

УДК 523.985.3

**Н. Н. Кондрашова**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
kondr@mao.kiev.ua

### **Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллермана. I. Наблюдения**

*Спектры бомбы Эллермана в активной области NOAA 11024 получены при спектрополяриметрических наблюдениях на франко-итальянском телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания). Рассмотрены изменения профилей параметров Стокса I, Q, U, V фотосферных линий. Выбранные линии имеют разную интенсивность и разную чувствительность к магнитному полю. Выявлено, что профили фотосферных линий в спектрах бомбы Эллермана сильно отличаются от профилей для невозмущенной области фотосферы вне активной области. Профили Стокса I фотосферных линий в спектрах бомбы Эллермана значительно слабее. Наибольшие значения параметров Стокса Q, U, V найдены для магниточувствительной линии Fe I 630.25 нм. Профили Стокса V максимальны в центральной области бомбы Эллермана. Параметры Q и U наибольшие значения имеют на одной из сторон бомбы Эллермана. Из сравнения параметров Стокса для бомбы Эллермана и микровспышек следует, что параметры Q, U, V, полученные из наблюдений бомбы Эллермана, значительно превышают эти параметры для вспышек.*

*СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БОМБИ ЕЛЛЕРМАНА. I. СПОСТЕРЕЖЕННЯ, Кондрашова Н. М. — Спектри бомби Еллермана в активній області NOAA 11024 отримано зі спектрополяриметричних спостережень на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія). Розглянуто зміни профілів параметрів Стокса I, Q, U, V фотосферних ліній. Вибрані лінії мають різну інтенсивність та різну чутливість до магнітного поля. Виявлено, що профілі фотосферних ліній у спектрах бомби Еллермана значно відрізняються від профілів для незбуреної області фотосфери поза активною областю. Профілі Стокса I фотосферних ліній у спектрах*

бомби Еллермана слабші. Найбільші значення параметрів Стокса  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  знайдено для магніточутливої лінії  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$ . Профілі Стокса  $V$  максимальні в центральній області бомби Еллермана. Параметри  $Q$  та  $U$  найбільші значення мають на одному з боків бомби Еллермана. Порівняння параметрів  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  для бомби Еллермана та мікроспалахів свідчить, що вони значно більші для бомби Еллермана.

*SPECTROPOLARIMETRIC INVESTIGATION OF ELLERMAN BOMB I. OBSERVATIONS, by Kondrashova N. N. — The data of the spectropolarimetric observations of the Ellerman bomb in the active region NOAA 11024 with the French-Italian solar telescope THEMIS (Tenerife, Spain) are used for the analysis of the variations of the Stokes profiles  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  of the photospheric lines. The photospheric lines under consideration have different intensities and Lande factors. The photospheric line profiles in the Ellerman bomb spectra differ from the profiles for the quiet photosphere. Stokes profiles  $I$  of the photospheric lines in the Ellerman bomb spectra are weaker strongly. Largest values of the Stokes parameters  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  are found for the magnetic sensitive line  $Fe\ I\ 630.25\ \text{nm}$ . Stokes parameter  $V$  is highest in the central region of the Ellerman bomb. Largest values of the parameters  $Q$  and  $U$  are at one of the edges of the Ellerman bomb. Comparison of the Stokes  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  parameters for the Ellerman bomb and microflares shows that the parameters for the Ellerman bomb are much greater.*

## ВВЕДЕНИЕ

Эллерман в 1917 г. обнаружил в солнечных спектрах кратковременные интенсивные поярчения в крыльях линий водорода и назвал их солнечными водородными бомбами [7]. Ядра линий при этом остаются без изменений. Впоследствии А. Б. Северный назвал это явление усами [24]. Бомбы Эллермана (БЭ) возникают обычно вблизи пятен в области выхода нового магнитного потока. Их изучению посвящено большое количество работ, например [1, 3, 9, 12, 18, 19, 22, 26—28]. В большинстве работ рассматриваются хромосферные линии  $H\ \alpha$  и  $Ca\ II\ 854.2\ \text{нм}$ .

Морфологические свойства БЭ описаны в работах [13, 15, 17, 28]. Они имеют вытянутую форму, малый размер (1-2  $\text{Mm}$ ), продолжительность от нескольких минут и более. Бомбы Эллермана наблюдаются не только в линиях водорода, но и в линиях  $Ca\ II\ 854.2\ \text{нм}$ ,  $Ca\ II\ IR$ ,  $Ca\ II\ H$  и  $K$ , в континууме в длинах волн  $\lambda = 160$  и  $170\ \text{нм}$ . Анализ изображений БЭ показал, что они имеют разные морфологические свойства в разных длинах волн. На изображениях в линиях  $Fe\ II\ 30.4$ ,  $Fe\ IX\ 17.1$ ,  $Fe\ XIV\ 21.1\ \text{нм}$  они не видны, что предполагает их отсутствие в короне и переходной области [26]. Авторы работы [22] проанализировали и сравнили трехчасовые фильмы с изображениями

