

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.02.028>

УДК 523.985.3

**Н. Н. Кондрашова<sup>1</sup>, У. М. Лейко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143, Украина  
kondr@mao.kiev.ua

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,  
ул. Обсерваторная 3, Киев, 04053, Украина  
leikoum@ukr.net

## **Мелкомасштабные магнитные особенности в активной области NOAA 11024**

*С целью выявления и изучения магнитных особенностей в активной области NOAA 11024 проанализированы изменения со временем V-профилей Стокса фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм и Ti I 630.38 нм. Для исследования использованы данные спектрополяриметрических наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания) 4 июля 2009 г. Изучаемый участок активной области включает две поры разной полярности и два флоккула. Одна из пор быстро развивалась. В период двадцати минут наблюдений на этом участке происходили эруптивные процессы: три бомбы Эллермана и хромосферные выбросы. V-профили фотосферных линий сильно различаются в разных местах активной области. В большинстве случаев они обычные. В порах их амплитуда увеличивается к внешним краям пор. Максимальная амплитуда отмечается у профилей на границе между развивающейся порой и бомбой Эллермана. Она быстро увеличивалась со временем. Выявлены два маленьких участка с аномальными V-профилями фотосферных линий Fe I 630.15 и 630.25 нм. Амплитуда профилей в этих местах уменьшена. Амплитуда и форма профилей изменялись со временем. Один из участков располагался между порами, другой в области флоккула. Во время наблюдений на этих участках произошла смена полярности фотосферного магнитного поля. Получены доказательства выхода новых мелкомасштабных магнитных потоков противоположной полярности. Это привело к началу магнитных пересоединений и возникновению хромосферных выбросов и бомбы Эллермана. Обнаружены сильные колебания амплитуды V-профилей фотосферных линий Fe I 630.15 и 630.25 нм во время бомб Эллермана, что может свидетельствовать об импульсном характере выделения энергии.*

© Н. Н. КОНДРАШОВА, У. М. ЛЕЙКО, 2019

**Ключевые слова:** Солнце, фотосфера, активные области, поры, бомбы Эллермана, магнитные поля, спектрополяриметрия.

## ВВЕДЕНИЕ

Активная область NOAA 11024 вызвала большой интерес среди исследователей Солнца. Она была первой активной областью в южном полушарии Солнца в 24-м цикле солнечной активности. Ее изучению посвящен ряд работ [7, 19, 39, 43—45 и др.]. После появления на солнечном диске эта область быстро развивалась, усложнялась ее магнитная структура. Согласно данным [44, 45] в ней происходил так называемый змеевидный выход магнитного потока на больших и малых масштабах, что вызвало большое количество эруптивных явлений, малых вспышек, бомб Эллермана и выбросов.

Одним из привлекательных для изучения особенностей магнитного поля является участок активной области длиной 10 Мм в окрестности линии раздела полярностей, на котором в период наблюдений произошло несколько эрупций. В работах [19, 28—30] изучена динамика хромосферы и фотосферы на этом участке. Используются данные спектрополяриметрических наблюдений области на франко-итальянском солнечном горизонтальном телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. В этот день на участке происходил выход нового магнитного потока. Возле поры положительной полярности появилась пара противоположной отрицательной полярности, которая быстро развивалась. Щель спектрографа телескопа пересекала эти поры и два флоккула, активный и спокойный [19]. В период 20 мин наблюдений на участке происходили три бомбы Эллермана и несколько хромосферных выбросов.

В работе [19] измерены лучевые скорости по сдвигам ядер хромосферной линии H и фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм и Ti I 630.38 нм. Установлено, что поле лучевых скоростей на изучаемом участке активной области имело сложную структуру. Скорости в разных объектах, в порах и флоккулах, сильно различались. Выявлены их изменения со временем на протяжении периода наблюдений. Наибольшие скорости были связаны с хромосферными выбросами. В области развивающейся поры и активного флоккула, где выходил магнитный поток, скорости хромосферных нисходящих потоков достигали 18 км/с. В спокойном флоккуле они не превышали  $\pm 5$  км/с. На всех исследуемых уровнях фотосферы наблюдался подъем вещества. Скорости восходящих потоков были наибольшими в области выхода магнитного потока. Движения в хромосферных и фотосферных слоях бомб Эллермана на этом участке изучены в работах [28—30].

Для лучшего понимания процессов в области NOAA 11024 представляется важным детально исследовать также изменения мелкомасштабных фотосферных магнитных полей. Данные спектрополяриметрических наблюдений позволяют проследить эти изменения. В дан-

ной работе с целью изучения магнитных особенностей проанализировано изменение параметра Стокса  $V$  фотосферных линий (круговая поляризация). Исследование характеристик магнитного поля будет в дальнейшем продолжено.

### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Активная область NOAA 11024 появилась на диске Солнца 29 июня 2009 г. в виде факельной площадки и быстро развивалась в биполярную группу пятен, усложнялась ее магнитная структура. Она была одна на солнечном диске. На фильтрограммах в линии H видны фибриллы, обычно наблюдающиеся в молодых развивающихся активных областях. В день наблюдений на солнечном горизонтальном телескопе THEMIS, 4 июля, группа пятен находилась вблизи центрального меридиана. В щель спектрографа телескопа попадал центральный участок активной области, находившийся в области инверсии полярностей магнитного поля. Магнитограмма и изображение в белом свете изучаемой активной области, полученные 4 июля 2009 г. в  $09^h36^m$  на борту космической обсерватории SOHO с помощью прибора Michelson Doppler Imager (MDI) [37], и положение щели спектрографа телескопа THEMIS приведены на рис. 1.

Ширина щели спектрографа была равной  $0.5''$ . Интервал времени между отдельными спектрами составлял  $2.84$  с, время накопления сигнала —  $0.12$  с. Один пиксель занимает  $0.2''$ . Из нескольких временных серий наблюдений с фиксированной щелью для данной работы выбрана серия, которая началась в  $9^h30^m53^s$  и продолжалась двадцать минут. На рис. 2 даны изображения H-спектров для моментов наблюдений  $9^h30^m53^s$  и  $9^h42^m28^s$ . Со временем их вид очень сильно изменялся. Последовательность записей спектров отображает значительные быстрые изменения, происходившие в хромосфере исследуемого участка активной области в течение наблюдений. Как отмечалось, изучаемая часть активной области включает две поры и два флоккула.

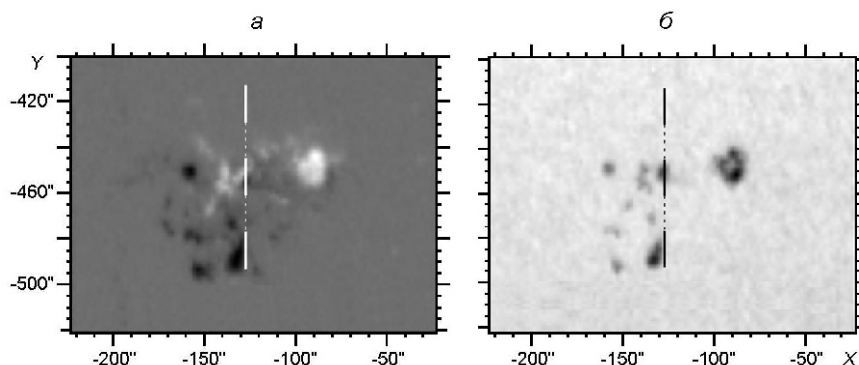


Рис. 1. Магнитограмма (а) и изображение активной области NOAA 11024 в континууме (б), полученные на SOHO/MDI 4 июля 2009 г. в  $9^h36^m$  UT. Положение щели спектрографа телескопа THEMIS отмечено вертикальной линией. Центральная часть щели пересекает изучаемый участок активной области

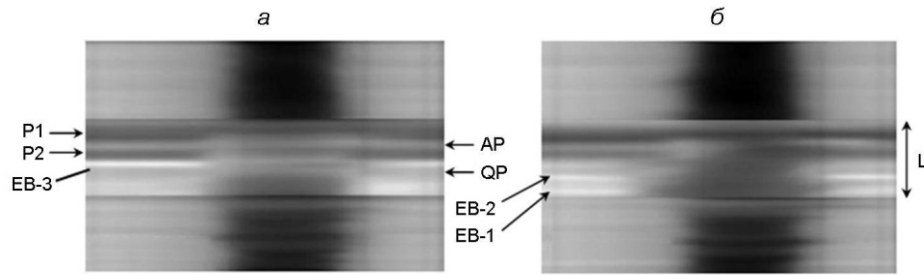


Рис. 2. Спектрограммы участка спектра, включающего линию H, полученные на телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. в  $9^h30^m53^s$  (а) и  $9^h42^m28^s$  (б). Спектральный участок охватывает область длин волн  $\lambda = 656...656.7$  нм ( $L$  — изучаемая часть активной области, P1, P2 — поры, AP — активный флоккул, QP — спокойный флоккул, EB-1, EB-2, EB-3 — бомбы Эллермана)

#### Параметры выбранных спектральных линий

$\lambda$ , нм	Элемент	$EPL$ , эВ	$g_{\text{эф}}$	$d_0$
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

Их обозначения соответствуют названиям, приведенным в работе [19]. В спокойном флоккуле QP не обнаружено значительных изменений лучевой скорости. В активном флоккуле AP происходили такие изменения. Новая пора P2 отрицательной полярности быстро развивалась вблизи поры P1 положительной полярности.

