсивности) были отфильтрованы скользящим сглаживанием так, чтобы масштаб сглаживания был равен ширине инструментального профиля (4.5 пм в красной области спектра). Лишь после этого находилось распределение параметра  $dI/d\lambda$ , которое сравнивалось с параметром Стокса  $V$ .

Было обнаружено много случаев существенных отличий этих двух параметров, и один из них представлен на рис. 2. Здесь приведен несгла-

женный ход величин  $V/I_c$  (где  $I_c$  — интенсивность в прилегающем к линии континууме), а также сглаженные значения  $dI/d\lambda$ . Мы видим, во-первых, что профили «фиолетового» и «красного» пиков параметра  $V/I_c$  более узкие, чем у градиента  $dI/d\lambda$ . Формально дело обстоит так, будто наблюдаемое распределение параметра  $V/I_c$  соответствует более узкому профилю  $I$ , чем это есть в действительности. Во-вторых, величина расщепления пиков сравниваемых параметров (т. е. расстояние в спектре между экстремальными их значениями слева и справа от ядра линии) также различна: пики градиента  $dI/d\lambda$  расщеплены на большую величину, чем пики  $V/I_c$ . Согласно нашим расчетам, выполненным по методике [16], это возможно в случае наличия разнополярных и пространственно неразрешимых участков с напряженностью около  $\pm 0.1$  Тл, дополнительно расширяющих профиль  $I$ , но не создающих (из-за разной полярности поля) значительного относительного сдвига по длинам волн профилей  $I + V$  и  $I - V$ . Кроме этих участков, должна быть еще другая мелкомасштабная составляющая магнитного поля с напряженностью около 0.18 Тл. В-третьих, благодаря исключительно высокой магнитной чувствительности линии Fe I  $\lambda$  617.33 нм при небольшой ее спектральной ширине, можно заметить прямые свидетельства наличия очень сильных магнитных полей противоположной полярности, а именно на расстояниях  $\Delta\lambda = \pm 25$  пм, практически симметрично относительно центра линии. Здесь наблюдается локальное и очень характерное отличие распределений  $V/I_c$  и  $dI/d\lambda$ , связанное, с одной стороны, с переходом  $V/I_c$  через нуль, а с другой — с локальной задержкой падения градиента  $dI/d\lambda$ , что обуславливает эффект «полочки» или «второго слабого максимума» (рис. 2). В итоге здесь обнаруживается значительное отклонение величины  $V/I_c$  от  $dI/d\lambda$ , что можно трактовать двояко:

а) согласно расчетам, это может быть следствием наличия во вспышке полей противоположной полярности с напряженностью около 0.55 Тл, занимающих очень малую долю площади эффективной апертуры инструмента;

б) подобный спектральный эффект возможен и при полях одинаковой полярности, но тогда, если мелкомасштабные элементы с напряженностью 0.55 Тл давали картину эффекта Зеемана *в эмиссии*.

Окончательный выбор между вариантами а) и б) может быть сделан лишь на основании дополнительных данных, а именно о параметре Стокса  $I$ . Если бы к основной картине эффекта Зеемана добавлялись спектральные вклады каких-то эмиссионных особенностей, в профилях параметра Стокса  $I$  появлялись бы небольшие холмики или слабые «нашлепки». Напротив, если бы это были все-таки поля противоположной полярности, они добавляли бы в этих местах некоторую депрессию (поглощение).

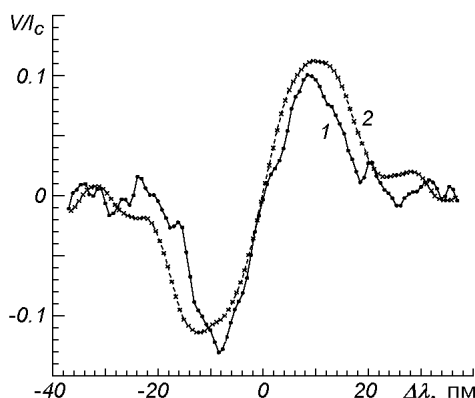


Рис. 2. Наблюдаемые профили параметра Стокса  $V/I_c$  (точки и сплошная линия) и градиента интенсивности  $dI/d\lambda$  (крестики и штриховая линия) для Fe I  $\lambda$  617.33 нм во вспышке 29 марта 2001 г. в момент  $10^{\text{h}}09^{\text{m}}40^{\text{s}}$  UT (см. текст)

