

УДК 523.985.3

Н. Н. Кондрашова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
kondr@mao.kiev.ua

Аномальные профили Стокса фотосферных линий в области двойственных хромосферных потоков в окрестности солнечной поры. I. Наблюдения

На основе данных спектрополяриметрических наблюдений активной области NOAA 11024 на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания) выполнен анализ профилей Стокса фотосферных линий Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм для окрестности маленькой солнечной поры в области появления двойственных хромосферных потоков. Рассмотрено изменение со временем параметров Стокса I, Q, U, и V для каждого пикселя. Установлено, что двойственные хромосферные потоки появились в области аномальных профилей Стокса фотосферных линий. Большинство профилей Q, U, и V имеют сложную форму. Они сильно различаются в разных пикселях, что свидетельствует о крайне неоднородной структуре магнитного поля в изучаемой области. Амплитуда и форма профилей быстро изменялись со временем. Во время наблюдений произошла смена полярности фотосферного магнитного поля в области хромосферной яркой точки. Получены доказательства того, что на рассматриваемом участке активной области происходил выход нового мелкомасштабного магнитного потока противоположной полярности, что могло привести к началу магнитных пересоединений, появлению двойственных хромосферных потоков и возникновению микровспышки.
Ключевые слова: Солнце, фотосфера, активные области, магнитные поля, спектрополяриметрия.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде исследований обнаружено, что иногда профили некоторых линий, образующихся в хромосфере и переходной области между коро-

ной и хромосферой, имеют два компонента, что свидетельствует о наличии двух разнонаправленных потоков [2, 4, 6, 22, 30, 44]. В работе [6] введено понятие двойственных потоков (dual flows) в случае, когда в одном и том же элементе разрешения имеются два компонента профиля линии. Двойственные потоки наблюдаются в пятнах, порах и их окрестностях [6, 22], во вспышках [41], флоккулах [44], в активных волокнах [42], в подножиях аркад петель [16]. В работе [2] сообщается о неоднократных наблюдениях таких потоков в верхней хромосфере активных и невозмущенных областей. Размер области, занятой такими потоками, составляет несколько угловых секунд. Они живут на протяжении нескольких минут. Для объяснения двойственных потоков обычно рассматриваются модели сифонного потока, модель конвективного коллапса и другие механизмы [7, 10, 26, 31], однако природа этого явления остается еще неизвестной.

В работах [1, 27, 28] на основе данных спектрополяриметрических наблюдений в линии $H\alpha$ на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS выявлены двойственные хромосферные потоки в области маленькой поры и ее окрестности в активной области NOAA 11024. В области размером примерно 2 Мм в течение некоторого времени наблюдались два разнонаправленных потока в одних и тех же элементах разрешения. Эти потоки появились в области яркой точки, где наблюдалась эмиссия в длинноволновом крыле линии $H\alpha$. Они наблюдались в этой области около минуты. Область двойственных потоков расширялась и сдвигалась в сторону поры. Скорость потоков достигала ± 25 км/с. Через 12 мин после появления двойственных потоков вблизи этого участка возникла микровспышка [23].

В работе [28] сделано предположение о выходе нового магнитного потока из-под фотосферных слоев в области двойственных потоков. Изучение состояния фотосферы и особенностей изменения магнитного поля может прояснить условия их появления. С этой целью в настоящей работе выполнен анализ профилей Стокса I , Q , U , V фотосферных линий, а в дальнейшем будут приведены результаты моделирования фотосферы.

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. В области происходил выход магнитного поля на больших и малых масштабах. В работе [53] отмечено, что выход потока на малых масштабах имел змеевидную форму. Процесс змеевидного выхода магнитного потока в этой активной области изучен в работе [54]. Вспышки и основные механизмы их возникновения исследованы в работе [11]. В день наблюдений на солнечном горизонтальном телескопе THEMIS [29],

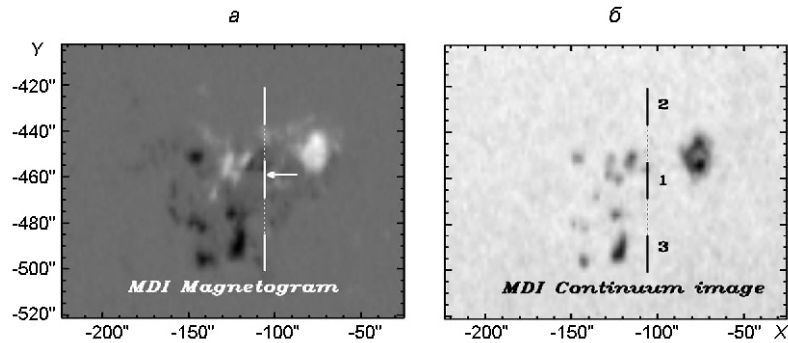


Рис. 1. Магнитограмма (слева) и изображение активной области NOAA 11024 в континууме (справа), полученные на SOHO/MDI 4 июля 2009 г. в $11^h 12^m$. Положение щели спектрографа телескопа THEMIS отмечено вертикальной линией. Стрелка указывает положение изучаемой части активной области

4 июля 2009 г., группа пятен находилась вблизи центрального меридиана. Согласно [53] на этот день припадала основная фаза выхода магнитного потока, что привело к магнитным пересоединениям и вызвало эруптивные процессы в солнечной атмосфере.

Детальное описание спектрополяриметрических наблюдений приведено в работе [23]. Магнитограмма и изображение в белом свете изучаемой активной области и положение щели спектрографа телескопа THEMIS приведены на рис. 1. В щель спектрографа попадал центральный участок активной области, находившийся в области инверсии полярностей магнитного поля. Ширина щели спектрографа телескопа THEMIS была равной $0.5''$. Интервал времени между отдельными спектрами составлял 2.84 с, время накопления сигнала 0.12 с. Один пиксель занимал $0.2''$. Условия видения могли несколько уменьшить пространственное разрешение. Спектральное разрешение инструмента составляло 1.143 пм/пкл.

В данной работе использованы спектры участка $\lambda = 630.0\dots 630.5$ нм из временной серии, которая началась в $11^h 47^m 12^s$. Спектральные изображения хромосферной линии H и фотосферных линий Fe I 630.15 нм, Fe I 630.25 нм, Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм показаны на рис. 2. Изучаемая часть активной области отмечена вертикальной линией. Она содержит 5 пкл. Первый пиксель соответствует нижнему краю вертикальной линии на рисунке. Этот участок включает яркую точку с эмиссией в красном крыле линии H (пиксели 1, 2) и область между ней и порой (пиксели 3...5). Первый пиксель соответствует пикселю 4 в работе [28]. Интенсивность континуума на участке немного повышена. В H-спектрах ниже рассматриваемого участка активной области видны джетоподобные струи, составляющие развивающуюся со временем волокнистую структуру. Возможно, так проявлялся выход арочной волокнистой системы AFS (Arch Filament System) [5, 51].

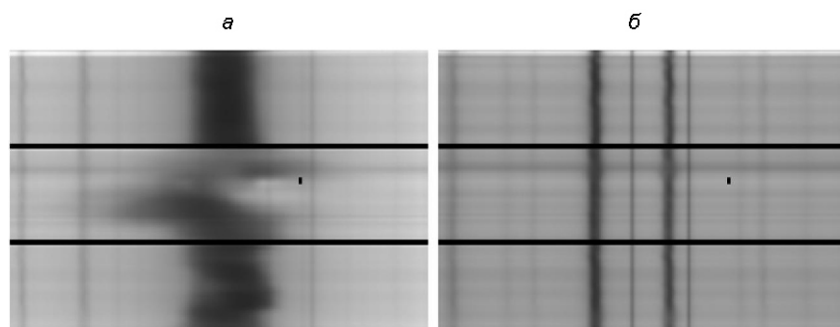


Рис. 2. Спектрограммы участков спектра, включающих линии H (слева), Fe I 630.15 нм, Fe I 630.25 нм, Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм (справа), полученные на телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. в $11^h50^m51^s$. Изучаемая часть активной области отмечена вертикальной линией

Измерения доплеровских смещений ядра линии H для первых трех пикселей показали, что в начале серии наблюдался восходящий хромосферный поток, скорость которого очень быстро изменялась со временем, достигая 15 км/с [28]. Для третьего, четвертого и пятого пикселей получены небольшие скорости. Через 2.7 мин после начала наблюдений, примерно в 11^h50^m , появился нисходящий поток, и в течение одной минуты в каждом пикселе наблюдались разнонаправленные (двойственные) хромосферные потоки.

Представляется важным изучить связь двойственных хромосферных потоков с изменением состояния фотосферы, ее магнитного поля. Полученный из наблюдений на телескопе THEMIS полный набор профилей Стокса I , Q , U , V фотосферных линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, чувствительных к изменениям магнитного поля, содержит информацию о термодинамических условиях в фотосфере и о характеристиках магнитного поля. В следующем разделе анализируются профили Стокса для каждого из пикселей и их изменение со временем.