В таблице приведены параметры использованных в работе фотосферных линий: длина волны  $\lambda$ , элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня  $EPL$  [31], фактор Ланде  $g_{\text{эф}}$  [2] и центральные глубины  $d_0$  профилей линий для невозмущенной фотосферы для центра диска Солнца [6]. Линии имеют разную интенсивность и разную чувствительность к магнитному полю.

#### ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧАЕМОГО УЧАСТКА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 11024 В ХРОМОСФЕРЕ И ФОТОСФЕРЕ

Рассматриваемый в данной работе участок активной области NOAA 11024 содержит пиксели от 70 до 130. На рис. 3 показаны изменения интенсивности поперек дисперсии в центре линии H и в континууме спектрального участка  $\lambda = 630$  нм в  $9^h32^m37^s$ . Пора P1 занимает пиксели 116...130, пора P2 — пиксели 100...107, спокойный флоккул Q — пиксели 84...90, активный флоккул AP — пиксели 108...115. В начале наблюдений в области поры P1 магнитное поле имело положительную полярность, а ниже поры P1 — отрицательную полярность.

На всем рассматриваемом участке активной области профили линии H сильно отличаются от ее профиля в спектре невозмущенной ат-

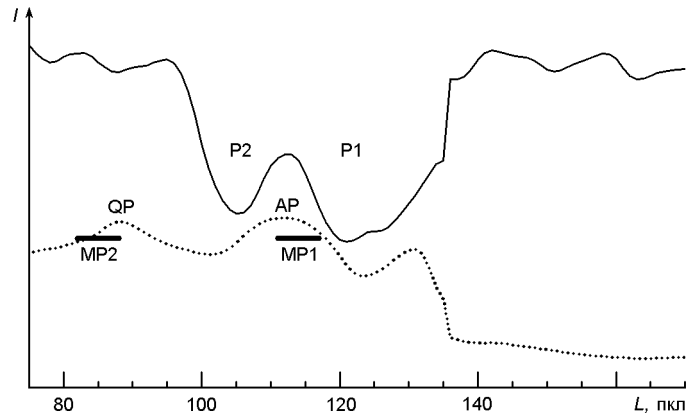


Рис. 3. Изменение интенсивности  $I$  в условных единицах вдоль разреза активной области щелью в центре линии H (пунктир) и в континууме на спектральном участке 630 нм в  $9^h32^m37^s$  (сплошная линия). P1, P2 — поры, AP и QP — флоккулы. Горизонтальными сплошными линиями отмечены области аномальных V-профилей фотосферных линий MP1 и MP2

мосферы. Линия сильно ослаблена. В H-спектрах в области нижней половины поры P1 имеется эмиссия в крыльях линии H. В области верхней половины эмиссии в крыльях нет. В области поры P2 и между порами преобладает эмиссия в синем (коротковолновом) крыле линии. В нижней части спектра (пиксели 70...80) преобладает эмиссия в красном крыле линии.

Вид спектров сильно изменялся в течение двадцати минут наблюдений на телескопе THEMIS, что свидетельствует о быстрых, эруптивных процессах в хромосфере. За период наблюдений на рассматриваемом участке возникло несколько хромосферных выбросов. В H-спектрах, полученных в начале наблюдений, в  $9^h30^m53^s$  (рис. 2а), ниже поры P2 видна развитая бомба Эллермана (пиксели 91...99, EB-3). В крыльях линии H наблюдается эмиссия, видны яркие полоски в спектрах. В спектре в  $9^h32^m45^s$  ее уже нет. Изменение интенсивности в центре линии H и в ее крыльях на расстоянии 0.1 нм от ее центра в обе стороны длин волн, а также изменение хромосферной лучевой скорости в центральной части EB-3 приведены на рис. 5 в работе [28]. Из рисунка видно, что бомба Эллермана находилась в фазе охлаждения. В начале наблюдений в хромосфере на уровне образования ядра линии H наблюдались нисходящие потоки с максимальной скоростью 10 км/с. К  $9^h32^m$  нисходящий поток сдвинулся и охватил пору P2 и флоккул AP, его скорость увеличилась до 14 км/с [19]. Скорость опускания хромосферного вещества в бомбе резко уменьшалась и сменилась его подъемом. Через минуту изменения скорости носили колебательный характер [28]. В фотосфере движения были восходящими со скоростями от  $-1$  до  $-1.5$  км/с.

После окончания EB-3 в этой области наблюдались три хромосферных выброса, максимальная скорость которых была в  $09^h35^m40^s$ ,  $09^h42^m28^s$  и  $09^h48^m51^s$ . Наклонные детали в спектрах свидетельствуют о вихревых движениях плазмы в этих выбросах.

На рассматриваемом участке активной области происходили еще две бомбы Эллера (ЕВ-1 и ЕВ-2, рис. 2,  $09^h42^m28^s$ ). ЕВ-1 была видна в H -спектрах с самого начала наблюдений, а ЕВ-2 появилась примерно в  $09^h40^m$  и была видна до конца наблюдательного периода. Положение ЕВ-1 и ЕВ-2 соответствует межгранульным промежуткам. Со временем яркость ЕВ-1 уменьшалась, а ЕВ-2 — увеличивалась. По-видимому, интервал наблюдений ЕВ-2 охватывает стадию преднагрева и вспышечную фазу [22]. С самого начала наблюдений имеется небольшая эмиссия в крыльях профилей линии H . Она сильно увеличилась к концу наблюдений. В спектрах участка 630 нм хорошо видно сильное ослабление фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25 нм в местах всех бомб Эллера.

В работе [29] приведены профили линии H , полученные на разных стадиях развития бомб Эллера ЕВ-1 и ЕВ-2, а также изменение интенсивности в ее крыльях со временем и вдоль участка активной области, вырезанного щелью. Выявлены сильные колебания интенсивности в процессе развития бомб. Автор работы полагает, что во время бомб Эллера происходило как постепенное, так и импульсное выделение энергии. В этой работе также исследованы вариации поля хромосферных лучевых скоростей в бомбах Эллера и обнаружены колебания лучевой скорости. Установлено, что максимальная лучевая скорость к наблюдателю составляла  $-9$  км/с, а от наблюдателя  $8$  км/с. На H -спектрах в  $09^h44^m42^s$ ,  $09^h48^m20^s$  видны хромосферные выбросы в области бомбы Эллера ЕВ-2.

В работе [30] приведены I-профили Стокса фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм и Ti I 630.38 нм, полученные на разных стадиях развития бомб Эллера ЕВ-1 и ЕВ-2. Они были асимметричными. Асимметрия более выражена для слабых линий. Видно увеличение интенсивности в ядрах линий в области бомб Эллера. Изменения интенсивности со временем имели колебательный характер. В области ЕВ-1 интенсивность в среднем уменьшалась, а в области ЕВ-2 увеличивалась со временем. В начале наблюдений в течение трех минут на кривых зависимостей центральной интенсивности линий Fe I 630.15 и 630.25 нм для области ЕВ-1 были видны три пика, которые согласовались с пиками на кривой зависимости от времени интенсивности крыльев линии H . Подобное изменение интенсивности также может свидетельствовать об импульсном выделении энергии. В работе сделано предположение о том, что возбуждение, вызванное импульсным выделением энергии в области ЕВ-1, распространилось вдоль участка АО по магнитной петле и вызвало развитие ЕВ-2.

Согласно данным работы [19] в фотосфере на всем рассматриваемом участке происходил подъем вещества. В области бомб Эллера ЕВ-1 и ЕВ-2 скорость восходящих движений значительно уменьшена [20]. Сделано предположение о том, что это произошло вследствие увеличения скорости нисходящих потоков сверху.

Анализ V-профилей фотосферных линий в спектрах рассматриваемого участка активной области показал, что они очень сильно различаются между собой для разных пикселей и разных линий. Сильно из-

меняется амплитуда и форма профилей линий при переходе от одной особенности активной области к другой и даже от пикселя к пикселю. Во всех случаях наибольшую амплитуду имеют  $V$ -профили наиболее чувствительной к магнитному полю линии Fe I 630.25 нм, а наименьшую —  $V$ -профили слабой, мало чувствительной к магнитному полю линии Fe I 630.35 нм. Большинство  $V$ -профилей фотосферных линий на рассматриваемом участке активной области имеют обычную форму, состоят из двух долей. Обнаружены две области (MP1, MP2 на рис. 3), где  $V$ -профили чувствительных к магнитному полю линий Fe I 630.15 и 630.25 нм имеют необычную, сложную форму. Они состоят из трех-четырёх долей. В работах [12, 13] такое явление называется кроссовер-эффектом. Впервые этот эффект обнаружен в солнечных пятнах в работе [17]. Подобную форму имеют профили для участков Солнца, на которых есть смешанные полярности (mixed-polarity profiles) [38, 41]. Они представляют собой суперпозицию двух асимметричных  $V$ -профилей, относящихся к компонентам противоположной магнитной полярности в одном и том же элементе разрешения (пикселе). Параметр Стокса  $V$  мало чувствительных к магнитному полю линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм в области MP2 очень мал и колеблется в пределах ошибки наблюдений (0.0025). Области аномальных  $V$ -профилей фотосферных линий MP1 и MP2 отмечены на рисунке горизонтальными сплошными линиями. MP1 занимает на спектре верхнюю часть активного флоккула AP и нижнюю часть поры P1 (пиксели 111...118). Область аномальных профилей MP1 в течение наблюдений постепенно распространилась на соседние пиксели 109, 110 и 119, 120. Расположение MP2 в спектре соответствует нижней части спокойного флоккула QR (пиксели 82...87) и примерно совпадает с областью бомбы Эллермана EB-2.