БЭ в разных длинах волн, полученными с помощью датского телескопа, и обнаружили, что иногда места повышенной интенсивности в крыльях линии H $\alpha$  совпадают с яркими точками сетки и являются местами концентрации сильного магнитного поля (MCs). В этих местах не наблюдается выхода магнитного потока. Авторы считают, что необходимо различать БЭ и подобные концентрации магнитного поля. Они отмечают, что ряд работ, рассматривающих БЭ, на самом деле относятся к MCs.

Несмотря на большое количество работ, в которых изучаются БЭ, остается много неясного. Следует отметить разные, иногда противоположные мнения относительно положения эмиссии в солнечной атмосфере, моделей, механизмов образования БЭ. В работах [3, 18] выполнено численное моделирование и рассмотрено образование БЭ вследствие выхода змеевидного магнитного поля и его взаимодействия с уже имеющимся в активной области магнитным полем, что приводит к ряду событий магнитных пересоединений. Авторы предполагают, что магнитные пересоединения могут происходить на разных уровнях солнечной атмосферы. В работе [29] предполагается, что БЭ возникают вследствие магнитных пересоединений в нижней атмосфере Солнца. Джоулева диссипация вызывает увеличение температуры. В работе [9] наблюдаемая в линии H $\alpha$  линейная поляризация интерпретируется как ударная поляризация, вызванная пучком электронов в несколько сотен килоэлектронвольт. Авторы работы [6] обсуждают возможность инъекции пучков высокоэнергичных частиц из короны или в средней хромосфере и глубже. В работе [21] отмечено, что для разных типов БЭ возможны разные механизмы. В последнее время преобладает точка зрения о фотосферном происхождении бомб Эллермана вследствие пересоединений в фотосфере [16, 22, 26, 28]. Предполагается, что для появления БЭ очень важен прогрев фотосферы и области температурного минимума [21].

В работе представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений бомбы Эллермана на солнечном франко-итальянском телескопе THEMIS (Испания, Канарские о-ва, Тенерифе, наблюдатель Е. В. Хоменко). Рассмотрены профили параметров Стокса фотосферных линий.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Спектрополяриметрические наблюдения активной области NOAA 11024 выполнены Е. В. Хоменко 4 июля 2009 г. на солнечном франко-итальянском телескопе THEMIS (Испания, Канарские о-ва) в MTR-режиме (multiline spectroscopy mode) [14]. Наблюдения подробно описаны в [10, 11]. Активная область NOAA 11024 появилась на восточной стороне солнечного диска 29 июня 2009 г. в виде факельных участков и очень быстро развивалась, усложнялась структура ее