ПРОФИЛИ СТОКСА ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ В ОБЛАСТИ ДВОЙСТВЕННЫХ ПОТОКОВ

В таблице приведены параметры использованных в работе фотосферных линий железа и титана: длина волны, элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня [32], фактор Ланде [3] и центральные глубины

Параметры выбранных спектральных линий

, нм	Элемент	EPL , эВ	g_{Φ}	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

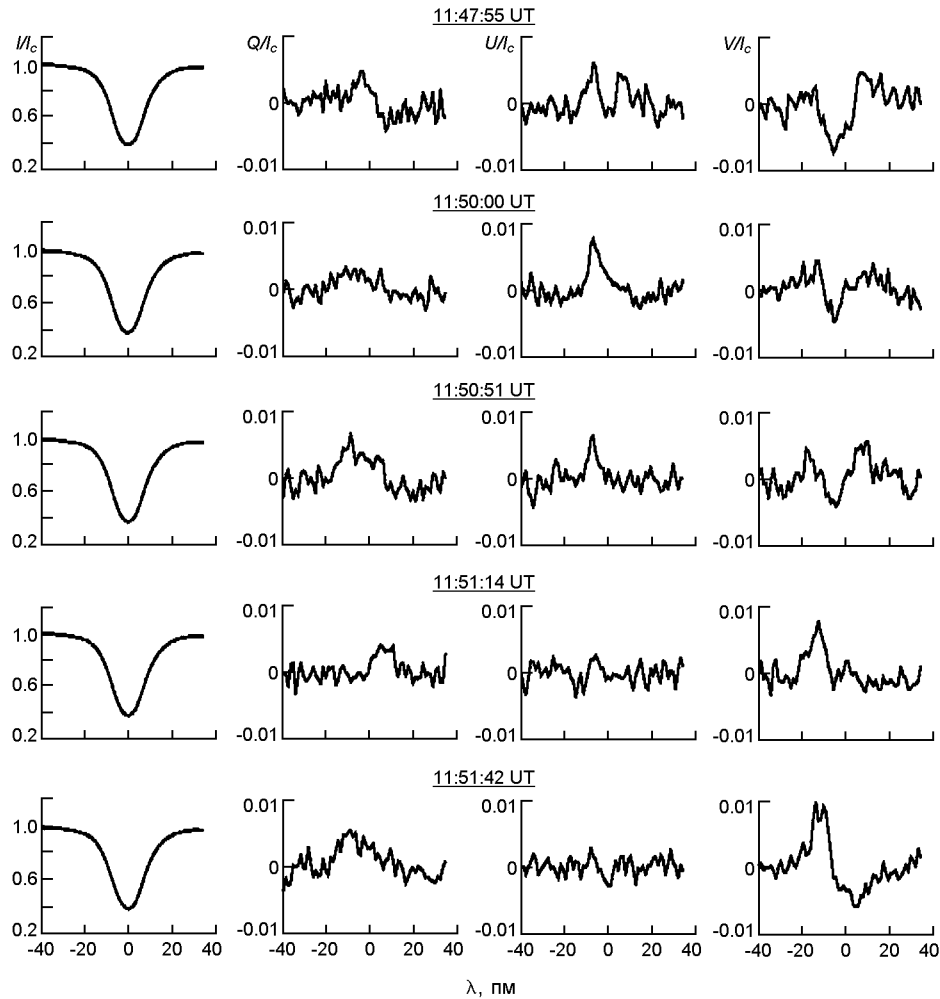


Рис. 3. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.15 нм для первого пикселя

профилей линий для невозмущенной фотосферы для центра диска Солнца [9]. Линии имеют разную интенсивность и разную чувствительность к магнитному полю. Эти линии будут использованы для моделирования.

В данной работе рассмотрено изменение со временем параметров Стокса I , Q , U , V чувствительных к магнитному полю сильных фотосферных линий Fe I 630.15 и Fe I 630.25 нм, а также параметра I слабых линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм в интервале времени от начала наблюдений $11^h47^m12^s$ до 11^h52^m . Следует отметить, что центральная часть линии Fe I 630.15 нм формируется в более высоких слоях фотосферы, чем ядро линии Fe I 630.25 нм. Параметры Стокса Q , U , V мало чувствительных к магнитному полю линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм малы и не превышают ошибок наблюдений.

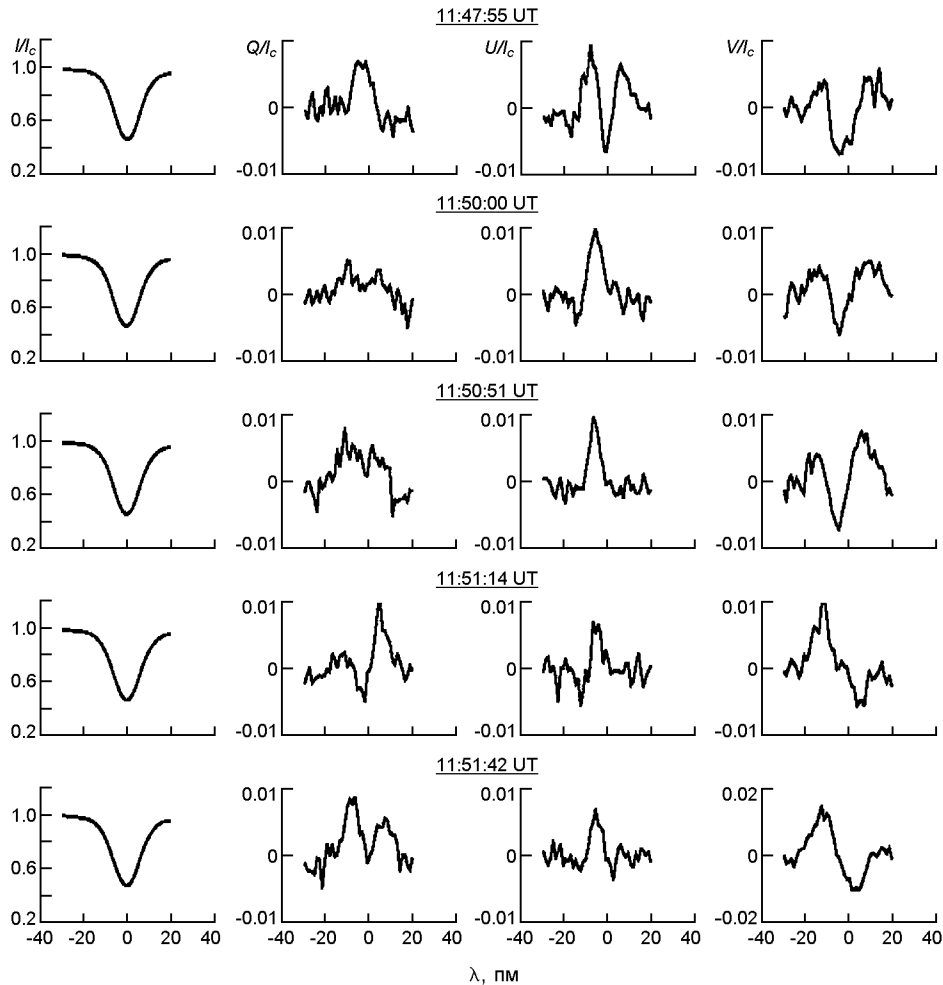


Рис. 4. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.25 нм для первого пикселя

Для детального изучения отобраны спектры лучшего качества, полученные с высоким пространственным разрешением в $11^{\text{h}}47^{\text{m}}55^{\text{s}}$, $11^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}}$, $11^{\text{h}}50^{\text{m}}51^{\text{s}}$, $11^{\text{h}}51^{\text{m}}14^{\text{s}}$, $11^{\text{h}}51^{\text{m}}42^{\text{s}}$. В первый момент двойственных потоков еще не было, во второй момент они уже наблюдались.