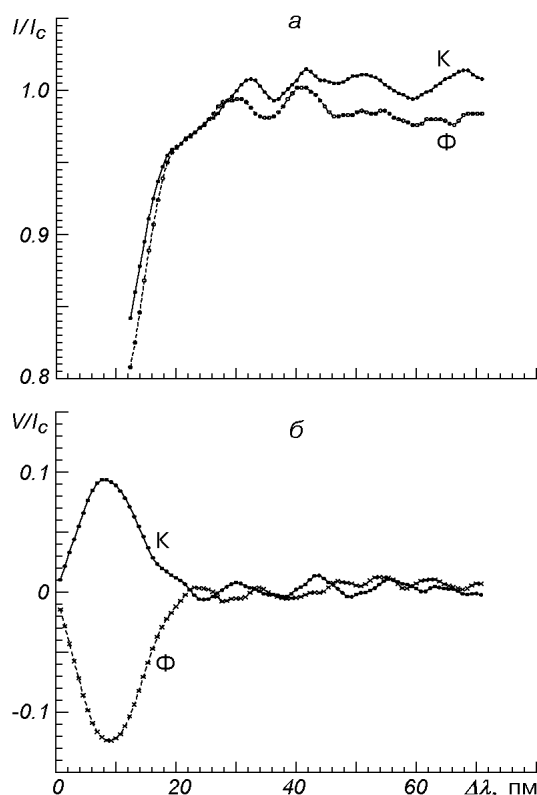


Рис. 3. Наблюдаемые сглаженные профили Стокса  $I$  (а) и  $V$  (б) для «фиолетового» и «красного» крыльев линии Fe I  $\lambda$  617.33 нм. Эти данные относятся к тому же месту вспышки, что и на рис. 2

Рис. 3, а позволяет легко разрешить эту дилемму. Здесь сравниваются профили Стокса  $I$  для «фиолетового» и «красного» крыльев линии Fe I  $\lambda$  617.343 нм и видно, что на расстоянии от центра  $\Delta\lambda = 25 \pm 5$  пм есть следы депрессии в виде почти прямолинейного «среза» в ходе интенсивности в обоих крыльях. Таким образом, мы находим подтверждение предположению а), т. е. во вспышке действительно были существовали очень сильные магнитные поля ( $\approx 0.55$  Тл) противоположной полярности.

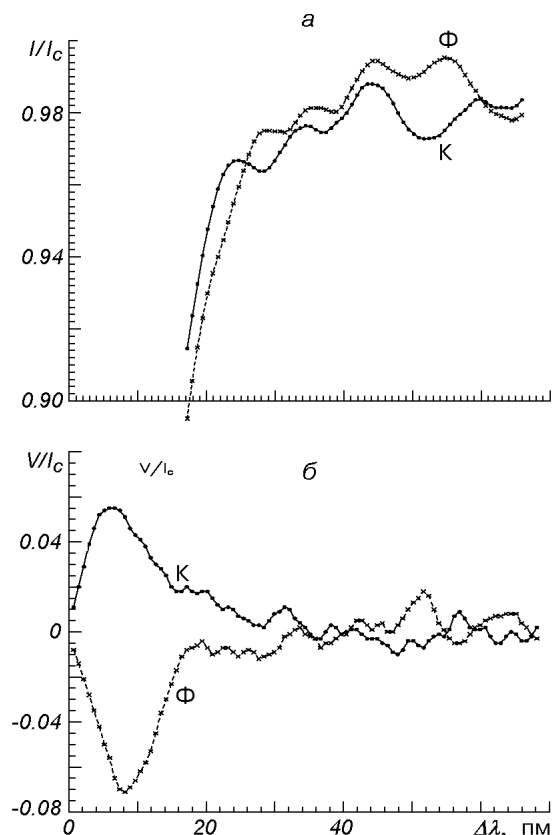
На рис. 3, а виден еще один интересный эффект, а именно заметная корреляция ( $r = +0.54$ ,  $p < 0.001$ ) флюктуаций интенсивности в «красном» и «фиолетовом» крыльях линии Fe I  $\lambda$  617.33 нм, а также в прилегающем спектральном континууме. Этот эффект выявлен благодаря скользящему усреднению интенсивностей с тем же характерным масштабом, что и ширина инструментального профиля (4.5 пм). Поскольку типичные «шумовые» флюктуации интенсивности на исследуемых спектрограммах, обусловленные зернистостью фотоэмульсии, имеют характерный масштаб 1—3 пм и максимальную амплитуду 1.5 %, при указанном сглаживании они усредняются настолько, что их амплитуда не превосходит 0.8 % (это показала сравнительная обработка спектрофотометрических записей в области  $\lambda\lambda$  620.6—620.7 нм, где имеется достаточно чистый и далекий от интенсивных линий спектральный континуум).