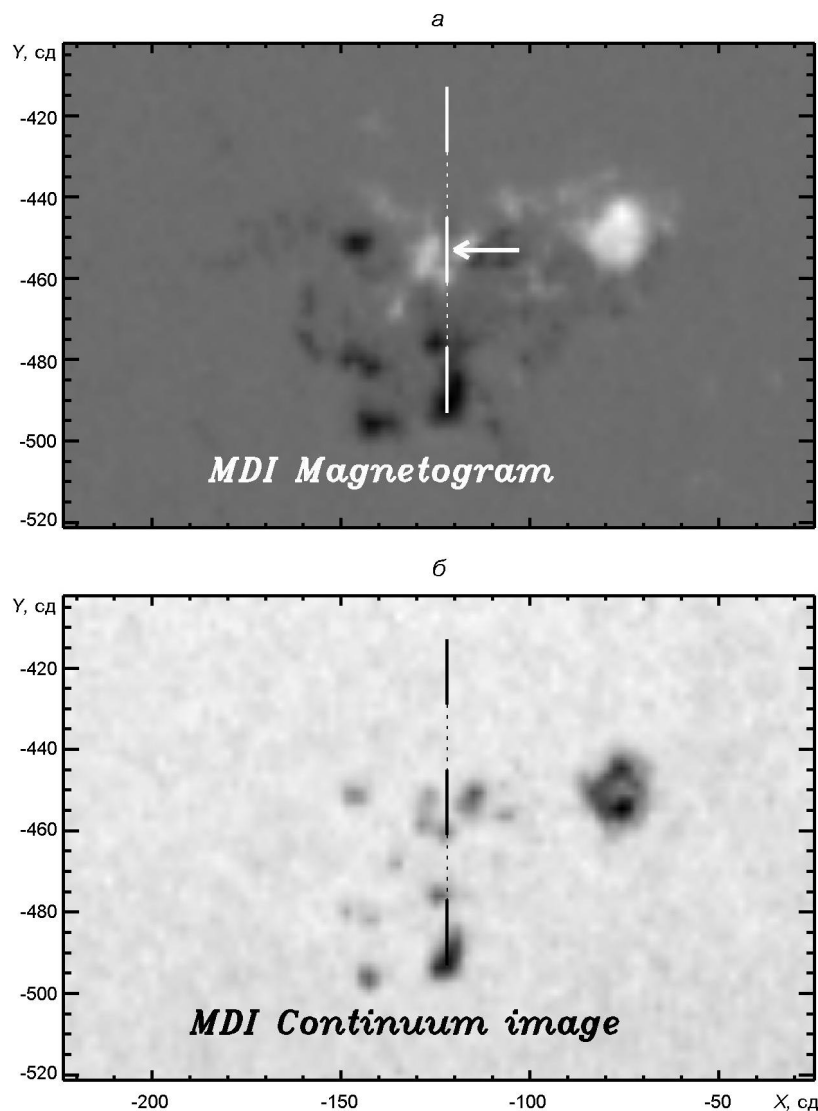


Рис. 1. Изображение в белом свете и магнитограмма активной области NOAA 11024, полученные на MDI на борту SOHO 4 июля 2009 г. Вертикальные линии показывают положение щели спектрографа. Стрелкой указано положение бомбы Эллермана

магнитного поля. В день наблюдений она находилась недалеко от центра диска Солнца и была единственной на диске. В ней происходил выход нового магнитного потока, его главная фаза [25]. В работе [25] выход магнитного потока характеризуется как змеевидный (serpentine emergence). В день наблюдений область отличалась высокой активностью, в ней возникло много вспышек и выбросов [25]. В течение дня получен ряд временных серий спектров активной области в разных участках длин волн с пространственным разрешением около 1 и временным разрешением около 3 с. В H $\alpha$ -спектрах, полученных на теле-

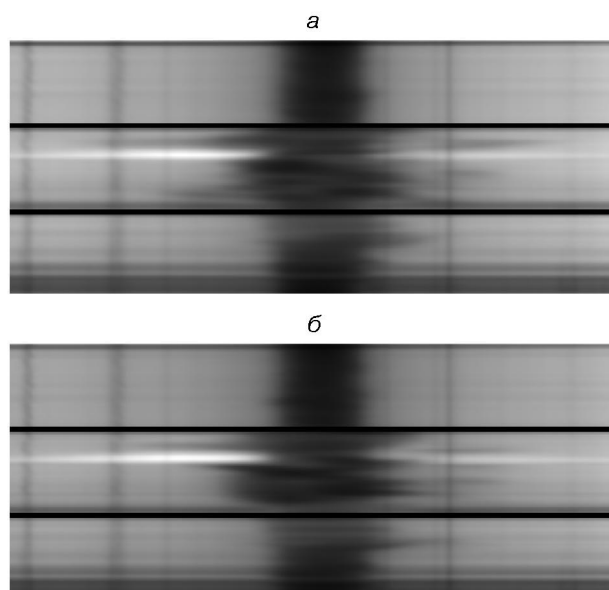


Рис. 2. Спектрограммы с изображением бомбы Эллера в линии Н, полученные на телескопе THEMIS в  $10^h10^m18^s$  (внизу) и  $10^h11^m26^s$  4 июля 2009 г.

скопе THEMIS, есть и БЭ, одна из которых рассматривается в данной работе. Для ее изучения выбрано шесть спектров хорошего качества, полученных в  $10^h10^m18^s$ ,  $10^h10^m32^s$ ,  $10^h10^m47^s$ ,  $10^h11^m01^s$ ,  $10^h11^m15^s$ ,  $10^h11^m26^s$ .

На рис. 1 показаны изображение в белом свете и магнитограмма активной области, полученные на борту космической обсерватории SOHO с помощью прибора Michelson Doppler Imager (MDI) [23]. Рассматриваемая в данной работе БЭ возникла вблизи группы пор разной полярности, в области выходящего магнитного потока. Вертикальными линиями показано положение щели спектрографа. Поле зрения телескопа разделено на три части длиной примерно по 11 Мм.

На рис. 2 приведены спектрограммы с изображением БЭ в линии Н, полученные на телескопе THEMIS в  $10^h10^m18^s$  и  $10^h11^m26^s$ . Интервалы между частями поля зрения телескопа отмечены черными горизонтальными линиями. Изучаемая часть активной области расположена между этими линиями. В спектрах видны очень яркие полосы в крыльях линии Н — проявление БЭ. В голубом крыле линии полоска значительно ярче, чем в красном. Размер БЭ вдоль щели спектрографа — примерно 2. Тонкая структура линии Н в окрестностях БЭ свидетельствует о сильных движениях в хромосфере, в спектрах видно множество джетов.