На рис. 3—12 приведены профили Стокса I , Q , U , V фотосферных линий Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм для пяти пикселей рассматриваемого участка активной области. Ошибки остаточной интенсивности наблюдаемых профилей Стокса I составляют менее 1 %, ошибки профилей Q , U и V равны 0.0025. Профили I Стокса Fe I 630.15 и 630.25 нм в разных пикселях мало различаются между собой в пределах ошибки наблюдений. Со временем их центральная глубина изменяется не более чем на 1.5...2 %. Она слабо реагирует на появление двойственных потоков в хромосфере. Значения центральных глубин профилей I Стокса линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм, образу-

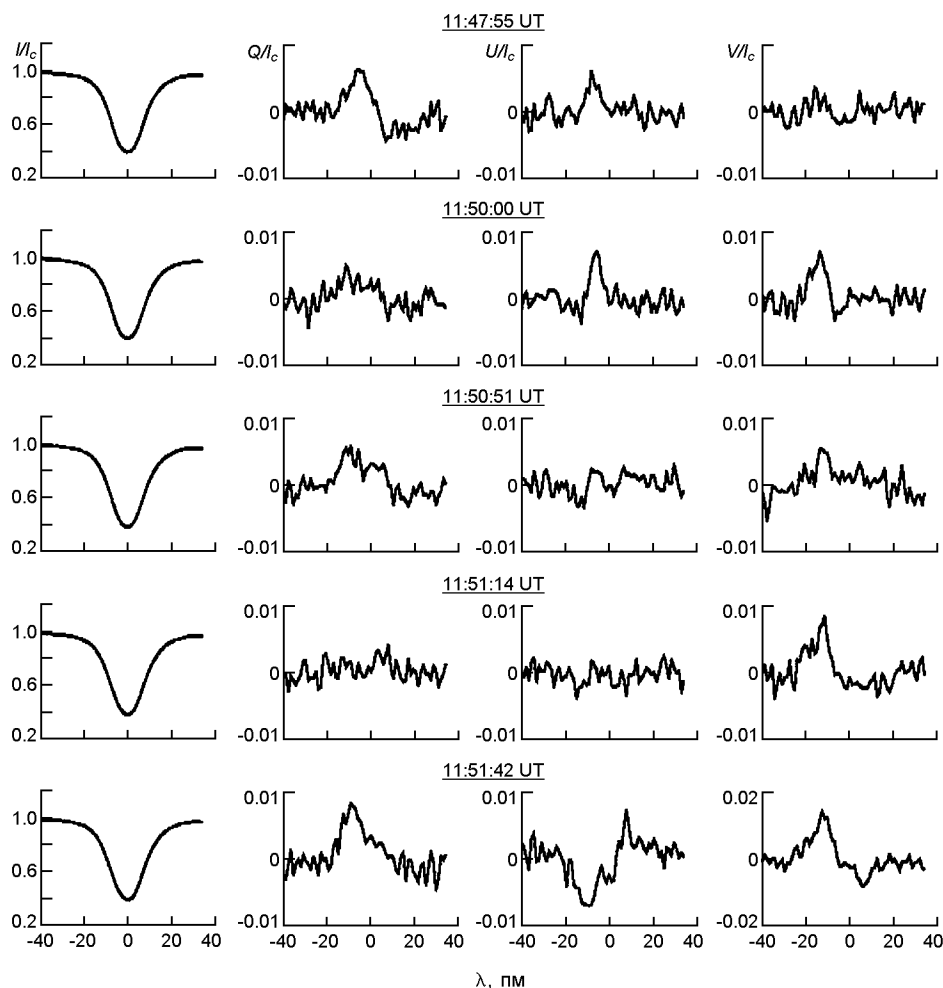


Рис. 5. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.15 нм для второго пикселя

щихся в нижних слоях фотосферы, в разных пикселях и в разные моменты, различаются между собой в пределах 0.5 %. Измерения доплеровских сдвигов ядер профилей линий дают скорости фотосферного вещества около 1 км/с.

В отличие от параметра Стокса I параметры Q , U , V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм испытывают значительные изменения. Они различаются для разных пикселей, что свидетельствует о сильной пространственной неоднородности магнитного поля рассматриваемого участка фотосферы активной области. Большинство из них имеет сложную форму. Их амплитуда и форма быстро изменяются в течение рассматриваемого интервала времени. Они также по-разному изменяются со временем в разных пикселях. Следует отметить, что во всех случаях значение амплитуды профилей V линии Fe I 630.25 нм, имеющей наибольший фактор Ланде, больше, чем для линии Fe I

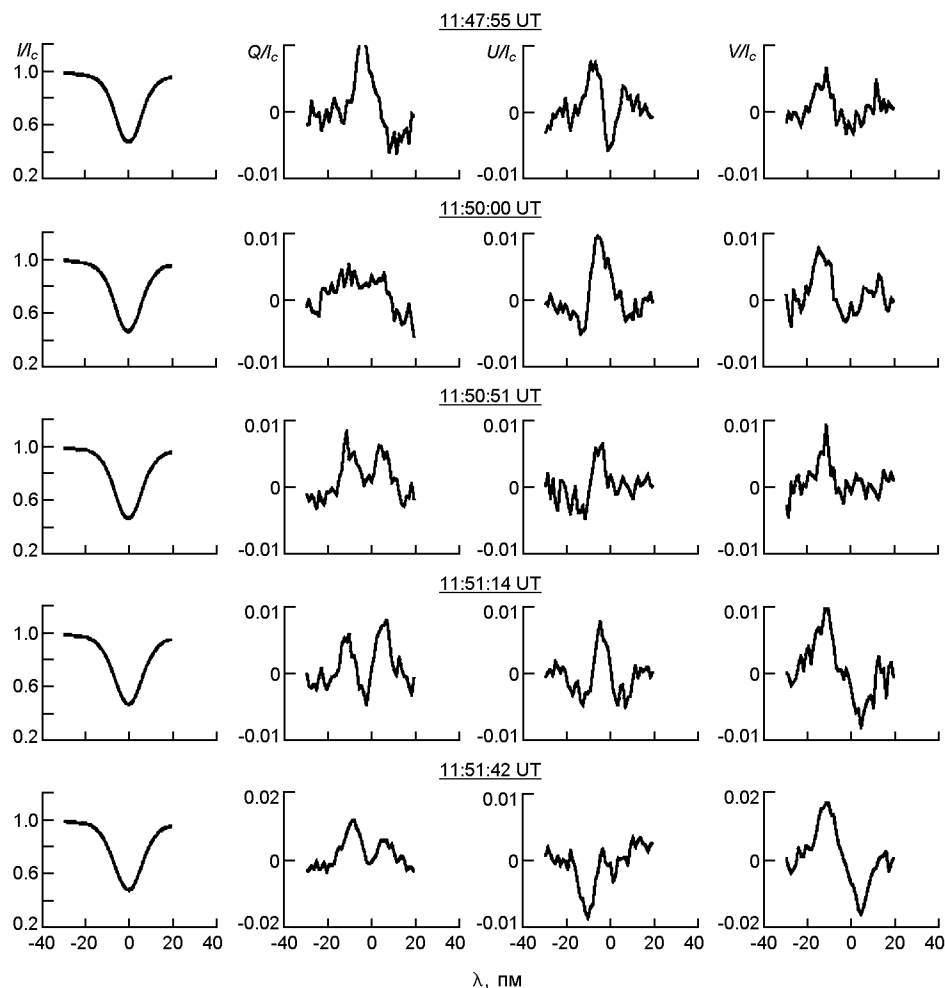


Рис. 6. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.25 нм для второго пикселя

630.15 нм, ее форма и амплитуда изменяются значительно сильнее со временем.

Магнитное поле по всему разрезу активной области вдоль щели в начале наблюдений имело отрицательную полярность. В первый момент, в $11^{\text{h}}47^{\text{m}}55^{\text{s}}$, профили Стокса V рассматриваемых линий — аномальные, состоят из трех долей (3-lobes profiles) (рис. 3—12). Помимо обычного профиля, состоящего из двух долей, имеется внешняя доля в коротковолновом крыле. Профили Стокса V подобной формы приведены, например, в работе [47]. Профили Стокса Q и U также имеют сложную форму. В большинстве случаев амплитуда профилей не превышает 0.01. Согласно измерениям доплеровских смещений ядра линии H для первых трех пикселей поток в этом месте был восходящим со скоростью около 15 км/с [28]. Скорость опускающегося вещества, полученная для пятого пикселя, составляла несколько км/с.