На рис. 4 показаны некоторые  $V$ -профили чувствительных к магнитному полю сильных линий Fe I 630.15, 630.25 нм и мало чувствительных к магнитному полю слабых линий Fe I 630.35 нм, Ti I 630.38 нм для центральных частей пор P1, P2 и областей смешанной полярности MP1 и MP2 в первый момент наблюдений  $09^h30^m53^s$ . В середине пор  $V$ -профили всех рассматриваемых линий имеют нормальную форму, состоят из двух долей. Профили линий Fe I 630.15 и 630.25 нм в области MP1 имеют сложную, аномальную форму. Они состоят из четырех долей, а профили линий Fe I 630.35 нм, Ti I 630.38 нм содержат две доли.

Профили линий Fe I 630.15 и 630.25 нм в области MP2 имеют аномальную форму, подобную типичной форме  $Q$ - или  $U$ -профилей Стокса: две доли одинакового знака и центральную долю противоположного знака.  $V$ -профили фотосферных линий подобной формы наблюдались, например, в работах [18, 41]. Амплитуда профилей этих линий не превышает 0.015. В этом месте также ослаблены  $I$ -профили Стокса. Амплитуда  $V$ -профилей линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм не превышает ошибки наблюдений.

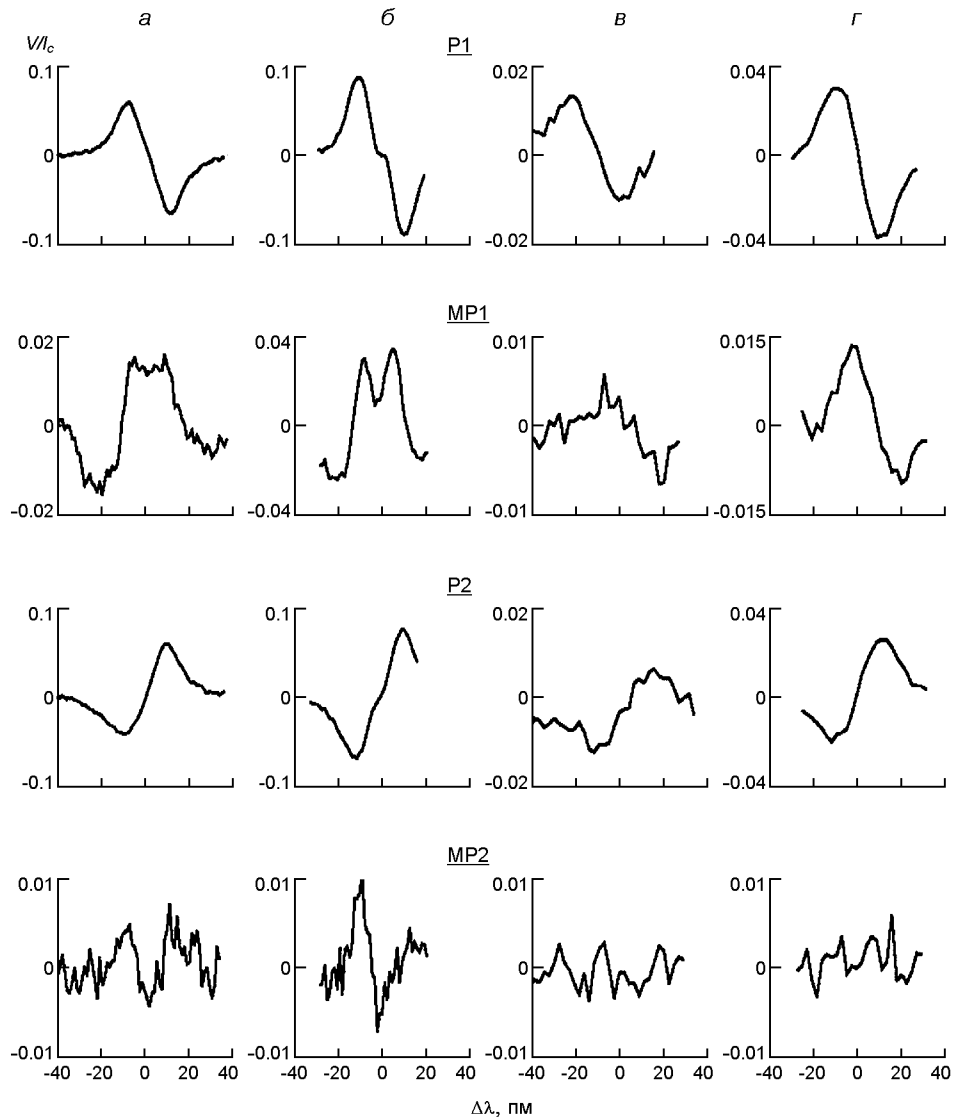


Рис. 4.  $V$ -профили линий Fe I 630.15 нм (а), Fe I 630.25 нм (б), Fe I 630.35 нм (в) и Ti I 630.38 нм (г) для середины поры P1, области MP1, середины поры P2 и области MP2 в  $09^h30^m53^s$  UT

### ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ $V$ -ПРОФИЛЕЙ СТОКСА ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ

Анализ  $V$ -профилей фотосферных линий показал, что они изменяются со временем. На рис. 5—7 показаны профили для разных особенностей активной области в разные моменты времени.

Амплитуда  $V$ -профилей фотосферных линий для пор изменялась со временем (рис. 5). На рис. 5а даны профили для середины поры P1. В первой половине периода наблюдений амплитуда профилей линии Fe I 630.25 нм в этом месте в среднем была равна 0.085, во второй половине — 0.075, а для линии Fe I 630.15 нм — 0.06 и 0.045 соотве-



тственно. Амплитуда профилей линии  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$  изменялась от 0.03 до 0.04. Изменения амплитуды профилей линии  $Fe\ I\ 630.35\ \text{нм}$  со временем были не более 0.005.

$V$ -профили линий для верхней половины области поры P1 на спектрах состоят из двух почти симметричных долей. На верхнем краю поры значения их амплитуды изменялись со временем: от 0.09 до 0.12 для линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$ , от 0.07 до 0.085 для линии  $Fe\ I\ 630.15\ \text{нм}$ , от 0.015 до 0.02 для линии  $Fe\ I\ 630.35\ \text{нм}$  и от 0.03 до 0.04 для линии  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$ . Интересно, что амплитуда профилей всех рассматриваемых линий уменьшается от верхнего к нижнему краю поры. Амплитуда профилей линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$  уменьшается примерно в два раза, а линии  $Fe\ I\ 630.15\ \text{нм}$  — в три раза.  $V$ -профили слабых линий  $Fe\ I\ 630.35\ \text{нм}$  и  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$  тоже сильно изменяются, их амплитуда уменьшается к нижнему краю поры.

Ниже середины области поры профили остаются двудольными, но в профиле линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$  появляется перемычка между долями. В нижних пикселях поры профили линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$  имеют четыре доли, остальные линии — две-три доли (верхняя часть области MP1). Их амплитуда в два-три раза меньше по сравнению с амплитудой профилей в верхней половине P1. Преобладает положительная полярность магнитного поля. Ниже поры преобладает отрицательная полярность магнитного поля. В середине области между порами, на нижнем краю MP1, в профиле линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$  снова появляется перемычка. Ближе к поре P2 профили приобретают обычную форму, амплитуда сильных линий увеличивается от пикселя к пикселю на 0.05...0.01. Полярность отрицательная, как у поры P2.

В области поры P2 все  $V$ -профили рассматриваемых линий состоят из двух долей. На всем протяжении наблюдений максимальная амплитуда профилей наблюдалась на нижнем, внешнем к P1 краю поры P2 (рис. 5б). В первые моменты наблюдений амплитуда профилей линии  $Fe\ I\ 630.15\ \text{нм}$  не превышала 0.09, линии  $Fe\ I\ 630.25\ \text{нм}$  — 0.11, линии  $Fe\ I\ 630.35\ \text{нм}$  — 0.02, а линии  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$  — 0.03. В начальном периоде наблюдений она оставалась почти постоянной. Начиная с  $09^h34^m\ \text{UT}$ , амплитуда профилей линий  $Fe\ I\ 630.15\ \text{нм}$  и  $630.25\ \text{нм}$  увеличивалась, и к  $09^h45^m$  увеличилась почти в два раза. Амплитуда профилей линий  $Fe\ I\ 630.35\ \text{нм}$  и  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$  изменялась не более чем на 0.01. Она уменьшилась к концу наблюдений. Профили линии  $Ti\ I\ 630.38\ \text{нм}$  в P2 имеют протяженное красное крыло. Следует отметить, что согласно [19] на всех фотосферных уровнях в области этой поры были восходящие движения, их скорость уменьшалась с высотой и увеличивалась со временем.