На рис. 3 показаны изменения интенсивности поперек дисперсии в центре линии Н и в ее голубом и красном крыльях, а также в континууме на участке  $\lambda = 630...630.5$  нм. Пики интенсивности в крыльях

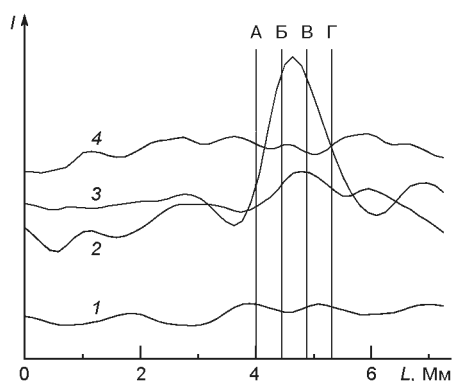


Рис. 3. Изменение интенсивности  $I$  в условных единицах в центре линии H (кривая 1), в ее красном крыле (2), голубом крыле (3) и континууме на участке  $\lambda = 630...630.5$  нм (4) вдоль разреза активной области в  $10^h 10^m 18^s$  UT. Вертикальными линиями отмечены места сечений (A, Г — края бомбы Эллемана, Б, В — центральная область бомбы Эллемана)

линии H соответствуют БЭ. Пик в голубом крыле линии значительно больше, чем в красном. На участке  $\lambda = 630...630.5$  нм в этом месте не имеется повышения интенсивности континуума. Из рисунка видно, что область БЭ в  $\lambda = 630...630.5$  нм соответствует двум межгранульным промежуткам. Значительных изменений интенсивности в центре линии H не наблюдается. Вертикальными линиями на рисунке обозначены места выбранных для изучения четырех сечений активной области. Сечения Б и В проходят через центральную часть БЭ, а сечения А и Г — через края. Расстояние на Солнце между сечениями 457 км.

### ПРОФИЛИ СТОКСА ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ

В таблице приведены параметры фотосферных линий железа, титана и никеля, использованных для изучения БЭ: длина волны, элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня [20], фактор Ланде [4] и центральные глубины профилей линий для невозмущенной фотосферы в центре диска Солнца [5]. Линии различаются по интенсивности, магнитной чувствительности. В результате обработки получены профили Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  этих линий для сечений А, Б, В, Г и для сечения фотосферы вне рассматриваемой области. Ошибки остаточной интенсивности — примерно 1 %,  $Q$ ,  $U$  и  $V$  — 0.003. Следует отметить, что для линий Fe I 630.34 нм, Ti I 630.38 нм, имеющих малую магнитную чувствительность, значения параметров  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  очень малы.

Полученные из наблюдений БЭ профили  $I$  Стокса фотосферных линий сильно отличаются от профилей для невозмущенной области

Параметры выбранных спектральных линий

$\lambda$ , нм	Элемент	$EPL$ , эВ	$g_{\Phi}$	$d_0$
630.15	Fe I	3.65	1.7	0.72
630.25	Fe I	3.69	2.5	0.65
630.35	Fe I	4.32	1.3	0.05
630.38	Ti I	1.44	0.9	0.08
611.11	Ni I	4.09	1.2	0.32

фотосферы по величине остаточной интенсивности, полуширине. Возможно, это свидетельствует о значительных отклонениях термодинамических параметров фотосферы БЭ от параметров невозмущенной фотосферы. Профили Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  для разных мест БЭ сильно различаются между собой.

На рис. 4 приведены профили Стокса линии железа  $\lambda = 630.25$  нм для разных сечений БЭ в момент наблюдений  $10^h 10^m 18^s$ . Профили Стокса  $I$  линии Fe I  $\lambda = 630.25$  нм для центра БЭ на 18—23 % слабее, а полуширина — на 5—8.5 пм (40—70 %) больше полуширины профиля для невозмущенной области фотосферы. Для краев БЭ линия слабее на 9—13 %, ее полуширина больше на 1.5—5.5 нм (10—40 %). Несколько меньше отклонения центральной глубины и полуширины профилей линии Fe I  $\lambda = 630.15$  нм. Профили Стокса  $V$  максимальны в центральной области БЭ. Наибольшие значения параметра  $V$  отмечаются в этой наиболее магниточувствительной линии Fe I  $\lambda = 630.25$  нм и достигают 0.06. На краях БЭ они меньше на 0.01—0.04. В целом голубое крыло профилей  $V$  сильнее, чем красное. Параметры Стокса  $Q$  и  $U$  также имеют наибольшие значения для линии Fe I  $\lambda = 630.25$  нм и достигают 0.02. В большинстве случаев они максимальны в сечениях А и Б и уменьшаются от сечения к сечению. В сечении Г они очень малы или нулевые. То же касается параметров  $Q$  и  $U$ , полученных в последующие моменты времени. В некоторых случаях в разных линиях и в разных сечениях они имеют разную форму.

