

УДК 523.985.3

Н. Н. Кондрашова

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

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

II. Фотосферные модели

*Представлены термодинамические параметры и параметры фотосферного магнитного поля в области хромосферных двойственных потоков в окрестности небольшой поры в активной области NOAA 11024. Двойственные потоки, которые появились в области аномальных профилей Стокса V фотосферных линий, были связаны с выходом нового мелкомасштабного магнитного потока положительной полярности. Полуэмпирические фотосферные модели получены методом инверсии с помощью программы SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta. *Astrophys. J.* 1992. 398. P. 375]. Каждая модель содержит два компонента: две тонкие трубки магнитного потока разной полярности. В первом компоненте магнитный поток имеет отрицательную полярность, во втором — положительную. Для моделирования использованы профили Стокса фотосферных линий Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм и Ti I 630.38 нм из спектрополяриметрических наблюдений на франко-итальянском телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания). Получены зависимости температуры, лучевой скорости, угла наклона вектора магнитного поля и азимутального угла в трубках от высоты, а также значения напряженности магнитного поля и макротурбулентной скорости. Выявлены временные вариации всех параметров фотосферы. Новый магнитный поток выходил в области смешанных полярностей и сопровождался прогревом фотосферы и хромосферы. Полученные модели магнитных силовых трубок показывают повышение температуры на 400 K в верхних слоях фотосферы относительно ее величины в модели спокойного Солнца. Они свидетельствуют о сложной, неоднородной мелкомасштабной структуре магнитного*

поля и поля скоростей. Напряженность магнитного поля в трубках изменяется в пределах от 0.03 до 0.13 Тл в течение рассматриваемого периода наблюдений. Углы наклона вектора магнитного поля и азимутальные углы сильно различаются в магнитных силовых трубках и изменяются со временем. Лучевая скорость не превышает 2 км/с. В первом компоненте моделей в нижних слоях фотосферы преобладают нисходящие, а в верхних — восходящие потоки. Во втором компоненте модели показывают подъем вещества в верхней фотосфере. Макротурбулентная скорость в большинстве случаев превышает ее величину для невозмущенной фотосферы. Скорость больше во втором компоненте моделей. Выход нового мелкомасштабного магнитного потока мог привести к магнитным пересоединениям и возникновению микровспышки.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, активные области, магнитные поля, спектрополяриметрия.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах [30, 31] сообщалось о наблюдениях на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS двойственных хромосферных потоков в области маленькой поры и ее окрестности в активной области NOAA 11024. Два разнонаправленных потока в одних и тех же элементах разрешения появились в области яркой точки и продолжались около минуты. Область двойственных потоков расширилась и сдвигалась в сторону поры. Через 12 мин после появления двойственных потоков вблизи этого участка возникла микровспышка. В работе [27] обнаружено, что двойственные хромосферные потоки появились в области аномальных профилей Стокса V фотосферных линий. В отличие от обычных профилей, состоящих из двух долей противоположного знака, аномальные профили могут содержать три или четыре доли, а изредка — одну долю. Они наблюдаются во флоккулах [40, 51], пятнах, порах и их окрестностях [7, 14, 15, 46, 50], вспышках [13], подножиях петель [61], на линии раздела полярностей магнитного поля [28] и в спокойных участках Солнца [25, 29, 51]. В работе [51] из наблюдений вне пятен с помощью прибора «High Altitude Observatory/National Solar Observatory Advanced Stokes Polarimeter» получено, что аномальные профили Стокса V составляют от 5 до 10 % от общего числа профилей. В работах [12, 25, 45, 51, 62] приведена классификация профилей Стокса V , включающая и аномальные профили. Согласно работе [62] среди профилей, наблюдаемых на SOT/SP на борту спутника Hinode в невозмущенных участках Солнца, асимметричные профили фотосферных линий составляют приблизительно 93 %. Примерно 34 % профилей сильно асимметричны, и их можно разделить на три группы: профили с долей в коротковолновом крыле, с долей в длинноволновом крыле и Q -подобные профили.

Аномальные профили Стокса V в спектрах свидетельствуют о сложной структуре магнитного поля и поля скоростей фотосферы. Есть разные подходы к решению проблемы интерпретации неразрешенных магнитных полей. Широкое распространение получила концепция тонких магнитных силовых трубок [55, 56]. Теоретические модели тонких магнитных силовых трубок с напряженностью магнитного поля порядка 0.1...0.2 Тл приведены в работах [10, 11, 22, 53, 54 и др.]. В работе [44] предложена микроструктурированная магнитная атмосфера (MISMA). Эта модель состоит из ансамбля оптически тонких магнитных элементов, погруженных в среду без магнитного поля. Авторы пришли к выводу, что она способна описать все виды V -профилей Стокса и их асимметрию. Мезоструктурированная атмосфера MESMA [4], помимо малых, включает все характерные масштабы длины корреляции. Для объяснения аномальных V -профилей Стокса используется также численное 2D- и 3D-МГД-моделирование, выполненное в работах [17, 26, 37, 49].