На рис. 6 даны  $V$ -профили фотосферных линий  $Fe\ I\ 630.15\ \text{нм}$  и  $630.25\ \text{нм}$  для области активного флоккула между порами, посередине области MP1 (пиксель 114), в разные моменты наблюдений. Это место находится в окрестности линии раздела полярностей магнитного поля. Профили линий имеют наименьшую амплитуду по сравнению с соседними профилями в MP1. В начале наблюдений они состоят из че-

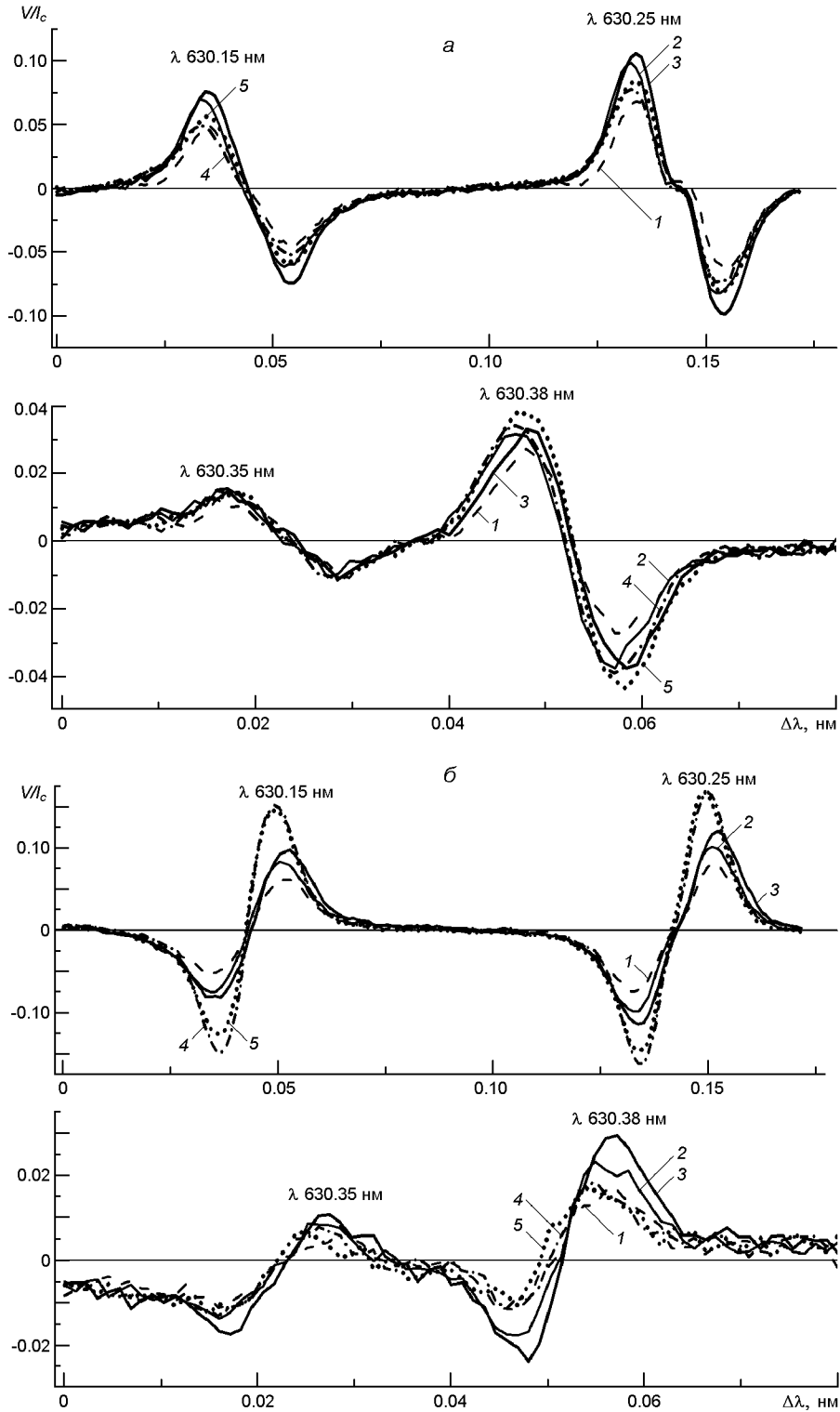


Рис. 5. Изменение со временем  $V$ -профилей Стокса фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм и Ti I 630.38 нм: а — для середины области поры P1, б — для нижнего края поры P2 (пиксель 100). Кривые 1—5 — соответственно для моментов  $09^h31^m35^s$ ,  $32^m37^s$ ,  $34^m03^s$ ,  $44^m42^s$ ,  $49^m48^s$  UT

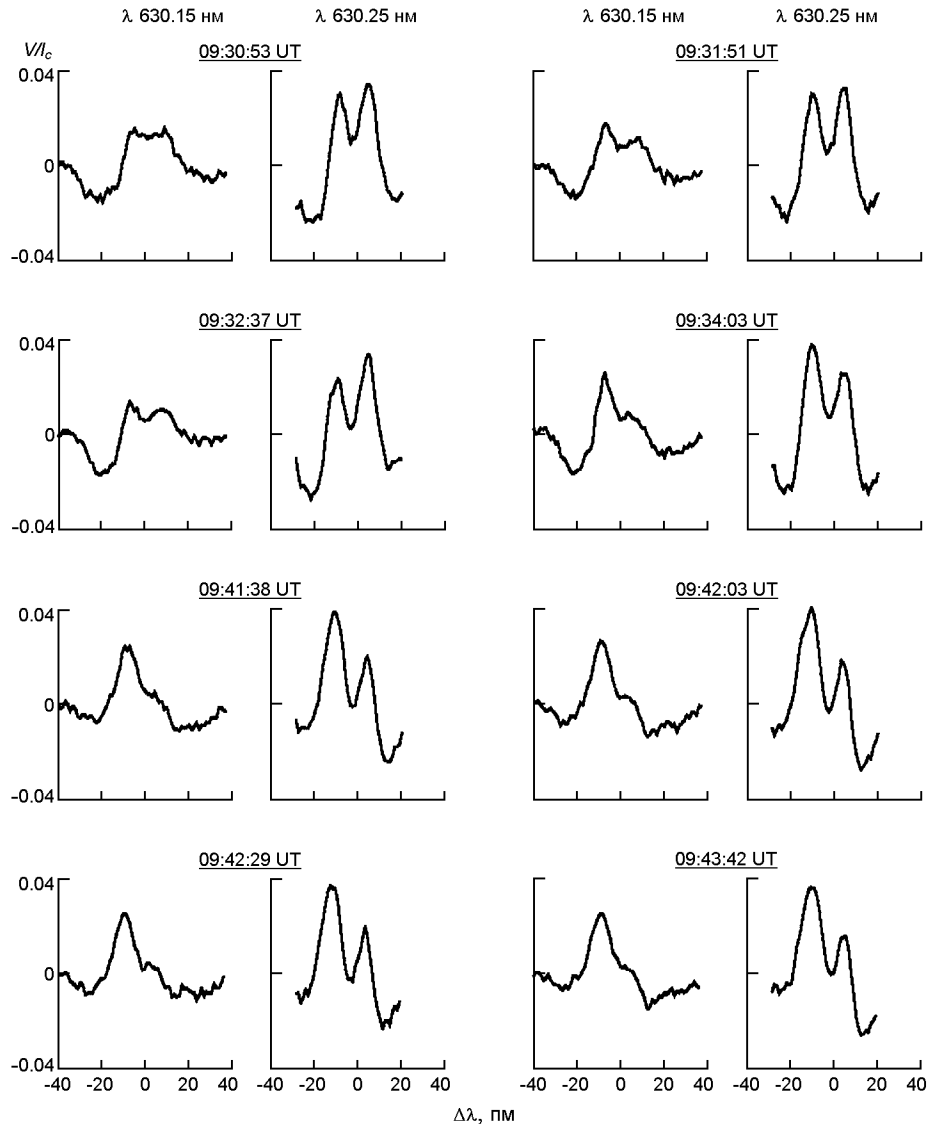


Рис. 6. То же для середины MP1 в области активного флоккула (пиксель 114)

тырех долей, что свидетельствует о наличии смешанных полярностей в рассматриваемом пикселе. Линия Fe I 630.25 нм имела четырехдольные  $V$ -профили на протяжении всего периода наблюдений. Профили линии Fe I 630.15 нм примерно с  $09^h38.5^m$  стали трехдольными, а с  $09^h45^m$  — двудольными. Амплитуда линии Fe I 630.25 нм больше во все моменты наблюдений. До  $09^h34^m$  преобладает отрицательная, а потом до конца наблюдений — положительная полярность магнитного поля (рис. 6). После смены преобладающей полярности магнитного поля возник хромосферный выброс.