На рис. 5 приведены профили Стокса линии никеля  $\lambda = 611.11$  нм для разных сечений для того же момента наблюдений. Профили параметра Стокса  $I$  этой линии для центра БЭ на 9—11 % слабее, а полуширина — на 20 % больше полуширины профиля для невозмущенной области фотосферы, для краев БЭ параметр  $I$  слабее на 3—4 %, а полуширина больше на 10 %. Отклонения центральной глубины профилей линий Fe I  $\lambda = 630.34$  нм и Ti I  $\lambda = 630.38$  нм от профилей невозмущенной фотосферы не превышают 2—3 %.

Профили Стокса изменялись со временем. На рис. 6 показано сравнение профилей Стокса линии Fe I  $\lambda = 630.25$  нм в сечении Б в центральной части БЭ для моментов  $10^h 10^m 18^s$ ,  $10^h 10^m 47^s$ ,  $10^h 11^m 15^s$ ,  $10^h 11^m 26^s$ . В разные моменты наблюдений БЭ центральная глубина профилей параметра Стокса  $I$  этой линии изменялась в пределах 5 %. Примерно такие же изменения получены для линии Fe I  $\lambda = 630.15$  нм. Центральная глубина линии Ni I  $\lambda = 611.11$  нм изменялась во время наблюдений не более чем на 2.5 %, а для слабых линий Fe I  $\lambda = 630.34$  нм и Ti I  $\lambda = 630.38$  нм ее изменения не превышали 2 %. Форма профилей Стокса  $U$  и  $V$  линий Fe I  $\lambda = 630.15$  нм, Fe I  $\lambda = 630.25$  нм и Ni I  $\lambda = 611.11$  нм оставалась примерно одинаковой во все рассматриваемые моменты наблюдений, но изменялись значения параметров. В  $10^h 10^m 18^s$  они были наибольшими, в  $10^h 10^m 47^s$  уменьшились в два раза.

Можно отметить большие различия параметра  $Q$  линий Fe I  $\lambda = 630.15$  нм и Fe I  $\lambda = 630.25$  нм в первый и последующие моменты

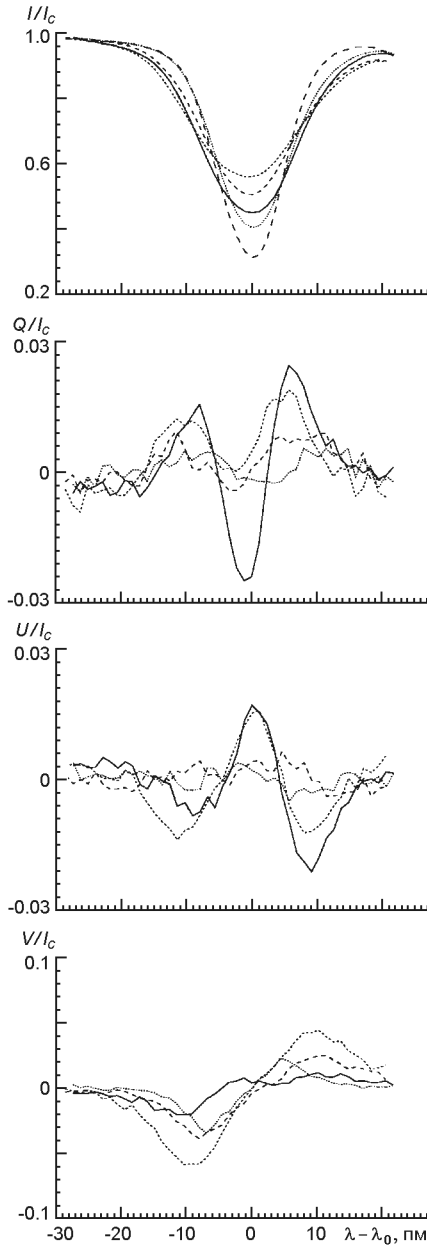


Рис. 4. Профили параметров Стокса линии Fe I 630.25 нм для четырех сечений бомбы Эллермана в  $10^h 10^m 18^s$  UT (сечение А — сплошная линия, Б — короткие штрихи, В — средние штрихи, Г — пунктир. Длинные штрихи — профиль  $I$  для участка невозмущенной фотосферы