Весьма характерно (рис. 3, б), что на расстояниях от центра более 20 пм оба крыла профиля  $V$  показывают в общем противоположный ход, или антикорреляцию. Именно такого поведения  $I$ - и  $V$ -профилей и следует ожидать теоретически при действительно магнитной природе этих спектральных особенностей.

Подобные эффекты были обнаружены и в профилях линии Fe I  $\lambda$  602.4066 нм (рис. 4). В частности, выявлена очевидная антикорреляция



Рис. 4. Сопоставление сглаженных профилей Стокса  $I$  (а) и  $V$  (б) для «фиолетового» и «красного» крыльев линии Fe I  $\lambda$  602.4066 нм для того же места вспышки, что и для линии Fe I  $\lambda$  617.3343 нм



флюктуаций параметра Стокса  $V$ , тогда как для  $I$  параметра наиболее сильные флюктуации в общем коррелируют по обоим крыльям. Для количественной оценки этих эффектов был использован пакет программ STATISTICA. Оказалось, что в рассмотренных случаях коэффициент корреляции доходит до 0.5 (по абсолютной величине), тогда как вероятность  $p$  случайной связи параметров (т. е. нулевой гипотезы) — до значений менее 0.1 %. Эти характеристики статистической связи данных по обоим крыльям линий следует рассматривать не как слабые или умеренные (в буквальном соответствии с не очень высокими коэффициентами корреляции), а наоборот, как весьма сильные указания в пользу магнитной природы этих флюктуаций.

Действительно, из рис. 3—4 видно, что корреляции определенного знака создают в спектре не какие-нибудь единичные (локальные) флюктуации, наблюдаемые на фоне беспорядочной зашумленности большей части рассматриваемых спектральных участков. Напротив, мы наблюдаем определенную широкомасштабную согласованность данных, когда на разных расстояниях от центров линий возникает сразу несколько спектральных участков шириной в несколько пикометров каждый, которые показывают довольно тесную корреляцию определенного знака! Очевидно, такое явление возможно лишь в случае, когда в исследуемом месте на Солнце было несколько типов (мод) мелкомасштабных магнитных полей с различными напряженностями магнитного поля.

Важно подчеркнуть, что и для линии Fe I  $\lambda$  602.4066 нм наиболее сильные флюктуации параметров  $I$  и  $V$  также совпадают по расстоянию  $\Delta\lambda$ , и также соответствуют абсорбции, а не эмиссии. Так, на расстояниях