В обе стороны разреза активной области от пикселя 114 в области MP1 амплитуда  $V$ -профилей всех рассматриваемых линий увеличивается. В первый момент наблюдений амплитуда профиля линии Fe I

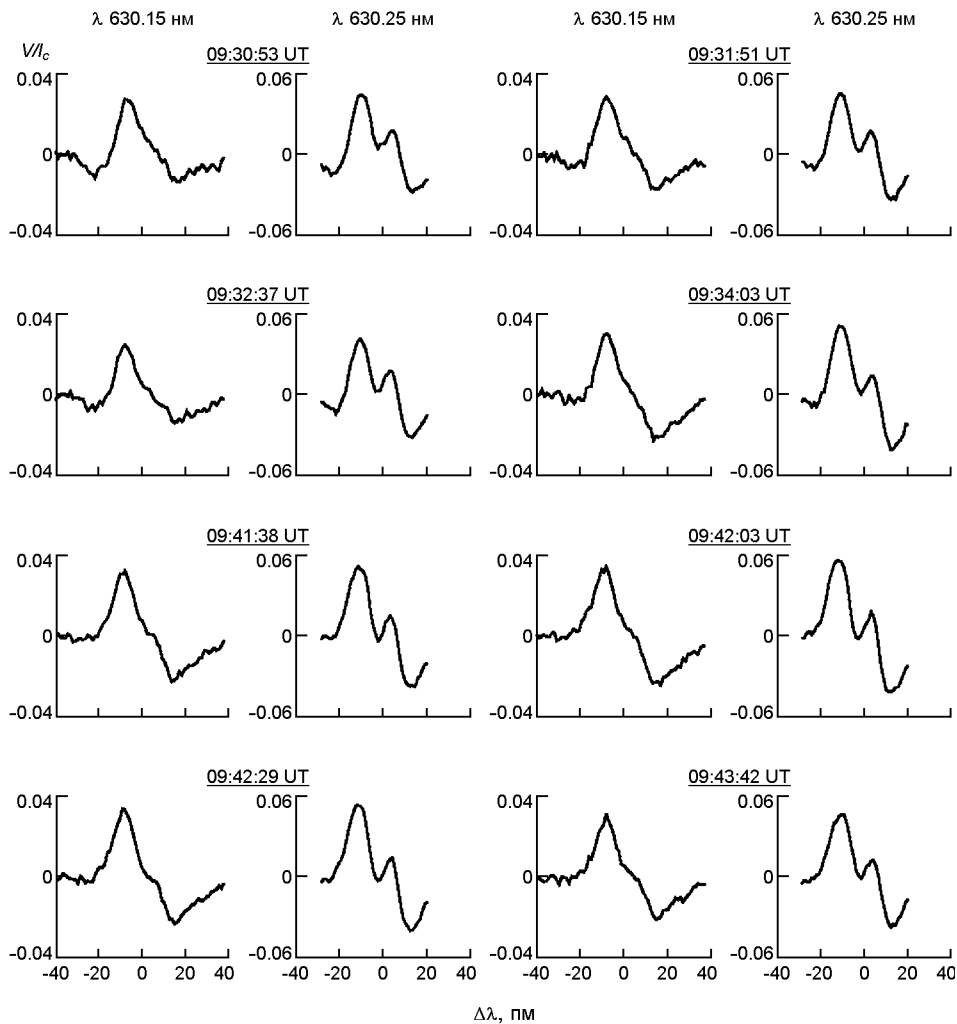


Рис. 7. То же для MP1 в области поры P1 (пиксель 116)

630.25 нм увеличивается в сторону поры P1 от 0.035 до 0.07 на верхнем краю области MP1, а линии Fe I 630.15 нм — от 0.015 до 0.05. Преобладает положительная полярность. С другой стороны от пикселя 114, в сторону поры P2, амплитуда профилей линий Fe I 630.25 и 630.15 нм увеличивается к нижнему краю MP1 примерно до тех же значений. Преобладает отрицательная полярность. Минимальная амплитуда сильных линий изменялась со временем не более чем на 0.01. Амплитуда на нижнем краю MP1 постепенно уменьшалась со временем, и во второй половине периода наблюдений уменьшилась в три раза. На верхнем краю ее изменения не превышали 0.01. Профили слабых линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм в области MP1 имеют амплитуду 0.003...0.005 и 0.012...0.02 соответственно. Изменения амплитуды профилей этих линий со временем на краях области MP1 не превышали 0.005.

На рис. 7 приведены  $V$ -профили фотосферных линий Fe I 630.15 и 630.25 нм для MP1 в области поры P1, для нижнего края P1, в разные моменты наблюдений. В этой области во всех пикселях преобладает положительная полярность. Профили линии Fe I 630.25 нм состоят из четырех долей, что свидетельствует о смешанных полярностях. Линия Fe I 630.15 нм до  $09^h34^m$  имеет профили, состоящие из трех долей с внешней долей в синем крыле, а позже обычные двудольные, показывающие положительную полярность. При переходе к центральной части поры доли профилей линии Fe I 630.25, относящиеся к компоненту с противоположной, отрицательной полярностью, становятся все меньше, остается лишь небольшая перемычка между двумя долями. В области спектра ниже поры P2 также наблюдались значительные изменения  $V$ -профилей фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25 нм от пикселя к пикселю и во времени. Особенностью этих профилей было значительное уширение красного крыла по сравнению с синим.  $V$ -профили мало чувствительных слабых линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм видны лишь вблизи поры. В этой области развивались три бомбы Эллермана и произошло несколько выбросов.

#### **$V$ -ПРОФИЛИ ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ БОМБ ЭЛЛЕРМАНА**

В период спектрополяриметрических наблюдений на телескопе THEMIS в изучаемой области зарегистрированы три бомбы Эллермана, которые находились на разных стадиях развития. Бомбы Эллермана — кратковременные интенсивные поярчения, обычно наблюдаемые в крыльях хромосферных линий. Бомбы Эллермана имеют малый размер и возникают обычно вблизи пятен. В спектрах, полученных на телескопе THEMIS, в местах бомб Эллермана видны яркие полосы в крыльях линии H и увеличение интенсивности ядер фотосферных линий. Профили линии H имеют избыточную эмиссию в крыльях, что является основным спектральным признаком бомб Эллермана.

Как отмечалось, одна из бомб Эллермана (ЕВ-3) с яркой эмиссией в синем крыле (рис. 2, ЕВ-3) была видна на H -спектрах ниже поры P2 с самого начала наблюдений до  $09^h32^m18^s$ . Она прилежала к растущей поре P2 (рис. 2) и имела такую же магнитную полярность.  $V$ -профили фотосферных линий для нее обычные, двудольные. Интересно, что их амплитуда увеличивается по мере приближения к поре. Амплитуда  $V$ -профилей фотосферных линий максимальна на границе бомбы Эллермана ЕВ-3 и поры P2. В начале наблюдений для линии Fe I 630.25 нм она была равна 0.11, а в конце всего периода наблюдений 0.17. На противоположной, нижней границе ЕВ-3 амплитуда профиля этой линии изменялась со временем от 0.025 до 0.04. Амплитуда красного (длинноволнового) крыла профилей линии Fe I 630.25 нм изменяется от 0.02 до 0.11 на границе с порой, профилей линии Ti I 630.38 нм от 0 до 0.025. Менее резко увеличивается и амплитуда профилей линий в поре по мере приближения к ЕВ-3. Амплитуда красно-

го крыла профилей линий Fe I 630.25 нм изменяется от 0.075 до 0.11, Fe I 630.15 нм — от 0.06 до 0.085, профилей линии Ti I 630.38 нм — от 0.02 до 0.028 на границе с EB-3. Амплитуда синего крыла профилей всех линий меньше. Такое поведение амплитуды  $V$ -профилей линий может свидетельствовать о том, что напряженность фотосферного магнитного поля увеличивается к границе поры и EB-3, и на границе становится максимальной. Интересно также, что профиль линии титана имеет очень широкое красное крыло как в P2, так и в прилегающей к ней верхней части EB-3.

Бомбы Эллермана EB-1 и EB-2 видны на рис. 2 в нижней части H-спектра. Параметр Стокса  $V$  линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм не выделяется.  $V$ -профили линий Fe I 630.15, 630.25 нм для бомбы Эллермана EB-1 имеют обычный вид, полярность магнитного поля в ней отрицательная. Максимальная амплитуда  $V$ -профилей линий Fe I 630.15 и 630.25 нм в области EB-1 изменялась в течение наблюдений от 0.03 до 0.05. Она наблюдалась примерно в месте максимальной интенсивности ядер этих линий.

Бомба Эллермана EB-2 появилась в маленькой области MP2 (рис. 3). Параметр Стокса  $V$  линий Fe I 630.15, 630.25 нм в этой области значительно меньше, чем на соседних участках разреза активной области.  $V$ -профили этих сильных, чувствительных к магнитному полю фотосферных линий, в начале наблюдений имеют три доли, что свидетельствует о смешанных полярностях магнитного поля в каждом пикселе MP2. Рис. 8 показывает очень сильные изменения амплитуды и формы этих линий со временем. В первые моменты наблюдений в области MP2 преобладала отрицательная полярность. Впоследствии в этой области стала преобладать положительная полярность, и постепенно произошла смена полярности. В  $09^h34^m$  изменился знак полярности. В центре области полярность стала положительной, профили двудольными, а аномальные профили с тремя долями наблюдались лишь на ее краях. Подобные изменения могут свидетельствовать о том, что в области MP2 выходил новый маломасштабный магнитный поток положительной полярности. Возможно, вследствие выхода нового потока и магнитных пересоединений с магнитным полем активной области в дальнейшем в этой области возникли эрупции — бомба Эллермана EB-2 и хромосферные выбросы. EB-2 появилась примерно в  $09^h40^m$ . Один из выбросов возник в  $09^h44^m42^s$  и виден в спектре линии H непосредственно в области EB-2, а второй появился в  $09^h48^m20^s$  над этой областью.