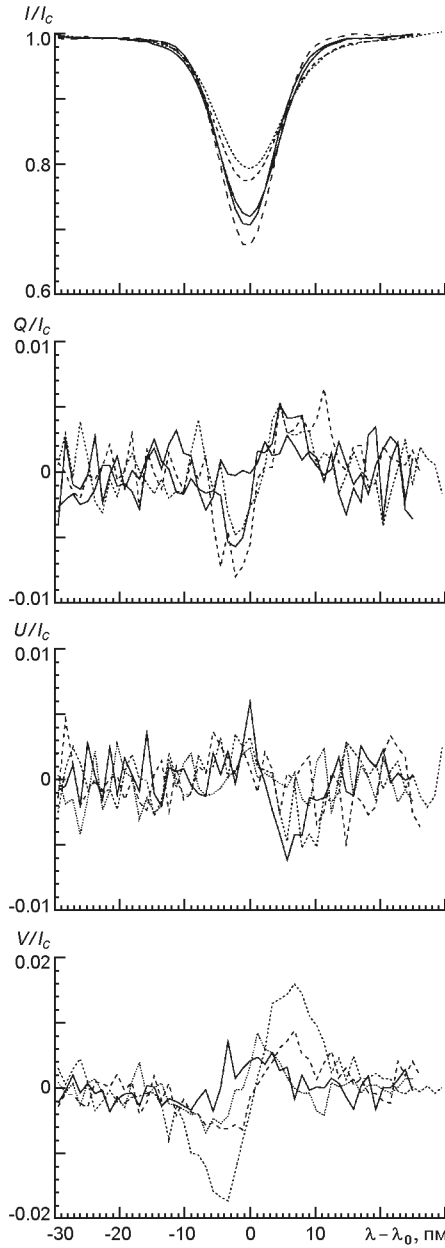


Рис. 5. То же для линии Ni I 611.11 нм

(рис. 6). Для линии Ni I 611.11 нм такого различия нет. Для сечения В, также относящегося к центральной области БЭ, получены меньшие изменения центральной глубины линий и параметров Стокса  $Q$ ,  $U$  и  $V$



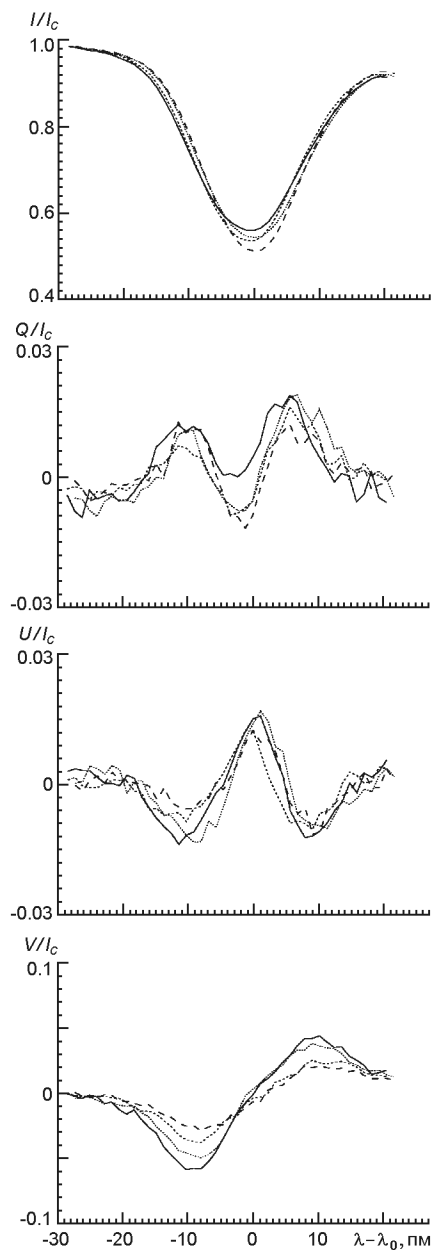


Рис. 6. Профили Стокса линии Fe I 630.25 для сечения Б для четырех моментов наблюдений: сплошная линия —  $10^h 10^m 18^s$  UT, короткие штрихи —  $10^h 10^m 47^s$  UT, длинные штрихи —  $10^h 11^m 15^s$  UT, пунктир —  $10^h 11^m 26^s$  UT