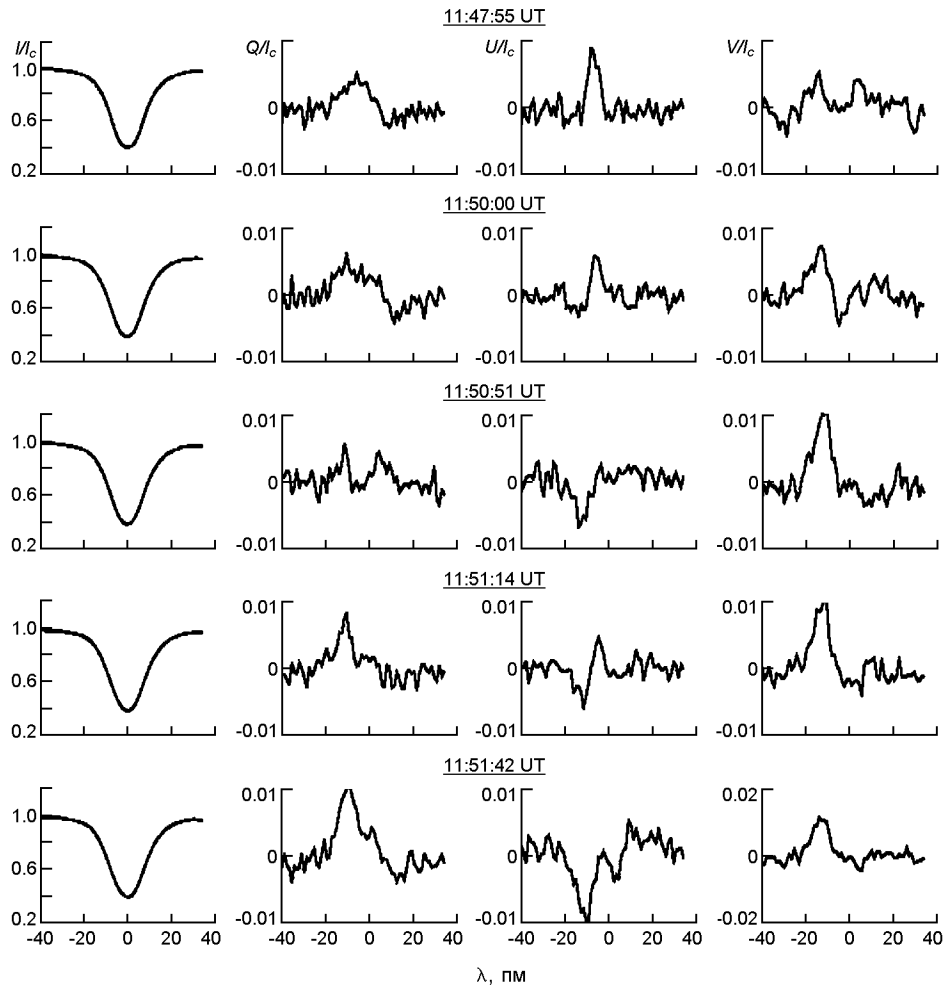


Рис. 7. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.15 нм для третьего пикселя

В $11^h49^m54^s$ на изучаемом участке активной области появились двойственные хромосферные потоки. Они появились в области аномальных профилей Стокса фотосферных линий в области яркой хромосферной точки (рис. 2). К $11^h50^m00^s$ эти профили существенно изменились по сравнению с профилями для первого момента (рис. 3—12). В большинстве случаев увеличилась амплитуда профилей V , изменилась их форма, особенно в третьем и четвертом пикселях (рис. 7—10). Для всех пикселей увеличилась амплитуда внешней доли профилей V . Для второго и третьего пикселей она больше амплитуды основного профиля. Для пятого пикселя амплитуда внешней доли профиля V значительно меньше амплитуды основного профиля, превышающей 0.01 (рис. 11, 12). Сильно изменились профили Стокса Q и U , что может свидетельствовать об изменении наклона вектора магнитного поля.

В третий момент, в $11^h50^m51^s$, для первых трех пикселей сильно уменьшился второй компонент линии H и увеличилась эмиссия в

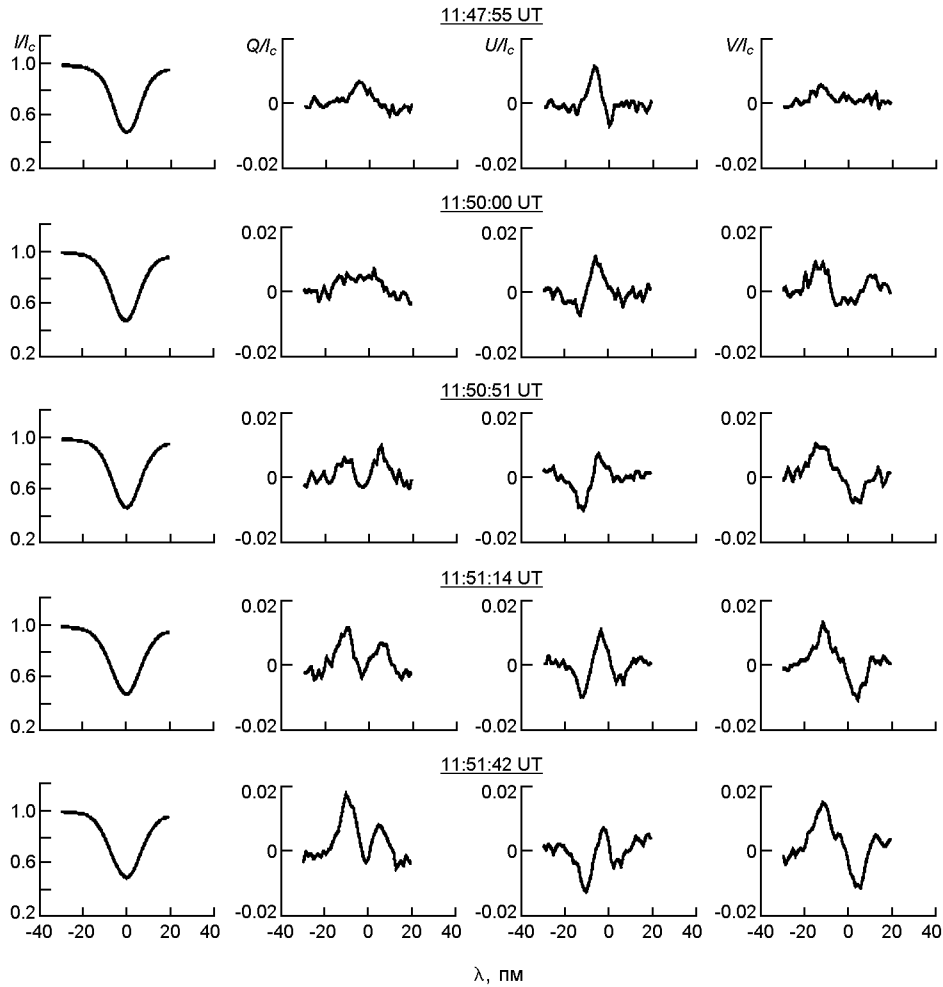


Рис. 8. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.25 нм для третьего пикселя

длинноволновом крыле. В четвертом и пятом пикселях два компонента линии H γ четко выделяются. Область двойственных потоков сместилась ближе к поре и охватила ее часть. Профили Стокса V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, полученные для второго пикселя, состоят из одной доли в коротковолновом крыле (1-lobe profiles) (рис. 5, 6). То же касается и линии Fe I 630.15 нм в третьем пикселе. Следует отметить, что профили Стокса V , состоящие из одной доли, встречаются очень редко [18, 20, 33, 36, 48]. В области формирования линии Fe I 630.25 нм в третьем пикселе к этому моменту произошла смена полярности магнитного поля, полярность стала положительной (рис. 8). Увеличились амплитуда и площадь коротковолновой доли. Амплитуда основного V -профиля линии Fe I 630.15 нм для четвертого пикселя уменьшилась, но увеличилась его внешняя доля (рис. 9). В этом, как и в третьем, пикселе в области формирования линии Fe I 630.25 нм

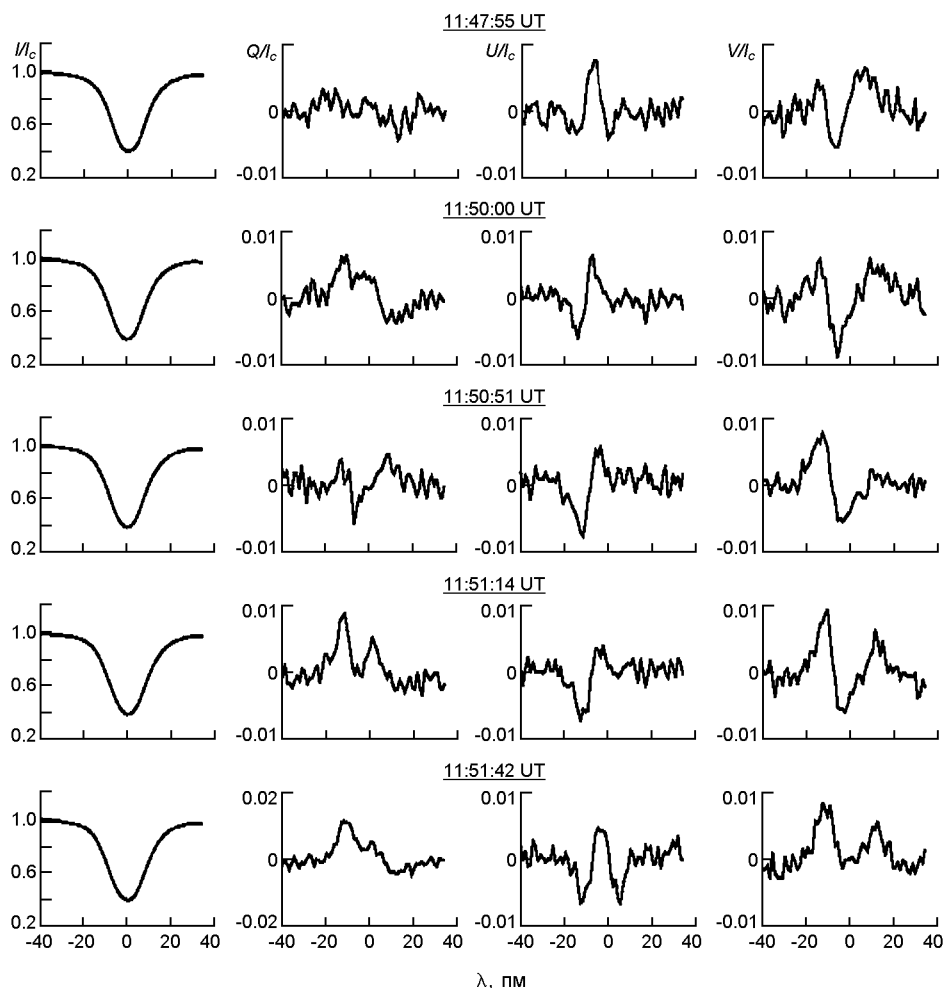


Рис. 9. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.15 нм для четвертого пикселя