Интересной особенностью EB-2 является также то, что в пикселях с максимальной интенсивностью ядер линий Fe I 630.15 и 630.25 нм профили имеют дополнительный компонент в красном крыле. Подобные профили были обнаружены в полутени пятна на участках с нисходящими потоками менее 0.5 в работе [15]. О наблюдениях на HINODE SP подобных профилей этих же линий сообщается и в работе [26]. Они относятся к области яркой точки, где зарегистрированы сильные нисходящие потоки со скоростью 4 км/с, и связаны с вихревыми движениями. Асимметрию профилей авторы объясняют очень

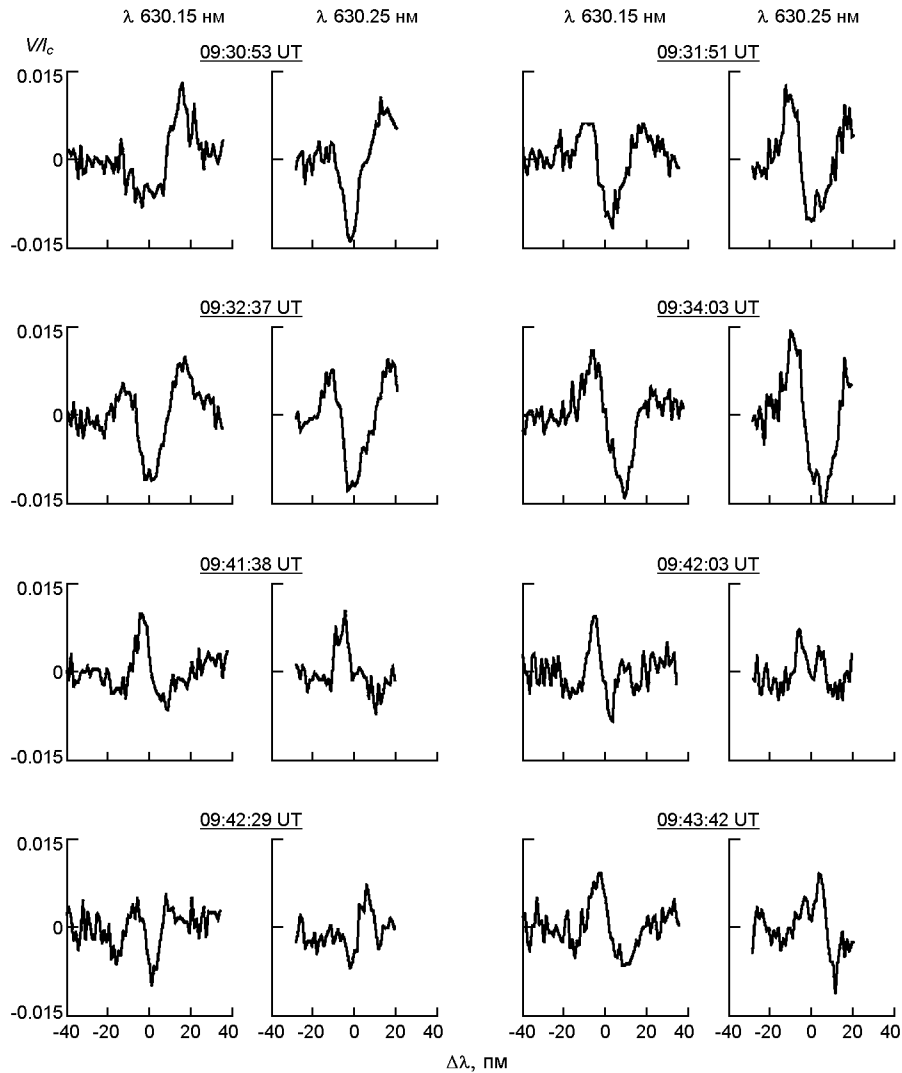


Рис. 8. То же для MP2

большими градиентами скорости или магнитного поля и возможным событием конвективного коллапса.

На рис. 9 показано изменение амплитуды  $V$ -профилей линий Fe I 630.15 и 630.25 нм в процессе развития бомб Эллермана EB-1 и EB-2. Видно, что амплитуда в EB-1 больше, чем в EB-2. Профили асимметричные, амплитуда отрицательной доли больше. Амплитуда профилей для EB-1 испытывает сильные колебания в начале наблюдений. После  $09^h 40^m$  она постепенно уменьшается. В EB-2 после этого момента, когда она появилась на H-спектрах, происходило увеличение амплитуды и ее колебаний. Профили в целом были симметричными. Сопоставление временных изменений амплитуды  $V$ -профилей линий Fe I 630.15 и 630.25 нм с изменениями интенсивности их ядер и лучевой скорости показывает их корреляцию [20]. Возможно, наличие пиков в этих кривых подтверждает импульсный характер выделения энергии.

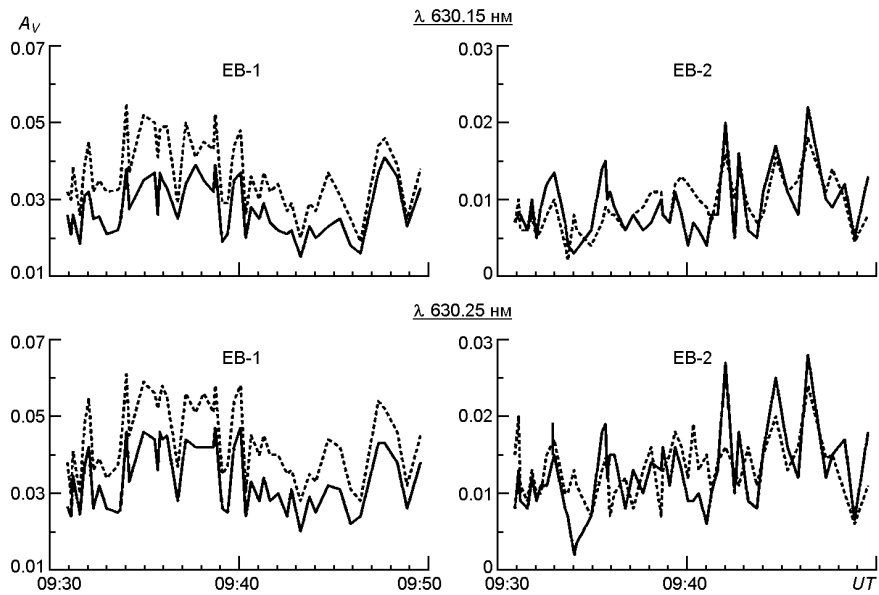


Рис. 9. Изменение со временем амплитуды  $A_V$   $V$ -профилей линий Fe I 630.15 и 630.25 нм для центральных частей бомб Эллермана EB-1 и EB-2. Амплитуды положительной и отрицательной долей профилей линий показаны сплошной и штриховой линиями соответственно

## ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты анализа временных изменений  $V$ -профилей фотосферных линий, полученных при спектрополяризметрических наблюдениях активной области NOAA 11024 с помощью франко-итальянского телескопа THEMIS. Возможно, наиболее интересный результат работы — выявление аномальных  $V$ -профилей фотосферных линий в двух местах (MP1 и MP2) рассматриваемого разреза активной области NOAA 11024. Аномальные  $V$ -профили появляются в спектрах при сложной структуре магнитного поля и поля скоростей фотосферы. Они наблюдаются во флоккулах, пятнах, порах и их окрестностях, вспышках, подножиях петель, на линии раздела полярностей магнитного поля и в спокойных участках Солнца, например [8, 9, 16, 21, 32, 41, 48]. Они могут содержать одну, три, четыре доли в одном и том же пикселе в отличие от обычных профилей, состоящих из двух долей противоположного знака. Профили такой формы могут быть вызваны неразрешенной смесью полярностей и могут являться суперпозицией асимметричных профилей, относящихся к компонентам разной полярности.

Полученные на телескопе THEMIS в области MP1 аномальные  $V$ -профили фотосферных линий имеют три-четыре доли и сильно изменяются от пикселя к пикселю и со временем. Область MP1 на спектрах охватывает область активного флоккула AP и нижнюю область поры P1 между порами P1 и P2. В области активного флоккула в начале наблюдений преобладал компонент с отрицательной полярностью магнитного поля, а примерно с  $09^h34^m$  — компонент с положительной



полярностью. По-видимому, в этой области выходил новый мелко-масштабный магнитный поток положительной полярности, который постепенно охватывал этот участок активной области и вызвал начало магнитных пересоединений. Вскоре в результате магнитных пересоединений в этой области возник хромосферный выброс. Аномальные  $V$ -профили наблюдались между пятнами вблизи нейтральной линии магнитного поля в работах [4, 21, 34, 42]. В работе [21] аномальные  $V$ -профили наблюдались на спутнике “Hinode” с пространственным разрешением 0.3 вдоль линии раздела полярностей магнитного поля в области аннулирования магнитного потока. В работе сделан вывод, что аномальные  $V$ -профили не являются показателями процесса удаления потока, а являются результатом либо смеси неразрешенных магнитных элементов противоположной полярности, либо неразрешенной ширины линии раздела полярностей. В работе [4] всесторонне изучается активная область 13 мая 1993 г. со сложной магнитной структурой. Аномальные  $V$ -профили фотосферных линий наблюдались между порами разной полярности. Авторы интерпретируют их с помощью двухкомпонентной модели с разными полярностями магнитного поля в компонентах.