Результаты полуэмпирического моделирования фотосферы в области аномальных профилей Стокса V приведены в работах [1, 12, 13, 15, 20, 40, 45, 50, 51, 65 и др.]. Рассматриваемые в литературе полуэмпирические модели фотосферы включают как один компонент (магнитную силовую трубку) с большим градиентом скорости и магнитного поля, так и два (магнитная силовая трубка и немагнитное окружение), либо три компонента (две магнитные силовые трубки и немагнитное окружение). В работах [13, 15, 40, 50, 51, 65] для интерпретации аномальных профилей при моделировании взята суперпозиция двух магнитных компонентов в одном и том же элементе разрешения. В работе [50] сообщается о наблюдениях на телескопе SOT (Solar Optical Telescope) на борту спутника HINODE на внешнем краю полутени аномальных профилей Стокса V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, состоящих из трех долей. Они появились в области высокоскоростного нисходящего фотосферного потока, продолжавшегося примерно 5 мин. Этот поток связан с формированием магнитной движущейся особенности (MMF). Для интерпретации профилей авторы предлагают две модели, одна из которых состоит из двух магнитных компонентов в элементе разрешения, а вторая — из двух магнитных компонентов вдоль линии зрения в слое образования линий. В основном компоненте содержится существовавшее ранее наклонное магнитное поле без значительных движений. Второй компонент содержит высокоскоростной нисходящий поток и вертикально ориентированное магнитное поле. В работе [15] для моделирования полутени пятна использованы данные спектрополяриметра на борту HINODE. Для расчетов авторы использовали программу SIR [42] и брали двухкомпонентную и двухслойную модели. Авторы работы сделали вывод о том, что профили Стокса V линий, состоящие из трех долей, свидетельствуют о наличии в полутени магнитных полей противоположной полярности. Они связаны с нисходящими потоками в глубоких слоях фотосферы и

наблюдаются в основном в средней и внешней полутени. По-видимому, это потоки в арочных магнитных силовых трубках, в низко лежащих петлях. Профили с тремя долями относятся к подножию петель с обратным потоком. Обнаружено, что большая доля выходящего магнитного потока погружается в пределах полутени. В работе [13] сообщается о наблюдениях V -профилей Стокса с несколькими долями в тени пятна во время вспышки. Одновременно с появлением аномальных профилей MDI-магнитограммы и хромосферный источник жесткого рентгена показывают изменение полярности магнитного поля. Для анализа изменений вектора магнитного поля в этом месте авторы работы использовали программу инверсии, предполагающую изменение параметров с высотой в двухкомпонентной модели атмосферы.

В работе [12] было выполнено моделирование фотосферы спокойного участка Солнца с применением подхода МИСМА, описанного в работе [44]. Для вычислений были использованы линии железа 630.15, 630.25, 1564.8 и 1565.3 нм. Модель включала три магнитных компонента с разной напряженностью магнитного поля. Для половины пикселей потребовалась модель со смешанными полярностями в одном элементе разрешения. Из анализа асимметрии профилей Стокса V , наблюдаемых с высоким пространственным разрешением на Sunrise/IMaX на участке сетки спокойного Солнца, в работе [34] обнаружено, что в элементах сетки имеется расширяющаяся с высотой структура с магнитным полем, напряженность которого уменьшается с высотой. Как результат получено заключение, что в реальности конфигурация более сложная, чем просто трубка, расширяющаяся с высотой и окруженная нисходящими потоками.

В работе [1] аномальные профили V фотосферных линий наблюдались в разных местах активной области на спектральном участке около 525 нм на Шведском вакуумном солнечном телескопе со спектрополяриметром (Ла Пальма). Для моделирования фотосферы пятна использована модель, состоящая из трех компонентов. Два из них содержат магнитное поле с разными полярностями в одном элементе разрешения и один немагнитный.

В работе [39] получена последовательность спектров Стокса линий Fe I 630.15 нм и Fe I 630.25 нм невозмущенного участка Солнца вблизи центра диска. Использовался спектрополяриметр POLIS на телескопе VTT (Тенерифе). Линии показали разные полярности, причем профиль Стокса V линии Fe I 630.15 нм оказался аномальным, а профиль линии Fe I 630.25 нм — нормальным. При моделировании использовалась программа SIR [42]. Для интерпретации профилей авторы взяли двухкомпонентную модель атмосферы, включающую немагнитный и магнитный компоненты. Магнитная составляющая состоит из двух магнитных слоев с противоположной полярностью: верхний слой движется вверх, а нижний — вниз. Между этими слоями имеется область повышенной температуры. В результате исследования авторы пришли к выводу о том, что в рассматриваемой ими области произош-

ло фотосферное магнитное пересоединение вследствие конвективной интенсификации.