изменилась полярность магнитного поля (рис. 10). Профиль V линии Fe I 630.15 нм для пятого пикселя мало изменился по сравнению с профилем для предыдущего момента. Профиль линии Fe I 630.25 нм имеет четыре доли (рис. 12). Для всех пикселей амплитуда профилей Q увеличилась, а профилей U — для четвертого и пятого пикселей.

В $11^{\text{h}}51^{\text{m}}14^{\text{s}}$ все профили линии H — однокомпонентные. К этому моменту область двойственных потоков переместилась и охватила пору. Профиль V линии Fe I 630.15 нм для первых трех пикселей имеет одну долю в коротковолновом крыле, а профиль линии Fe I 630.25 нм имеет две доли и показывает положительную полярность магнитного поля. Сильно увеличилась амплитуда доли профиля в коротковолновом крыле линии (рис. 3—8).

Профили обеих линий для четвертого пикселя содержат три доли. В области формирования линии Fe I 630.15 нм наблюдалась отрица-

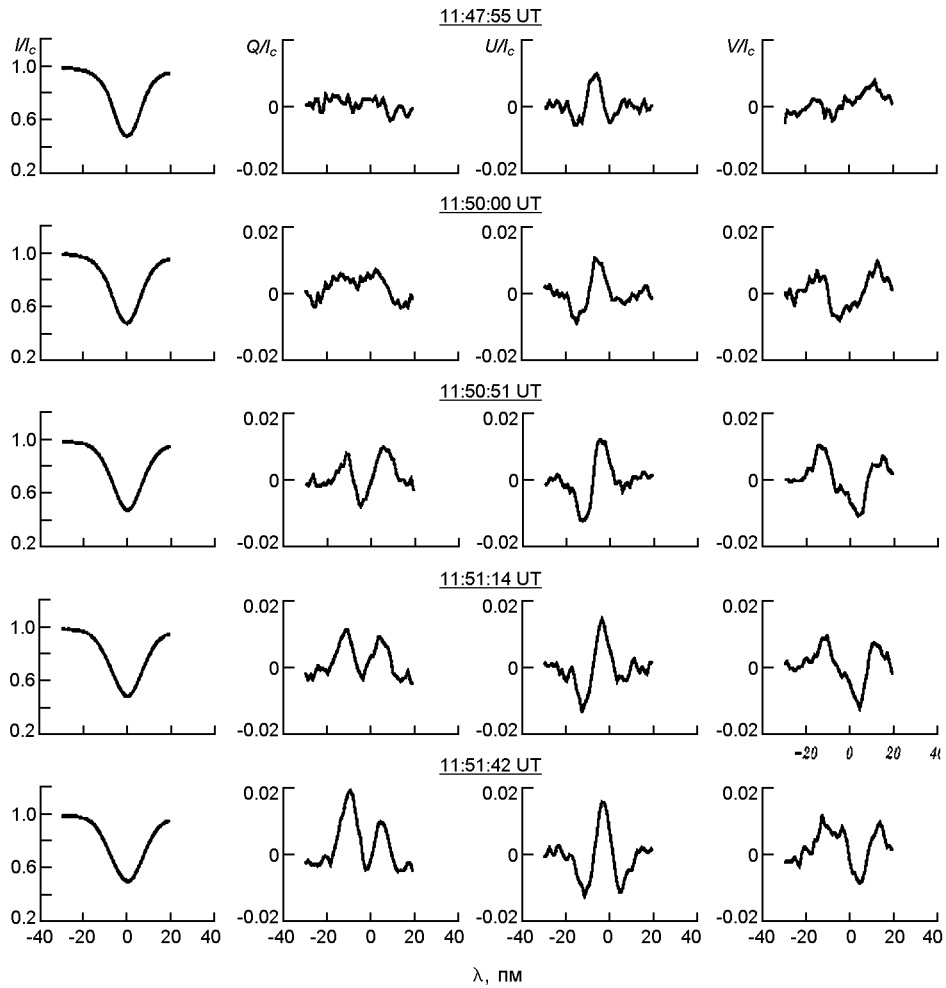


Рис. 10. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.25 нм для четвертого пикселя

тельная поляризация, а линии Fe I 630.25 нм — новая, положительная поляризация. Внешняя доля профиля линии Fe I 630.15 нм находится в коротковолновом крыле, а профиль линии Fe I 630.25 нм имеет внешнюю долю в длинноволновом крыле.

Таким образом, выходящим магнитным потоком положительной полярности к этому моменту охвачены четыре пикселя. Профиль V линии Fe I 630.15 нм для пятого пикселя, как и прежде, содержит три доли с внешней долей в коротковолновом крыле, а в линии Fe I 630.25 нм — четыре доли, что может свидетельствовать о смешанных полярностях (рис. 11, 12). Форма профилей Q для первых двух пикселей сильно изменилась, уменьшилась амплитуда профилей U . Уменьшение линейной поляризации в первом и втором пикселях в линии Fe I 630.15 нм может свидетельствовать о почти вертикальной

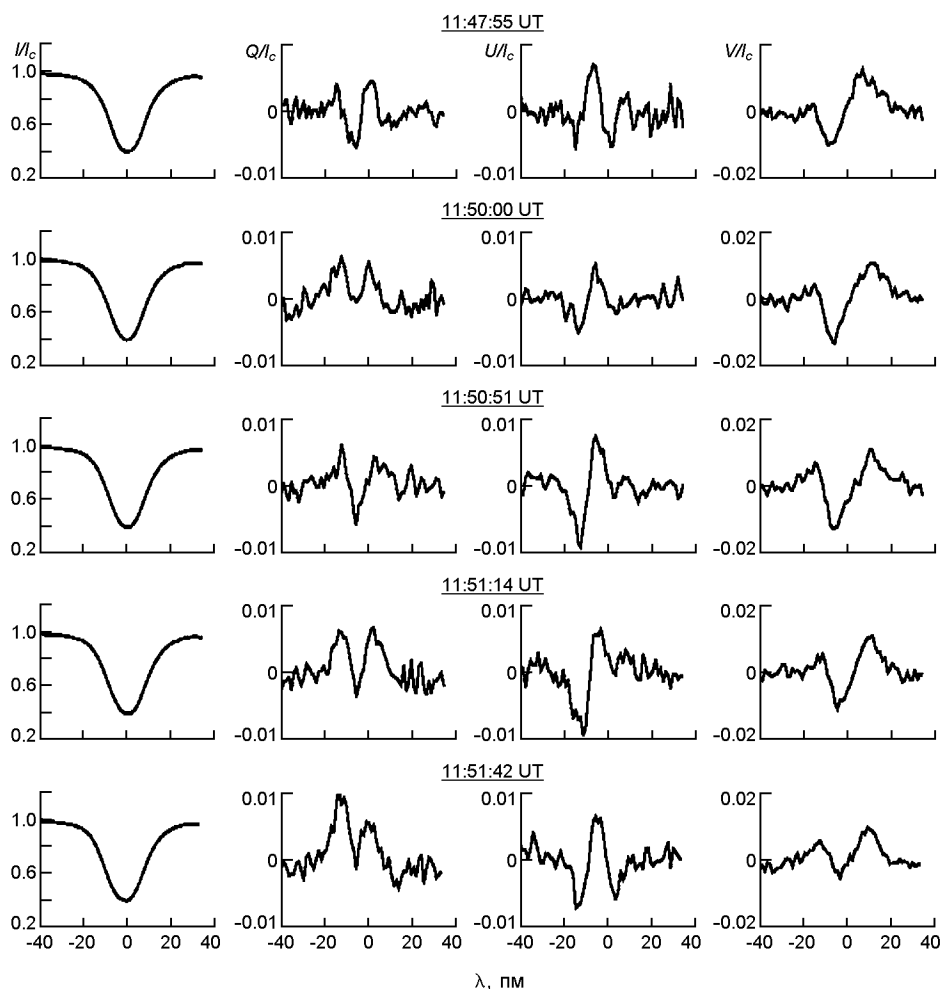


Рис. 11. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.15 нм для пятого пикселя

ориентации магнитного поля в верхних слоях фотосферы. Изменение наклона магнитного поля могло быть вызвано нисходящим потоком из верхних слоев атмосферы [46]. Амплитуда профилей Q для третьего, четвертого и пятого пикселей увеличилась.