В нижней области поры P1 также наблюдались аномальные  $V$ -профили фотосферных линий. О наблюдениях аномальных  $V$ -профилей фотосферных линий в полутени пятен и около пор сообщается, например, в работах [9, 10, 12, 34—36, 40]. В большинстве работ они объясняются наличием противоположных полярностей. В работе [40] аномальные  $V$ -профили линий Fe I 630.15 и 630.25 нм в окрестности пятен и около внешней границы пор наблюдались на телескопе SOT (Solar Optical Telescope) на спутнике “Hinode”. Установлена их связь с высокоскоростными нисходящими фотосферными потоками. На основе анализа наблюдаемых на спутнике “Hinode”  $V$ -профилей фотосферных линий, состоящих из трех долей, в работах [9, 10] получен вывод о наличии во внешней и средней полутени пятен магнитных полей противоположных полярностей, связанных с сильными нисходящими движениями в нижней фотосфере.

В области MP2 в большинстве случаев аномальные  $V$ -профили линии Fe I 630.15 и 630.25 нм имеют две доли одинакового знака и центральную долю противоположного знака. О наблюдениях подобных профилей в окрестности маленькой поры перед микровспышкой сообщается в работе [18]. Сценарий изменений этих профилей со временем примерно одинаков с полученными данными настоящей работы. В данной работе аномальные профили сначала наблюдались в четырех пикселях, затем их область увеличивалась. Со временем в середине этой области появились двудольные профили, изменилась полярность магнитного поля. На краях области профили оставались аномальными с тремя долями. Такие изменения могут свидетельствовать о выходе нового маломасштабного магнитного потока противоположной полярности. Возможно, вследствие выхода нового магнитного потока и магнитных пересоединений с магнитным полем активной области в дальнейшем в этой области возникли эрупции: бомба Эллермана EB-2

и хромосферные выбросы. По-видимому, процесс развития EB-2 начался с выхода нового маломасштабного магнитного потока, и в нем участвовали все слои нижней атмосферы Солнца. Возможно, после выхода нового магнитного потока в области EB-2 и последующего магнитного пересоединения возбуждение от EB-1 распространилось по образовавшейся петле и вызвало появление EB-2. Вывод о физической связи EB-1 и EB-2 сделан в работах [29, 30] на основе изучения интенсивностей хромосферной линии H и фотосферных линий. Симпатическим эруптивным явлениям посвящено много работ, например [14], но до сих пор не имеется ясного представления об их механизме.

Сравнение изображений, полученных в крыле H, с магнитными картами в работе [5] показывает, что большинство бомб Эллермана возникают на границах магнитных особенностей и лишь немногие связаны с малыми магнитными элементами. В работе [11] найдено, что они могут возникать на сепаратрисе или квазисепаратрисе в нижней хромосфере. В работе [47] обнаружено, что они могут происходить в местах аннулирования магнитного потока между маленькими биполярными пятнышками.

Из анализа топологии магнитного поля на магнитограммах в работе [22] выявлено, что бомбы Эллермана появились в области с паразитными магнитными элементами, со смешанными полярностями. Они были связаны с силовыми линиями, ассоциирующимися с особыми участками bald patches [27] вблизи движущихся магнитных диполей. Бомбы Эллермана, изученные в работе [3], также располагались на участках с магнитными полями смешанной полярности. В исследовании [49] наблюдалось множество бомб Эллермана в области выходящих магнитных потоков с использованием изображений в крыльях линии H и магнитограмм, полученных с помощью векторного магнитографа. Согласно работам [1, 27, 49] бомбы Эллермана происходят в течение выхода змеевидного магнитного потока при подъеме волнообразных силовых трубок. При наблюдениях на солнечном лимбе обнаружена непосредственная связь бомб Эллермана с выходом мелко-масштабной петли [24].

В качестве триггерного механизма бомб Эллермана в большинстве работ рассматривается магнитное пересоединение, например, [1, 11, 22, 23, 25, 27, 33, 47, 49, 50]. В работе [50] найдено, что бомбы Эллермана возникают вдоль магнитной сетки и предполагается, что в основе механизма бомб лежит магнитное пересоединение выходящего магнитного потока с предсуществующими сильными вертикальными полями сетки. В работе [23] наблюдались противоположно направленные потоки в хромосфере и фотосфере, что может быть свидетельством магнитного пересоединения и свидетельством возникновения бомбы Эллермана в верхней фотосфере. Результаты численного двумерного МГД-моделирования показали, что механизм магнитного пересоединения может объяснить избыток температуры и время жизни бомб Эллермана [22].

В данной работе получены доказательства выхода в двух местах активной области новых мелко-масштабных магнитных потоков про-

тивоположной полярности, после которых появились разного рода эрупции, вызванные магнитными пересоединениями. Появление в спектрах аномальных  $V$ -профилей фотосферных линий может свидетельствовать об изменениях структуры магнитного поля и предстоящих эрупциях, что можно использовать для прогностических целей.

## ВЫВОДЫ

В данной работе на основе спектрополяриметрических наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS проанализированы  $V$ -профили фотосферных линий на участке активной области NOAA 11024. Рассмотрены временные изменения профилей в порах, флоккулах, бомбах Эллермана. Выявлено увеличение амплитуды  $V$ -профилей фотосферных линий к внешним краям пор противоположной полярности. Максимальная амплитуда наблюдается на границе между развивающейся порой и бомбой Эллермана EB-3. Она быстро увеличивалась со временем.

Выявлены две мелкомасштабные области с аномальными  $V$ -профилями фотосферных линий. Анализ временных изменений профилей показал, что в этих местах происходила смена полярности магнитного поля, выходили новые мелкомасштабные магнитные потоки противоположной полярности. Их выход мог привести к началу магнитных пересоединений и возникновению эрупций, в том числе бомбы Эллермана и хромосферных выбросов.

Авторы благодарят Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за помощь с спектрополяриметрическими наблюдениями и Р. И. Костыка за предоставленные программы обработки данных.

1. Archontis V., Hood A. W. Formation of Ellerman bombs due to 3D flux emergence. *Astron. and Astrophys.* 2009. 508. P. 1469—1483.
2. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets. *Phys. Sci. Res. Papers.* 1969. N 371. 193 p.
3. Bello González N., Danilovic S., Kneer F. On the structure and dynamics of Ellerman bombs. Detailed study of three events and modelling of H $\alpha$ . *Astron. and Astrophys.* 2013. 557. id.A102. 16 p.
4. Bernasconi P. N., Keller C. U., Solanki S. K., Stenflo J. O. Complex magnetic fields in an active region. *Astron. and Astrophys.* 1998. 329. P. 704—720.
5. Dara H. C., Alissandrakis C. E., Zachariadis T. G., Georgakilas A. A. Magnetic and velocity field in association with Ellerman bombs. *Astron. and Astrophys.* 1997. 322. P. 653—658.
6. Delbouille L., Roland G., Neven L. Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. Liege: Institut d'Astrophysique. 1973.
7. Engell A. J., Siarkowski M., Gryciuk M., et al. Flares and their underlying magnetic complexity. *Astrophys. J.* 2011. 726. N 1. article id. 12. 8 p.
8. Fischer C. E., Keller C. U., Snik F., et al. Unusual Stokes V profiles during flaring activity of a delta sunspot. *Astron. and Astrophys.* 2012. 547. id. A34. 12 p.
9. Franz M., Collados M., Bethge C., et al. Magnetic fields of opposite polarity in sunspot penumbrae. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. id. A4. 13 p.
10. Franz M., Schlichenmaier R. The velocity field of sunspot penumbrae. II. Return flow and magnetic fields of opposite polarity. *Astron. and Astrophys.* 2013. 550. id. A97.