от центра  $\Delta\lambda = \pm 50$  и  $\pm 64$  пм мы видим слабую депрессию в профиле параметра  $I$ , и именно в этих же местах параметр Стокса  $V$  имеет наиболее сильные антикоррелирующие флюктуации, которые по полярности противоположны основной «волне» параметра Стокса  $V$ , наблюдаемой в интервале расстояний  $\Delta\lambda = 0...35$  пм (рис. 4, б). Это свидетельствует о том, что во вспышке существовали очень сильные мелкомасштабные магнитные поля противоположной полярности по отношению к основному полю, измеряемому по величине  $B_{\parallel}$ . Если считать, что обсуждаемые особенности в спектре соответствуют полностью разделенным зеемановским  $\sigma$ -компонентам, то для  $\Delta\lambda = \pm 50$  пм имеем  $B = 2.3$  Тл, а для  $\Delta\lambda = \pm 64$  пм —  $B = 2.9$  Тл. Заметим, что магнитные поля такого же порядка, но создающие картину эффекта Зеемана в эмиссии, были ранее выявлены во вспышке 16 июня 1989 г. [7, 10]. Однако в этой вспышке, в отличие от вспышки 29 марта 2001 г., полярность магнитного поля была в основном такой же, как и «фоновое» поля.

Таким образом, сопоставление всех перечисленных выше данных позволяет заключить, что в исследуемом узелке вспышки был набор дискретных значений магнитного поля от 0.1 до 2.9 Тл, причем все структуры с наиболее мощными полями были противоположной полярности по отношению к основному (условно — фоновому) полю.

Наличие таких полей противоположной полярности позволяет весьма естественно объяснить, почему было измерено  $B_{\parallel}(630.15) < B_{\parallel}(630.25)$  (рис. 1). Действительно, для линий с наиболее высокой магнитной чувствительностью (типа Fe I  $\lambda\lambda$  617.33 или 630.25 нм) соответствующие спектральные вклады от указанных сверхмощных полей (начиная с 0.55 Тл) должны находиться за пределами тех наиболее крутых участков их профилей, по которым измеряется величина  $B_{\parallel}$  (см. рис. 2). Но при более низкой магнитной чувствительности линии эти спектральные вклады (т. е. соответствующие  $\sigma$ -компоненты в эффекте Зеемана) будут локализованы уже ближе к центру линии и, имея противоположный знак круговой поляризации, будут уменьшать амплитуду основной «волны» параметра Стокса  $V$ , по которому находится величина  $B_{\parallel}$ . В итоге это приведет к тому, что наименьшие значения  $B_{\parallel}$  будут измерены по линиям с наименьшими факторами Ланде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование вспышки 29 марта 2001 г. балла X1.7/1В показало, что:

1) продольные магнитные поля  $B_{\parallel}$ , измеренные методом «центров тяжести» по линиям Fe I  $\lambda\lambda$  630.25 и 630.15 нм, увеличивались первые восемь минут вспышки (включая и ее максимум), причем систематически наблюдалось  $B_{\parallel}(630.25) > B_{\parallel}(630.15)$ .

2) исследование Стоксовых профилей  $I$  и  $V$  линий Fe I  $\lambda\lambda$  617.33 и 602.41 нм обнаружило определенную корреляцию между флюктуациями интенсивности в «красном» и «фиолетовом» крыльях линий и прилегающем спектральном континууме. При этом между такими флюктуациями для Стоксового параметра  $I$  наблюдалась умеренная положительная корреляция (до значений  $r = +0.54$ ,  $p < 0.001$ ), тогда как для параметра  $V$  — антикорреляция (до величин  $r = -0.49$ ,  $p < 0.001$ ). Учитывая, что эти эффекты наблюдались на довольно больших расстояниях от центров линий (до 64 пм), а также учитывая знак круговой поляризации в соответствующих спектральных участках, можно заключить следующее.

По-видимому, исследованный наиболее яркий (в линии  $H_{\alpha}$ ) узелок

вспышки проецировался на область с тесным контактом мелкомасштабных магнитных полей противоположного знака и дискретным набором напряженностей, включая такие значения  $\pm 0.1$ ,  $+0.18$ ,  $-0.55$ ,  $-2.3$  и  $-2.9$  Тл. Горизонтальный градиент магнитного поля составлял здесь порядка 1 мТл/км.