К пятому моменту, $11^h51^m42^s$, обе линии для первых трех пикселей показывают положительную полярность магнитного поля и значительное увеличение амплитуды V -профиля (рис. 3—8). Профиль V линии Fe I 630.15 нм для четвертого пикселя состоит из двух положительных долей в крыльях (рис. 9). Возможно, амплитуда основного профиля резко уменьшилась. Линия Fe I 630.25 нм имеет основной профиль положительной полярности и внешнюю долю в длинноволновом крыле, как и в предыдущий момент (рис. 10). Форма профиля V линии Fe I 630.15 нм для пятого пикселя осталась прежней, но

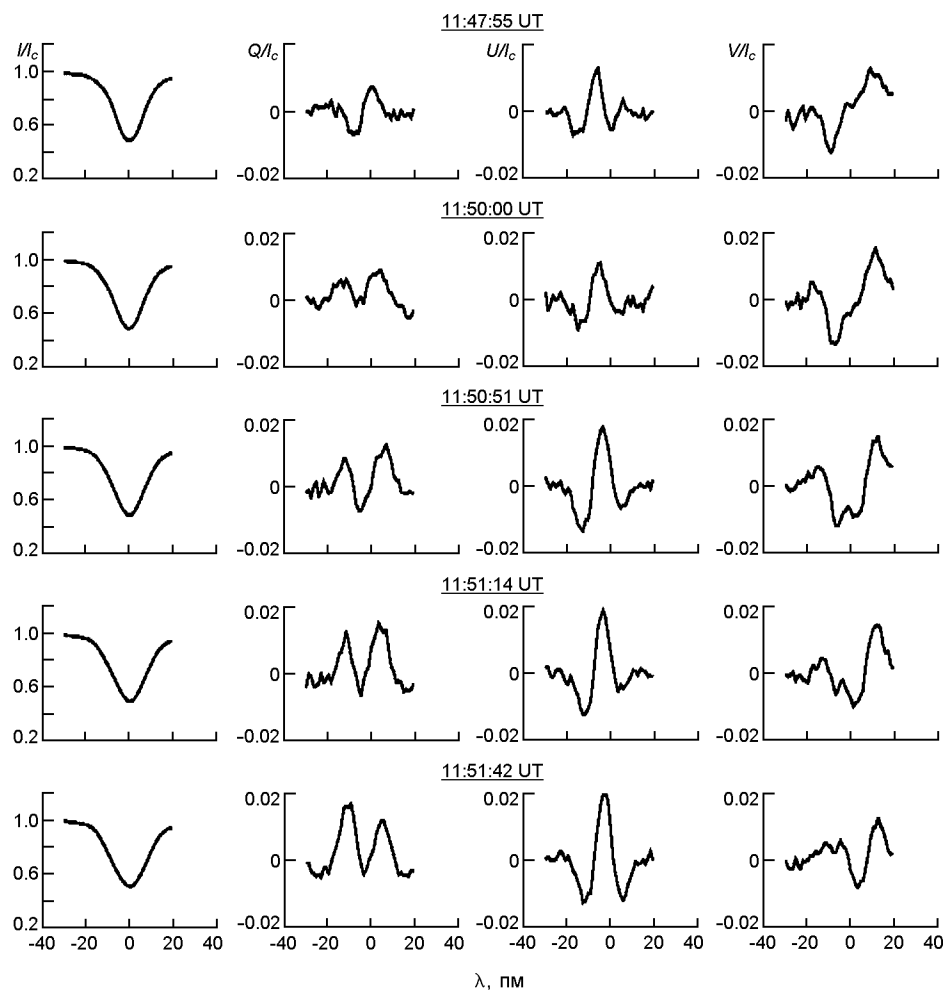


Рис. 12. Изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V линии Fe I 630.25 нм для пятого пикселя

уменьшилась амплитуда основного профиля. Как и для четвертого пикселя, линия Fe I 630.25 нм имеет основной V -профиль положительной полярности и внешнюю долю в длинноволновом крыле. Можно сделать вывод, что к этому моменту новый магнитный поток охватил области формирования обеих рассматриваемых линий в первых трех пикселях и область формирования линии Fe I 630.25 нм в четвертом и пятом пикселях. Профили V линии Fe I 630.15 нм для четвертого и пятого пикселей во все моменты состоят из трех долей с основным профилем отрицательной полярности и внешней доли в коротковолновом крыле. Следует отметить, что амплитуда основного профиля преимущественно уменьшается со временем, но постепенно увеличивается амплитуда внешней доли в коротковолновом крыле этой линии (рис. 9, 11). В дальнейшем новый поток охватил и четвертый пиксель.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе обнаружено, что двойственные хромосферные потоки в поре и ее окрестностях, выявленные в работе [28], появились на участке активной области NOAA 11024, в спектрах которого наблюдались аномальные профили Стокса V фотосферных линий. В отличие от обычных профилей, состоящих из двух долей противоположного знака, аномальные профили Стокса V могут содержать от одной до нескольких долей. Их появление в спектре свидетельствует о сложной структуре магнитного поля. Впервые они были выявлены при наблюдениях полутени пятна [21], а впоследствии — в пятнах [15, 17]. Аномальные профили Стокса V наблюдаются в активных и спокойных участках Солнца [12, 13, 18, 19, 25, 34, 35, 39, 40, 46—48]. Аномальные профили Стокса часто наблюдаются вблизи линии раздела полярностей магнитного поля [38, 49].

В работе [20] дана классификация профилей Стокса V линии 630.15 нм и отмечено, что аномальные профили обычно концентрируются на границах гранул и межгранульных промежутков. Из наблюдений с High Altitude Observatory/National Solar Observatory Advanced Stokes Polarimeter найдено, что вне пятен встречаются от 5 до 10 % профилей Стокса V , имеющих сложную форму [47]. Согласно классификации аномальных профилей Стокса V в работе [47] профили, полученные в данной работе, относятся к категории профилей со смешанной полярностью (mixed-polarity profiles). Они, по-видимому, представляют собой суперпозицию двух асимметричных профилей Стокса V , относящихся к компонентам противоположной магнитной полярности, наблюдающихся в одном элементе разрешения (пикселе). В большинстве случаев они имеют форму, подобную типичной форме профилей Стокса Q или U — две доли одинакового знака и центральную долю противоположного знака. Для первых трех пикселей встречаются также профили V , имеющие одну долю. Они относятся к моментам вблизи $11^h 51^m$ и предваряют смену полярности магнитного поля. В некоторые моменты обе линии имеют такие профили, но в большинстве случаев они не наблюдаются в линии Fe I 630.25 нм. Подобная особенность отмечена также в работе [40].

В работе [46] сообщается о спектрополяриметрических наблюдениях аномальных профилей Стокса V линий Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм на телескопе SOT (Solar Optical Telescope) на спутнике «Hinode» в окрестности пятен и в невозмущенных областях Солнца. Установлена их связь с высокоскоростными нисходящими фотосферными потоками. Выявлено три типа подобных движений. Первый тип относится к внешнему краю полутени, второй к краю тени пятен, не имеющих полутени, и около внешней границы пор, и третий к малым концентрациям магнитного поля в невозмущенной атмосфере. Профили Стокса V для первого типа состоят из трех долей, причем внешняя доля находится в длинноволновом крыле линий. Во время наблю-

дений произошла смена полярности магнитного поля, сформировалась область магнитного потока с полярностью противоположной полярности пятна. Авторы работы интерпретируют этот процесс как проявление движущейся магнитной особенности (ММФ). Профили, полученные в данной работе, подобны профилям этого типа на рис. 5 работы [46], однако внешняя доля профилей в начале наблюдений находилась в коротковолновом крыле линий. Затем, в $11^h51^m14^s$ и $11^h51^m42^s$, внешняя доля профилей линии Fe I 630.25 нм для четвертого пикселя находилась в ее длинноволновом крыле.