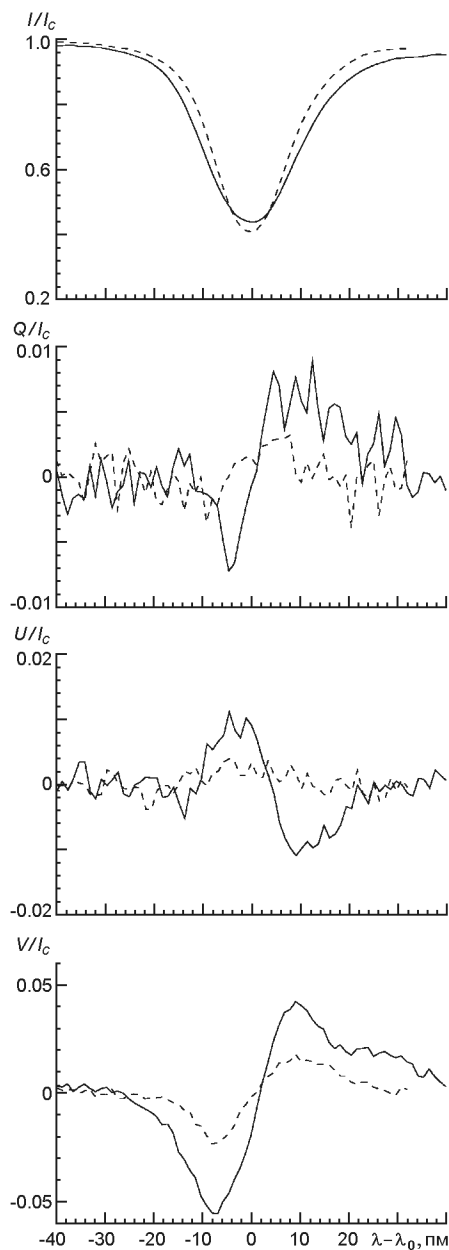


Рис. 7. Сравнение профилей Стокса линии Fe I 630.15 нм для БЭ в  $10^h 10^m 33^s$  UT (сплошная линия) и микровспышки (штрихи)

во времени. Изменения профилей Стокса со временем найдены и для сечений А, Г. В целом наибольшие значения параметров относятся к первым двум моментам наблюдений.

## СРАВНЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ СТОКСА ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ БОМБЫ ЭЛЛЕРМАНА И МИКРОВСПЫШЕК

В день спектрополяриметрических наблюдений на телескопе THEMIS в  $12^h 03^m 30^s$  в рассматриваемой активной области, в другом ее месте, возникла микровспышка рентгеновского балла В3 [10]. Известно, что БЭ и микровспышки имеют много общих особенностей: небольшой размер, короткую продолжительность, сопровождаются джетоподобными движениями вещества. Интересно сравнить профили Стокса исследуемых линий в спектрах этой микровспышки и бомбы Эллермана.

На рис. 7 приведены профили линии Fe I 630.15 нм в моменты наблюдений микровспышки и БЭ, когда они подверглись наибольшему изменению. Полученные из наблюдений БЭ профили Стокса  $I$  оказались слабее и шире, чем профили для микровспышки. Сравнение профилей показывает, что параметры Стокса  $Q$ ,  $U$  и  $V$  значительно (в среднем в два раза) больше для БЭ, чем для микровспышки. То же касается линий Ni I 611.11 нм и Fe I 630.25 нм. Параметры  $Q$  и  $U$  линии Fe I 630.25 нм для БЭ имеют более сложную форму, чем для микровспышки. Сравнение параметров Стокса, полученных из наблюдений БЭ и слабой вспышки балла Sf/B6.8 28 мая 2012 г. [2], дает такой же результат. Слабые линии Fe I 630.34 нм Ti I 630.37 нм различаются мало по центральной глубине профилей, но шире линий в спектрах слабых вспышек.

### ВЫВОДЫ

Приведены результаты спектрополяриметрических наблюдений бомбы Эллермана на франко-итальянском телескопе THEMIS. Проанализировано изменение профилей Стокса пяти фотосферных линий железа, титана и никеля в разных сечениях БЭ для шести моментов наблюдений. Линии имеют разную интенсивность и разную чувствительность к магнитному полю. Выявлено, что профили линий в спектрах БЭ отличаются от профилей для невозмущенной области фотосферы вне активной области. Профили Стокса  $I$  для БЭ значительно слабее. Наибольшие отклонения их центральной глубины и полуширины, наибольшие значения параметров Стокса  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  найдены для магниточувствительной линии Fe I 630.25 нм. Профили Стокса  $V$  максимальны в центральной области БЭ (сечения Б и В), а параметры  $Q$  и  $U$  — в сечениях А и Б. Сравнение параметров Стокса для БЭ и микровспышек показало, что параметры  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  значительно больше для БЭ.

Полученные данные, возможно, свидетельствуют об отличиях термодинамических параметров и характеристик магнитного поля БЭ от параметров невозмущенной фотосферы и микровспышек. Возможно, они обусловлены магнитным пересоединением в нижней атмосфере.

Автор благодарит Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за помощь с наблюдениями и Р. И. Костыка за предоставление программ обработки данных.