Профили Стокса V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, полученные из спектрополяриметрических наблюдений на телескопе ТЕМИС для окрестностей маленькой поры в области появления двойственных потоков, содержат от одной до трех долей [27]. В большинстве случаев они имеют две доли одинакового знака и центральную долю противоположного знака. Подобные профили приведены в работе [51]. Автор относит их к категории профилей, относящихся к участкам со смешанными полярностями (mixed-polarity profiles). Профили такой формы могут быть вызваны неразрешенной смесью полярностей и являться суперпозицией асимметричных профилей, относящихся к компонентам разной полярности [28]. Среди наблюдаемых в зоне двойственных потоков аномальных профилей Стокса V имеются также очень редко встречающиеся профили, состоящие из одной доли [27]. Выявлены случаи, когда линии Fe I 630.15 и 630.25 нм показывают разные полярности. Большие различия амплитуды и формы профилей Стокса Q , U , и V в разных пикселях свидетельствуют о неоднородной структуре магнитного поля фотосферы. Наблюдались быстрые изменения этих параметров. В течение наблюдений произошла смена магнитной полярности. В результате анализа изменений со временем профилей Стокса V фотосферных линий установлено, что на рассматриваемом участке активной области происходил выход нового маломасштабного магнитного потока противоположной полярности.

В данной работе приводятся результаты моделирования фотосферы в области выхода магнитного потока и появления двойственных хромосферных потоков. Получены полуэмпирические модели фотосферы.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОТОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ДВОЙСТВЕННЫХ ПОТОКОВ

Для моделирования фотосферы взяты спектры, полученные на телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. в $11^h47^m55^s$, $11^h50^m00^s$, $11^h50^m51^s$, $11^h51^m14^s$, $11^h51^m42^s$. Эти спектры лучшего качества выбраны из последовательности записей участка активной области, на котором наблюдались двойственные хромосферные потоки. Изображения участков спектра, включающих хромосферную линию H и фотосферные линии в области $\lambda = 630.0...630.5$ нм, для момента $11^h50^m51^s$ приведены на рис. 2 в работе [27]. Изучаемая часть активной области отмечена на рисунке вертикальной линией. Она занимает пять пикселей. Первый пиксель соответствует нижнему краю вертикальной линии на рисунке. Участок включает яркую точку в линии H (пиксели 1, 2) и область между ней и порой (пиксели 3, 4, 5). Первый пиксель соответствует пикселю 4 в работе [31]. Двойственные хромосферные потоки появи-

лись в области яркой хромосферной точки в $11^h49^m54^s$. Как установлено в работе [27], они появились в области аномальных профилей Стокса фотосферных линий.

В расчетах моделей для каждого пикселя использованы профили Стокса I , Q , U и V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, а также профили Стокса I линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм. Параметры Q , U , V линий Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм, имеющих малую магнитную чувствительность, очень малы и не превышают ошибок наблюдений. Характеристики используемых для моделирования линий приведены в таблице в работе [27]. При вычислениях применялся метод инверсии, использовалась программа SIR (Stokes Inversion based on Response functions) [42]. В программе принято условие локального термодинамического равновесия. Она позволяет получить как термодинамические параметры, так и характеристики магнитного поля. Сначала была сделана попытка рассчитать профили линий с однокомпонентной моделью фотосферы, однако она не удалась.

Следует отметить, что и в других работах, например [1, 40], однокомпонентная модель не позволила дать хорошее согласие вычисленных и наблюдаемых аномальных профилей. Как отмечено выше, большинство рассматриваемых в данной работе профилей Стокса V относится к категории профилей, относящихся к участкам со смешанной полярностью (mixed-polarity profiles). Они, по-видимому, представляют собой суперпозицию двух асимметричных профилей, относящихся к компонентам противоположной магнитной полярности, находящихся в одном и том же элементе разрешения (пикселе) [13, 15, 41, 51]. В работах [15, 28] получено, что профили с тремя долями можно описать моделью с магнитными компонентами разной полярности. Поэтому в данной работе принята модель, включающая два компонента: две тонкие магнитные силовые трубки с магнитными потоками разной полярности. В качестве исходной модели каждого компонента в расчетах принята Гарвардско — Смитсоновская модель фотосферы HSRA [18]. Напряженность магнитного поля, микро- и макротурбулентная скорости и фактор заполнения (доля площади, занимаемая каждым компонентом) предполагались постоянными с глубиной. Для магнитного потока в первом компоненте принималась отрицательная полярность, во втором — положительная. Исходное значение макротурбулентной скорости принималось равным 1.5 км/с, макротурбулентной скорости — 0.6 км/с, напряженности магнитного поля — 0.01 Тл. При расчетах проводилось согласование наблюдаемых и вычисленных профилей линий до их лучшего совпадения.