Предложены разные объяснения аномальных профилей Стокса V в спектрах. В работе [35] предполагается, что аномальные профили возникают при наличии мелкомасштабного сифонного потока вдоль петли, соединяющей силовые трубки по обе стороны от нейтральной линии магнитного поля. Подобные арочные изолированные силовые трубки описаны в работе [52]. В работах [12, 13, 34, 47, 50] в качестве условия появления аномальных профилей предполагается наличие смешанных полярностей, суперпозиции двух магнитных компонентов с разными полярностями в одном элементе разрешения. Согласно работе [46] сложный профиль Стокса V с тремя долями можно интерпретировать двумя магнитными компонентами в пределах пространственного разрешения или двумя магнитными компонентами вдоль линии зрения в тонком слое, где образуются линии.

В работах [37, 39] рассматривалась модель микроструктурированной магнитной атмосферы (MISMA), состоящей из ансамбля оптически тонких магнитных элементов, погруженных в среду без магнитного поля, и получен вывод, что такая модель, в зависимости от выбора ее параметров, в том числе разных скоростей элементов, способна объяснить разнообразие асимметричных профилей Стокса. Результаты численного 2D- и 3D-МГД-моделирования магнитоконвекции показывают, что аномальные профили Стокса могут формироваться при неоднократной смене полярности магнитного поля вдоль луча зрения при наличии градиента скорости [14, 20, 33, 45]. Наблюдаемые аномальные профили, по-видимому, отражают наличие горизонтальных неоднородностей вследствие недостаточного разрешения телескопов и эффектов видения [20, 25]. Необходимы спектрополяриметрические наблюдения с более высоким пространственным разрешением.

В результате анализа данных спектрополяриметрических наблюдений триплета гелия 1083 нм активной области NOAA 9451 в работе [26] были выявлены двойственные потоки в верхней хромосфере в окрестности развивающейся поры в подножии магнитной аркады петель. Скорость нисходящих потоков достигала 40 км/с. Эти потоки сопровождалась компонентом с малой скоростью в одном и том же элементе разрешения. Со временем площадь, занятая нисходящими потоками, увеличивалась. Авторы исследования предполагают, что обнаруженные ими высокоскоростные нисходящие потоки связаны с выходом нового магнитного потока. Магнитный поток выносит наружу

фотосферное вещество, которое затем стекает вниз по поднимающимся петлям.

В работах [51, 55] также наблюдались высокоскоростные сверхзвуковые нисходящие хромосферные потоки в подножиях выходящих петель в других активных областях. В работе [51] приведено значение скорости нисходящих потоков 17 км/с в верхней хромосфере в области выходящего магнитного потока. В работе [55] получены значения скорости до 30 км/с в верхней хромосфере и 1.5 км/с в фотосфере. При такой большой разнице скоростей в хромосфере и фотосфере можно предполагать наличие ударных волн. В данной работе также найдено, что скорости в хромосфере и фотосфере сильно различаются, что может быть причиной наблюдаемой сильной эмиссии в крыле линии H α . В работе [24] сообщается о наблюдениях хромосферных нисходящих потоков со скоростями до 18 км/с в области выходящего магнитного потока в окрестностях быстро развивающейся поры.

Как уже отмечалось выше, в начале наблюдений по всему разрезу вдоль щели исследуемого участка активной области NOAA 11024 полярность магнитного поля была отрицательной. В 11^h50^m51^s в двух пикселях в области формирования линии Fe I 630.25 нм отрицательная полярность изменилась на положительную, что свидетельствует о проявлении выхода нового магнитного потока противоположной полярности. Через 23 с новая полярность распространилась на соседние пиксели, а еще через 28 с она появилась и в более высокой области формирования линии Fe I 630.15 нм в первых трех пикселях. В работе [46] также наблюдалась смена полярности магнитного поля в области высокоскоростных нисходящих потоков в окрестности пятна.

Таким образом, получено наблюдательное доказательство выхода нового маломасштабного магнитного потока противоположной полярности в изучаемой области. Вероятно, появление нисходящего хромосферного потока вызвано стеканием вещества к подножию поднимающейся магнитной петли. В работе [10] сообщается о наблюдении нисходящего потока со скоростью 30 км/с в подножии холодной петли. По мнению авторов, его можно интерпретировать как проявление сифонного потока, возникшего вследствие импульсного нагрева подножия. В нашем случае невозможно выделить второе подножие петли и сделать выводы в отношении сифонного потока. Возможные сценарии выхода маломасштабного потока и его взаимодействия со старым магнитным полем области приведены, например, в работах [8, 54]. В этих работах отмечается, что освобождение энергии вследствие последующих магнитных пересоединений вызывает прогрев окружающей хромосферы.

Примерно через 12 мин после событий в активной области NOAA 11024, описанных в данной работе, вблизи рассматриваемого участка появилась микровспышка [23]. Возможно, она возникла вследствие выхода нового магнитного потока и магнитных пересоединений. Из анализа данных наблюдений на спутнике «Hinode» было получено

[11], что большинство горячих петель в активной области NOAA 11024 сформировались вследствие вспышек в зонах смешанной полярности.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты анализа данных спектрополяриметрических наблюдений активной области NOAA 11024 на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания). Рассмотрено изменение со временем профилей Стокса I , Q , U , V фотосферных линий Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм для окрестности маленькой солнечной поры. Найдено, что двойственные хромосферные потоки появились в области аномальных профилей Стокса V фотосферных линий в области яркой хромосферной точки.

Выявлено, что профили Стокса I фотосферных линий в целом изменяются мало при появлении этих потоков. Большинство профилей Стокса Q , U , V фотосферных линий имеют сложную, аномальную форму. Профили Стокса V состоят из трех долей, иногда имеют одну долю. Амплитуда и форма профилей Стокса Q , U , V сильно изменяются от пикселя к пикселю, что свидетельствует о неоднородной структуре магнитного поля фотосферы на рассматриваемом участке активной области. Они быстро изменялись со временем.

В течение наблюдений произошла смена магнитной полярности. Анализ изменений профилей Стокса фотосферных линий указывает, что на рассматриваемом участке активной области происходил выход нового маломасштабного магнитного потока противоположной полярности. Двойственные потоки в хромосфере можно объяснить стеканием вещества вдоль выходящей магнитной петли. Возможно, вследствие выхода нового потока и магнитных пересоединений с магнитным полем активной области в дальнейшем вблизи этого участка возникла микровспышка.

Автор благодарит Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за спектрополяриметрические наблюдения, Р. И. Костыка за предоставленные программы обработки данных, а также группу поддержки SOHO за возможность использования данных. SOHO — миссия международной кооперации ESA и NASA.

1. Лейко У. М., Кондрашова Н. Н. Изменения хромосферной лучевой скорости в солнечной микровспышке. *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории*. 2013. 109. № 3. С. 72—77.
2. Aznar Cuadrado R., Solanki S. K., Lagg A. Supersonic downflows in the solar chromosphere are very common / Proceedings of the International Scientific Conference on Chromospheric and Coronal Magnetic Fields (30 August — 2 September 2005, Katlenburg-Lindau, Germany) / Eds D. E. Innes, A. Lagg, S. K. Solanki and D. Danesy. ESA Publ. Division. 2005. 596. Publ. on CDROM, id. 49.1.

3. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets. *Phys. Sci. Res. Papers*. 1969. N 371. 193 p.
4. Brekke P., Brynildsen N., Kjeldseth-Moe O., et al. Multiple flow velocities in the transition region. *Adv. Space Res.* 1991. 11. N 5. P. 251—254.
5. Bruzek A. On arch-filament systems in spotgroups. *Solar Phys.* 1967. 2. N 4. P. 451—461.
6. Brynildsen N., Maltby P., Kjeldseth-Moe O., Wilhelm K. Dual flows and oscillations in the sunspot transition region. *Astrophys. J.* 2001. 552. N 1. P. L77—L80.
7. Cargill P. J., Priest E. R. Siphon flows in coronal loops. I — Adiabatic flow. *Solar Phys.* 1980. 65. P. 251—269.
8. Centeno R., Blanco Rodríguez J., Del Toro Iniesta J. C. , et al. A tale of two emergences: Sunrise II observations of emergence sites in a solar active region. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2017. 229. N 1. article id. 3. 12 p.
9. Delbouille L., Roland G., Neven L. Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. Liege: Institut d'Astrophysique, 1973.
10. Doyle J. G., Taroyan Y., Ishak B., et al. Study of a transient siphon flow in a cold loop. *Astron. and Astrophys.* 2006. 452. N 3. P. 1075—1082.
11. 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.
12. 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.
13. 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—10 p.
14. Gadun A. S., Solanki S. K., Sheminova V. A., Ploner S. R. O. A formation mechanism of magnetic elements in regions of mixed polarity. *Solar Phys.* 2001. 203. N 1. P. 1—7.
15. Golovko A. A. The crossover effect in sunspots and the fine structure of penumbra. *Solar Phys.* 1974. 37. N 1. P. 113—125.
16. González Manrique S. J., Kuckein C., Pastor Yabar A., et al. Fitting peculiar spectral profiles in He I 10830 Å absorption features. *Astron. Nachr.* 2016. 337. N 10. P. 1057—1063.
17. Grigorjev V. M., Katz J. M. The crossover and magneto-optical effects in sunspot spectra. *Solar Phys.* 1972. 22. N 1. P. 119—128.
18. Grossmann-Doerth U., Schussler M., Sigwarth M., Steiner O. Strong Stokes V asymmetries of photospheric spectral lines: What can they tell us about the magnetic field structure? *Astron. and Astrophys.* 2000. 357. P. 351—358.
19. 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.
20. Khomenko E. V., Shelyag S., Solanki S. K., Vögler A. Stokes diagnostics of simulations of magnetoconvection of mixed-polarity quiet-Sun regions. *Astron. and Astrophys.* 2005. 442. N 3. P. 1059—1078.
21. Kjeldseth-Moe O. On the magnetic-field configuration in sunspots / in: 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.
22. Kjeldseth-Moe O., Brynildsen N., Brekke P., et al. Multiple flows and the fine structure of the transition region around sunspots. *Solar Phys.* 1993. 145. N 2. P. 257—277.
23. Kondrashova N. N. Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2013. 431. N 2. P. 1417—1424.