1. *Северный А. Б.* Некоторые результаты исследований нестационарных процессов на Солнце // *Астрон. журн.*—1957.—**34**.—P. 684—693.
2. *Andriets E., Kondrashova N. N.* Semiempirical photospheric models of a solar flare on May 28, 2012 // *Adv. Space Res.*—2015.—**55**, N 3.—P. 871—878.
3. *Archontis V., Hood A. W.* Formation of Ellerman bombs due to 3D flux emergence // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**508**.—P. 1469—1483.
4. *Beckers J. M.* A table of Zeeman multiplets // *Phys. Sci. Res. Papers.*—1969.—N 371.—193 p.
5. *Delbouille L., Roland G., Neven L.* Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. — Liege: Institut d'Astrophysique, 1973.
6. *Ding M. D., Henoux J.-C., Fang C.* Line profiles in moustaches produced by an impacting energetic particle beam // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**332**.—P. 761—766.
7. *Ellerman F.* Solar hydrogen “bombs” // *Astrophys. J.*—1917.—**46**.—P. 298—300.
8. *Hong J., Ding M. D., Li Y., et al.* Spectral observations of Ellerman bombs band fitting with a two-cloud model // *Astrophys. J.*—2014.—**792**, N 1.—10 p.
9. *Kashapova L. K.* A spectropolarimetric study of Ellerman bombs // *Astron. Report.*—2002.—**46**, N 12.—P. 918—924.
10. *Kondrashova N. N.* Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2013.—**431**, N 2.—P. 1417—1424.
11. *Kondrashova N. N., Pasechnik M. N., Chornogor S. N., Khomenko E. V.* Atmosphere dynamics of the active region NOAA 11024 // *Solar Phys.*—2013.—**284**, N 2.—P. 499—513.
12. *Koval A. N., Severny A. B.* On the asymmetry of moustaches // *Solar Phys.*—1970.—**11**, N 2.—P. 276—284.
13. *Kurokawa H., Kawaguchi I., Funakoshi Y., Nakai Y.* Morphological and evolutionary features of Ellerman bombs // *Solar Phys.*—1982.—**79**.—P. 77—84.
14. *Lopez Ariste A., Rayrole J., Semel M.* First results from THEMIS spectropolarimetric mode // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**142**.—P. 137—148.
15. *Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al.* Cooperative observation of Ellerman bombs between the Solar Optical Telescope aboard Hinode and Hida/Domless Solar Telescope // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**, N 3.—P. 577—584.
16. *Nelson C. J., Shelyag S., Mathioudakis M., et al.* Ellerman bombs — evidence for magnetic reconnection in the lower solar atmosphere // *Astrophys. J.*—2013.—**779**, N 2.—article id. 125—10 p.
17. *Nindos A., Zirin H.* Properties and motions of Ellerman bombs // *Solar Phys.*—1998.—**182**.—P. 381—392.
18. *Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al.* Resistive emergence of undulatory flux tubes // *Astrophys. J.*—2004.—**614**, N 2.—P. 1099—1112.
19. *Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al.* Spectrophotometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II, H $\alpha$ , and UV range // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**473**, N 1.—P. 279—289.
20. *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Contrib. Kitt Peak Nat. Observatory.*—1972.—N 559.
21. *Qiu J., Ding M. D., Wang H., et al.* Ultraviolet and H $\alpha$  emission in Ellerman bombs // *Astrophys. J.*—2000.—**544**, N 2.—P. L157—L161.

22. Rutten R. J., Vissers G. J. M., Rouppe van der Voort L. H. M., et al. Ellerman bombs: fallacies, fads, usage // J. Phys. Conf. Ser.—2013.—**440**, N 1.—article id. 012007.
23. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I., et al. The solar oscillations investigation — Michelson Doppler Imager // Solar Phys.—1995.—**162**, N 1-2.—P. 129—188.
24. Severny A. B. Fine structure in solar spectra // Observatory.—1956.—**76**.— P. 241—242.
25. Valori G., Green L. M., Demoulin P., et al. Nonlinear force-free extrapolation of emerging flux with a global twist and serpentine fine structures // Solar Phys.—2012.—**278**, N 1.—P. 73—97.
26. Vissers G. J. M., Rouppe van der Voort L. H. M., Rutten R. J. Ellerman bombs at high resolution. II. Triggering, visibility, and effect on upper atmosphere // Astrophys. J.—2013.—**774**, N 1.—article id. 32—14 p.
27. Watanabe H., Kitai R., Okamoto K., et al. Spectropolarimetric observation of an emerging flux region: triggering mechanisms of Ellerman bombs // Astrophys. J.—2008.—**684**, N 1.—P. 736—746.
28. Watanabe H., Vissers G., Kitai R., et al. Ellerman bombs at high resolution. I. Morphological evidence for photospheric reconnection // Astrophys. J.—2011.— **736**, N 1.—12 p.
29. Xu X-Y., Fang C., Ding M. D., Gao D-H. Numerical simulations of magnetic reconnection in the lower solar atmosphere // Res. Astron. and Astrophys.—2011.—**11**, N 2.—P. 225—236.

Статья поступила в редакцию 26.03.15