В заключение отметим, что наблюдаемые особенности магнитных полей во вспышке 29 марта 2001 г. (в частности, дискретность напряженностей и их значения, наличие участков противоположной полярности) качественно соответствуют некоторым теоретическим моделям [12, 18].

Авторы благодарны Н. И. Лозицкой за помощь в проведении статистического анализа данных, М. Ю. Гордовскому за составление и отладку некоторых машинных программ для спектрофотометрической обработки и Л. М. Хвиль за предварительный анализ информации из сети Internet, необходимой для уточнения ежедневных программ наблюдения вспышек на ГСТ АО КНУ.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
2. Земанек Е. Н., Стефанов А. П. Расщепление некоторых спектральных линий Fe I в магнитном поле // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.—1976.—Вып. 18.—С. 20—36.
3. Курочка Е. В., Курочка Л. Н., Лозицкий В. Г. и др. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.—1980.—Вып. 22.—С. 48—56.
4. Лозицкая Н. И., Лозицкий В. Г. Существуют ли «магнитные транзиенты» в солнечных вспышках? // Письма в Астрон. журн.—1982.—8, № 8.—С. 500—505.
5. Лозицкий В. Г. О контурах магниточувствительных линий в активных областях Солнца // Астрометрия и астрофизика.—1979.—Вып. 38.—С. 13—28.
6. Лозицкий В. Г. Мелкомасштабная структура солнечных магнитных полей // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 1.—С. 28—35.
7. Лозицкий В. Г. Наблюдения магнитных полей напряженностью в несколько тесла в солнечных вспышках // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 401—414.
8. Лозицкий В. Г., Лозицкая Н. И., Власенко В. И. Сравнение результатов измерений солнечных магнитных полей, полученных разными методами // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.—1985.—Вып. 27.—С. 59—66.
9. Лозицкий В. Г., Цап Т. Т. Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—1989.—5, № 1.—С. 50—58.
10. Лозицкий В. Г. Проблема надпотужних магнітних полів в атмосфері Сонця // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 3.—С. 23—32.
11. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М: Наука, 1988.—224 с.
12. Соловьев А. А., Лозицкий В. Г. Бессиловая модель тонкоструктурного магнитного элемента // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 5.—С. 80—84.
13. Gopasyuk S. I., Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // Solar Phys.—1973.—31, N 2.—P. 307—316.
14. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. Magnetic energy release and transients in solar flare of July 14, 2000 // Astrophys. J. Lett.—2001.—550.—P. 105—113.
15. Lozitska N., Lozitskij V. Small-scale magnetic flux tube diagnostics in a solar flare // Solar Phys.—1994.—151, N 2.—P. 319—331.
16. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Leiko U. M. Observations of magnetic field evolution in a solar flare // Solar Phys.—2000.—191, N 1.—P. 171—183.
17. Lozitsky V. G., Lozitska N. I., Lozitsky V. V., et al. Evolution of the magnetic fields and chromospheric structures in solar flare of 26 June 1981 // Proc. 9th Europ. Meeting on Solar Physics, Florence, Italy, 12—18 Sep. 1999 (ESA Sp-448, Dec 1999). — P. 853—858.
18. Lozitsky V. G., Soloviev A. A. Phenomenon of the superstrong magnetic fields in solar flares: observations and theory // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2000.—N 3.—P. 445—446.
19. Moore C. E. A multiplet table of astrophysical intertest, Revised Edition. Part I. Table of Multiplets. — Princeton, New Jersey: Publ. Observ., 1945.—96 p.

20. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, Government Printing Office, 1966.—349 p.
21. *Semel M.* Magnetic fields observed in a sunspot and faculae using 12 lines simultaneously // *Astron. and Astrophys.*—1981.—97, N 1.—P. 75—78.
22. *Stenflo J. O., Harvey J. W., Brault J. W., Solanki S.* Diagnostics of solar magnetic fluxtubes using a Fourier transform spectrometer // *Astron. and Astrophys.*—1984.—131, N 2.—P. 333—346.
23. *Unno W.* Line formation of a normal Zeeman triplet // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1956.—8, N 3/4.—P. 108—125.

Поступила в редакцию 27.12.01