24. 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.
25. 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.
26. Lagg A., Woch J., Solanki S. K., Krupp N. Supersonic downflows in the vicinity of a growing pore. Evidence of unresolved magnetic fine structure at chromospheric heights. *Astron. and Astrophys.* 2007. 462. N 3. P. 1147—1155.
27. Leiko U. M., Kondrashova N. N. The chromospheric line-of-sight velocity variations in a solar microflare. *Adv. Space Res.* 2015. 55. N 3. P. 886—890.
28. Leiko U. M., Kondrashova N. N. Dual chromospheric flows in the vicinity of a small pore. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2017. 33. N 3. P. 111—121.
29. Lopez Ariste A., Rayrole J., Semel M. First results from THEMIS spectropolarimetric mode. *Astron. Astrophys. Suppl.* 2000. 142. P. 137—148.
30. Muglach K., Schmidt W., Knoelker M. Multiple velocities observed in He I 1083 nm. *Solar Phys.* 1997. 172. N 1/2. P. 103—108.
31. Parker E. N. Hydraulic concentration of magnetic fields in the solar photosphere. VI—Adiabatic cooling and concentration in downdrafts. *Astrophys. J.* 1978. 221, p 1. P. 368—377.
32. Pierce A. K., Breckinridge J. B. The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths, Kitt Peak National Observatory. 1972. Contribution N 559.
33. Ploner S. R. O., Schussler M., Solanki S. K., et al. The formation of one-lobed Stokes V profiles in an inhomogeneous atmosphere. *Advanced Solar Polarimetry — Theory, Observation, and Instrumentation*, ASP Conf. Proc. 2001. 236. / Ed M. Sigwarth. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. 2001. P. 371—378.
34. 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.
35. Ruedi I., Solanki S. K., Rabin D. Infrared lines as probes of solar magnetic features. IV. Discovery of a sifon flows. *Astron. and Astrophys.* 1992. 261. N 2. P. L21—L24.
36. Sainz Dalda A., Martínez-Sykora J., Bellot Rubio L., Title A. Study of single-lobed circular polarization profiles in the quiet Sun. *Astrophys. J.* 2012. 748. N 1. id. 38. 23 p.
37. Sanchez Almeida J., Landi Degl'Innocenti E., Martinez Pillet V., Lites B. W. Line asymmetries and the microstructure of photospheric magnetic fields. *Astrophys. J.* 1996. 466. P. 537—548.
38. 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.
39. Sanchez Almeida J., Lites B. W. Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. II. Network and internetwork fields at the disk center. *Astrophys. J.* 2000. 532. P. 1215—1229.
40. 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.
41. Sasso C., Lagg A., Solanki S. K., et al. Full-Stokes observations and analysis of He I 10830 Å in a flaring region / *The Physics of Chromospheric Plasmas ASP Conference Series (Proceedings of the conference held 9—13 October, 2006 at the University of Coimbra in Coimbra, Portugal)* / Eds P. Heinzel, I. Dorotovic, R. J. Rutten. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2007. 368. P. 467.

42. Sasso C., Lagg A., Solanki S. K. Multicomponent He I 10830 Å profiles in an active filament. *Astron. and Astrophys.* 2011. 526. article id. A 42. 11 p.
43. 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.
44. Schmidt W., Muglach K., Knölker M. Free-fall downflow observed in He I 1083.0 nanometers and H . *Astrophys J.* 2000. 544. N 1. P. 567—571.
45. Sheminova V. A. On the origin of the extremely asymmetric Stokes V profiles in an inhomogeneous atmosphere. arXiv:0902.2940. 2005. P. 1—23.
46. 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.
47. 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.
48. Sigwarth M., Balasubramaniam K. S., Knölker M., Schmidt W. Dynamics of solar magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 1999. 349. P. 941—955.
49. Skumanich A., Lites B. Velocity gradients across a flaring neutral line from Stokes Π measurements / Solar Polarimetry (Proceedings of the 11th Sacramento Peak Summer Workshop) / Ed L. J. November. Sunspot, NM: National Solar Observatory. 1991. P. 307—317.
50. Socas-Navarro H., Trujillo Bueno J., Ruiz Cobo B. Anomalous circular polarization profiles in sunspot chromospheres. *Astrophys. J.* 2000. 544. N 2. P. 1141—1154.
51. Spadaro D., Billotta S., Contarino L., et al. AFS dynamic evolution during the emergence of an active region. *Astron. and Astrophys.* 2004. 425. P. 309—319.
52. Thomas J. H., Montesinos B. Siphon flows in isolated magnetic flux tubes. IV - Critical flows with standing tube shocks. *Astrophys. J.* 1991. 375. P. 404—413.
53. 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.
54. 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.
55. Xu Z., Lagg A., Solanki S. K. Magnetic structures of an emerging flux region in the solar photosphere and chromosphere. *Astron. and Astrophys.* 2010. 520. id. A77. 13 p.

Статья поступила в редакцию 05.10.2017

Н. М. Кондрашова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

**АНОМАЛЬНІ ПРОФІЛІ СТОКСА ФОТОСФЕРНИХ ЛІНІЙ
В ОБЛАСТІ ХРОМОСФЕРНИХ ПОДВІЙНИХ ПОТОКІВ
В ОКОЛІ СОНЯЧНОЇ ПОРИ. І. СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

На основі даних спектрополяриметричних спостережень активної області NOAA 11024 на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) виконано аналіз профілів Стокса фотосферних ліній Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм для околу маленької сонячної пори в області появи подвійних хромосферних потоків. Розглянуто часові зміни параметрів Стокса I , Q , U , V для кожного

пікселя. Знайдено, що подвійні хромосферні потоки з'явилися в області аномальних профілів Стокса фотосферних ліній. Більшість профілів Q , U , V мають складну форму. Вони відрізняються від пікселя до пікселя, що свідчить про вкрай неоднорідну структуру магнітного поля на розглянутій ділянці активної області. Амплітуда та форма профілів швидко змінювалися з часом. Під час спостережень відбулася зміна полярності фотосферного магнітного поля на протилежну в області яскравого хромосферного утворення. Отримано докази виходу нового маломасштабного магнітного потоку протилежної полярності, що могло призвести до початку магнітних перез'єднань, появи подвійних хромосферних потоків та виникнення мікроспалаху.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, активні області, магнітні поля, спектрополяриметрия.

N. N. Kondrashova

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

ABNORMAL STOKES PROFILES IN THE REGION OF CHROMOSPHERIC DUAL FLOWS IN THE SURROUNDINGS OF A SOLAR PORE. I. OBSERVATION

The results of the analysis of the full Stokes profiles of the photospheric lines Fe I 630.15 and Fe I 630.25 nm in a region of chromospheric dual flows in the vicinity of a small pore are presented. The analysis is based on the spectropolarimetric observations of the active region NOAA 11024 with the French-Italian telescope THEMIS (Heliographic Telescope for the Study of the Magnetism and Instabilities on the Sun), operated on the island of Tenerife in the Spanish Observatorio del Teide of the Instituto de Astrofísica de Canarias. The temporal variation of the high-resolution Stokes parameters I , Q , U , V of the photospheric lines was considered for each pixel studied. The observed Stokes profiles show variety of shapes. Most of the Stokes profiles Q , U , and V have complex shape. The amplitude and the shape of the Stokes profiles were changing quickly during the observations. The dual chromospheric flows have appeared in the region of abnormal Stokes profiles. The change of the polarity of the photospheric magnetic field took place during the observations in the region of a bright chromospheric point. The evidence of an emergence of a new small-scale magnetic flux of opposite polarity is obtained. This could lead to the magnetic reconnection, appearance of the dual chromospheric flows and occurrence of a microflare.

Keywords: Sun, photosphere, active regions, magnetic fields, spectropolarimetry.