11. Georgoulis M. K., Rust D. M., Bernasconi P. N., Schmieder B. Statistics, morphology, and energetics of Ellerman bombs. *Astrophys J.* 2002. 575. N 1. P. 506—528.
12. Golovko A. A. The crossover effect in sunspots and the fine structure of penumbra. *Solar Phys.* 1974. 37. N 1. P. 113—125.
13. Grigorjev V. M., Katz J. M. The crossover and magneto-optical effects in sunspot spectra. *Solar Phys.* 1972. 22. N 1. P. 119—128.
14. Joshi N. C., Schmieder B., Magara T., et al. Chain reconnections observed in sympathetic eruptions. *Astrophys. J.* 2016. 820:126. article id. 126. 20 p.
15. Katsukawa Y., Jurčák J. A new type of small-scale downflow patches in sunspot penumbrae. *Astron. and Astrophys.* 2010. 524. id. A20. 9 p.
16. Khomenko E. V., Collados M., Solanki S. K., et al. Quiet-Sun inter-network magnetic fields observed in the infrared. *Astron. and Astrophys.* 2003. 408. N 2. P. 1115—1135.
17. Kjeldseth-Moe O. On the magnetic-field configuration in sunspots / Structure and development of solar active region. (*Symposium IAU N 35* held in Budapest, Hungary, 4—8 September 1967) / Ed. Karl Otto Kiepenheuer. Dordrecht, D. Reidel. 1968. P. 202.
18. Kondrashova N. N. Abnormal Stokes profiles of the photospheric lines in the region of chromospheric dual flows in the surroundings of a solar pore. I. Observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2018. 34. N 2. P. 53—67.
19. 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.
20. Kondrashova N. N. Pasechnik M. N., Leiko U. M. Manifestation of a new magnetic flux emergence in the active region NOAA 11024. *Fourth UK-Ukraine-Spain Meeting on Solar Phys. and Space Sci.*, 28.08-01.09 2017. Kyiv, Ukraine. Book of abstracts. P. 62.
21. Kubo M., Chye Low B., Lites B. W. Unresolved mixed polarity magnetic fields at flux cancellation site in solar photosphere at 0.3 spatial resolution. *Astrophys. J. Lett.* 2014. 793. N 1. article id. L9. 5 p.
22. Li Z., Fang C., Guo Y., et al. Diagnostics of Ellerman bombs with high-resolution spectral data. *Res. Astron. Astrophys.* 2015. 15. N 9. article id. 1513.
23. Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al. Height dependence of gas flows in an Ellerman bomb. *Publs Astron. Soc. Jap.* 2008. 60. N 1. P. 95—102.
24. Nelson C. J., Scullion E. M., Doyle J. G., et al. Small-scale structuring of Ellerman bombs at the solar limb. *Astrophys. J.* 2015. 798. N 1. article id. 19. 9 p.
25. 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.
26. Palacios J., Balmaceda L. A., Vargas Domínguez S., et al. Observations of vortex motion in the solar photosphere using Hinode-SP data Hinode-3 / *The 3rd Hinode Science Meeting ASP Conference Series.* 454 / Eds T. Sekii, T. Watanabe, and T. Sakurai. Astronomical Society of the Pacific. 2012. P. 51—54.
27. Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al. Resistive emergence of undulatory flux tubes. *Astrophys. J.* 2004. 614. N 2. P. 1099—1112.
28. Pasechnik M. N. Plasma motions in the solar loop of emerging magnetic flux. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2014. 30. N 4. P. 161—172.
29. Pasechnik M. N. Spectral study of a pair of Ellerman bombs. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2016. 32. N 3. P. 55—69.
30. Pasechnik M. N. Spectral study of Ellerman bombs. Photosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2018. 34. N 2. P. 68—81.
31. Pierce A. K., Breckinridge J. B. The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths. Kitt Peak National Observatory. 1972. Contribution N 559.
32. Ruedi I., Solanki S. K., Livingston W., Stenflo J. O. Infrared lines as probes of solar magnetic features. III. Strong and weak magnetic fields in plages. *Astron. and Astrophys.* 1992. 263. N 1/2. P. 323—338.

33. 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.
34. Sanchez Almeida J., Lites B. W. Observation and interpretation of the asymmetric Stokes Q, U, and V line profiles in sunspots. *Astrophys. J.* 1992. 398. N 1. P. 359—374.
35. Sankarasubramanian K., Rimmele T. Bisector analysis of Stokes profiles: effects due to gradients in the physical parameters. *Astrophys. J.* 2002. 576. N 2. P. 1048—1063.
36. Scharmer G. B., de la Cruz Rodriguez J., Sutterlin P., Henriques V. M. J. Opposite polarity field with convective downflow and its relation to magnetic spines in a sunspot penumbra. *Astron. and Astrophys.* 2013. 553. id. A63. 15 p.
37. 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.
38. Schlichenmaier R., Collados M. Spectropolarimetry in a sunspot penumbra. Spatial dependence of Stokes asymmetries in Fe I 1564.8 nm. *Astron. and Astrophys.* 2002. 381. P. 668—682.
39. Schlichenmaier R., Rezaei R., Gonzalez N. B. On the formation of penumbrae as observed with the German VTT SOHO/MDI, and SDO/HMI. / 4th Hinode Science Meeting: Unsolved Problems and Recent Insights, ASP Conference series, 455. (*Proceedings of a conference held 11-15 October 2010 in Palermo, Italy*) / Eds L. R. Bellot Rubio., F. Reale, M. Carlsson. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2012. P. 61.
40. Shimizu T., Lites B. W., Katsukawa Y. et al. Frequent occurrence of high-speed local mass downflows on the solar surface. *Astrophys. J.* 2008. 680. N 2. P. 1467—1476.
41. Sigwarth M. Properties and origin of asymmetric and unusual Stokes V profiles observed in solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 2001. 563. N 2. P. 1031—1044.
42. Skumanich A., Lites B. Velocity gradients across a flaring neutral line from Stokes II measurements / Solar Polarimetry (*Proceedings of the 11th Sacramento Peak Summer Work shop*) / Ed. L. J. November. Sunspot, NM: National Solar Observatory. 1991. P. 307—317.
43. Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., et al. Physical characteristics of AR 11024 plasma based on SPHINX and XRT Data. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 2011. 35. N 1. P. 171—180.
44. Valori G., Green L. M., Démoulin 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.
45. Vargas Domínguez S., van Driel-Gesztelyi L., Bellot Rubio L. R. Granular-scale elementary flux emergence episodes in a solar active region. *Solar Phys.* 2012. 278. N 1. P. 99—120.
46. Vargas Domínguez S., Palacios J., Balmaceda L., et al. Evolution of small-scale magnetic elements in the vicinity of granular-sized swirl convective motions. *Solar Phys.* 2015. 290. N 2. P. 301—319.
47. Vissers G. J. M., Rouppe van der Voort L. H. M., Rutten R. J. Ellerman bomb at high resolution. II. Triggering, visibility and effect on upper atmosphere. *Astrophys. J.* 2013. 774. N 1. article id. 32. 14 p.
48. Viticchie B., Sanchez Almeida J. Asymmetries of the Stokes V profiles observed by HINODE SOT/SP in the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2011. 530. id. A14. 10 p.
49. 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.
50. 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.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2018

Після доробки 24.11.2018

Прийнята до друку 06.12.2018

*Н. М. Кондрашова, У. М. Лейко*

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
Київ, Україна

#### МАЛОМАСШТАБНІ МАГНІТНІ ОСОБЛИВОСТІ В АКТИВНІЙ ОБЛАСТІ NOAA 11024

З метою виявлення та вивчення магнітних особливостей в активній області NOAA 11024 проаналізовано часові зміни  $V$ -профілів фотосферних ліній Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм і Ti I 630.38 нм. Для дослідження використано дані спектрополяриметричних спостережень з високим часовим та просторовим розділенням на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) 4 липня 2009 р. Ділянка активної області містить дві пори різної полярності та два флокули. Одна з пор швидко розвивалася. Протягом двадцяти хвилин спостережень на ділянці відбувалися еруптивні процеси: хромосферні викиди та бомби Еллермана.  $V$ -профілі сильно відрізняються в різних місцях активної області. У більшості випадків вони звичайні. У порах їхня амплітуда збільшується до зовнішніх країв пор. Максимальна амплітуда відмічається у  $V$ -профілів фотосферних ліній на межі пори, що розвивалася, та бомби Еллермана. Амплітуда швидко збільшувалась з часом. Виявлено дві маленькі ділянки активної області, де  $V$ -профілі ліній Fe I 630.15 та 630.25 нм мають аномальну форму. Амплітуда профілів у цих місцях зменшена. Амплітуда і форма профілів швидко змінювались з часом. Одна з ділянок розташована між порами, а друга — в області флокула. У ділянках відбулася зміна полярності магнітного поля. Отримано докази виходу нових маломасштабних магнітних потоків протилежної полярності, що призвело до магнітних перез'єднань та виникнення бомби Еллермана і хромосферних викидів. Знайдено сильні коливання амплітуди  $V$ -профілів ліній Fe I 630.15, 630.25 нм під час бомб Еллермана, що може свідчити про імпульсний характер виділення енергії.

**Ключові слова:** Сонце, фотосфера, активні області, пори, бомби Еллермана, магнітні поля, спектрополяриметрія.

*N. N. Kondrashova, U. M. Leiko*

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine

#### SMALL-SCALE MAGNETIC FEATURES IN ACTIVE REGION NOAA 11024

We analyzed spectropolarimetric data obtained for an active region NOAA 11024 with the French-Italian telescope THEMIS on Tenerife (Canary Islands) on 4 July 2009, consisting of the Stokes  $V$  measurements of the photospheric lines Fe I 630.15 nm, Fe I 630.25 nm, Fe I 630.35 nm, and Ti I 630.38 nm. The region studied includes two pores of opposite polarity and two plages. One of pores was developing during observation. Eruptive events, such as chromospheric surges, Ellerman bombs were observed in this area. The Stokes  $V$  profiles of the photospheric lines vary greatly in different places in the active region. In most cases, they are normal. In pores, their amplitude increases to the outer edges of the pores. The maximal amplitude is noted for the profiles at the boundary between the emerging pore and the Ellerman bomb. It rapidly increased with time. From the analysis of the observed profiles, we have evidence for the presence of two small-scale patches with anomalous Stokes  $V$  profiles of the photospheric lines Fe I 630.15 nm and Fe I 630.25 nm in the region studied. The amplitude of the profiles in these places reduced. The amplitude and shape of the profiles changed with time. One of the patches was located between the pores, the other one in the plage area. In these patches the polarity of the photospheric magnetic field changed during the observations. Evidence of new small-scale magnetic fluxes of opposite polarity emergence is obtained. This led to the beginning of magnetic reconnections and the appearance of chromospheric surges and the Ellerman bomb. Strong oscillations of the amplitude of the Stokes  $V$  profiles of the photospheric lines Fe I 630.15 nm and Fe I 630.25 nm were found during the Ellerman bombs, which may indicate a pulsed character of energy release.

**Keywords:** Sun, photosphere, active regions, pores, Ellerman bombs, magnetic fields, spectropolarimetry.