На рис. 1 в качестве примера согласования наблюдаемых и вычисленных параметров Стокса I , Q , U и V приведены профили Fe I 630.15 и 630.25 нм для момента $11^h47^m55^s$.

В результате вычислений получены зависимости от высоты температуры, лучевой скорости, азимутального угла и угла наклона вектора магнитного поля в магнитных силовых трубках. При вычислении

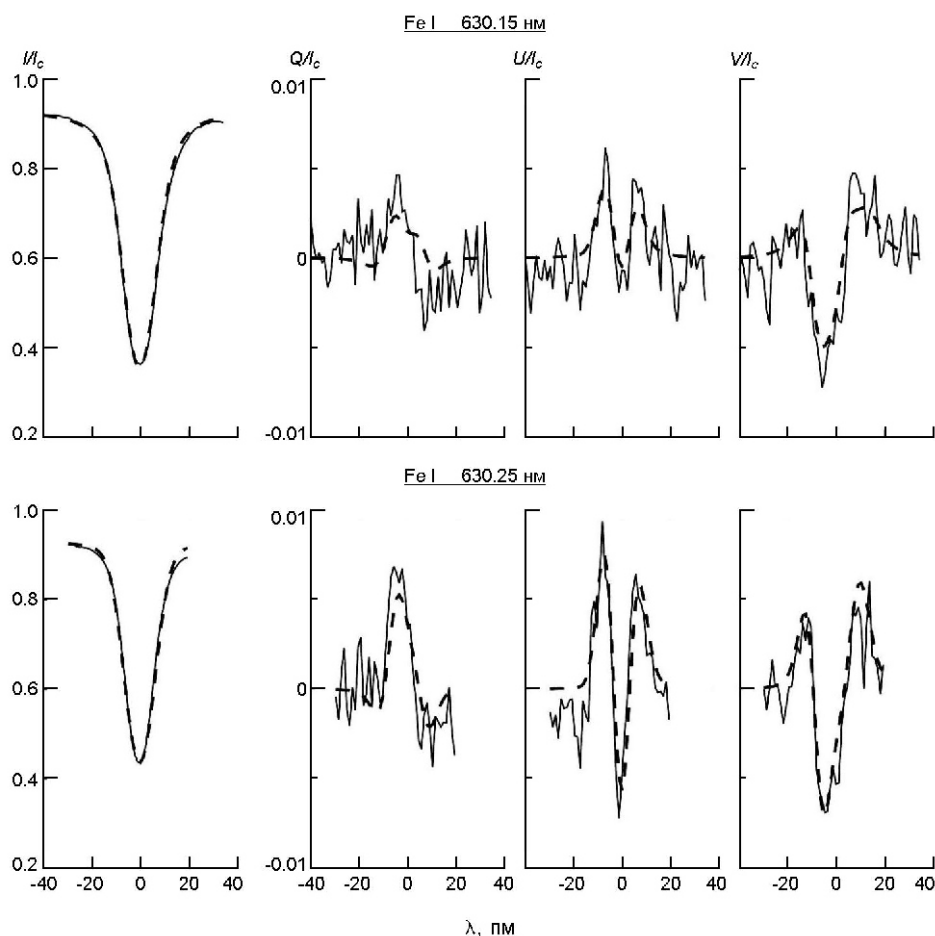


Рис. 1. Наблюдаемые (сплошные линии) и вычисленные (штриховые линии) профили Стокса I , Q , U и V линий Fe I 630.15 нм (верхний ряд) и Fe I 630.25 нм (нижний ряд) для первого пикселя в $11^{\text{h}}47^{\text{m}}55^{\text{s}}$

ях для температуры и лучевой скорости в большинстве случаев выбрано три узла, для углов вектора магнитного поля — не более двух. Узлы равномерно распределены по сетке оптических глубин в логарифмической шкале [42]. Ошибки температуры, напряженности магнитного поля и лучевой скорости составляют в среднем ± 100 К, 0.02 Тл и 0.3 км/с соответственно. Они определялись из расчетов, принимая во внимание точность наблюдаемых профилей линий.

На рис. 2—6 приведены зависимости температуры T , лучевой скорости $V_{\text{луч}}$, угла наклона вектора магнитного поля и азимутального угла вектора магнитного поля от высоты в моделях трубок для каждого пикселя 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 колонке *a* даны параметры компонента моделей с отрицательной полярностью магнитного поля, в колонке *b* — с положительной полярностью. Все параметры моделей изменяются со временем.

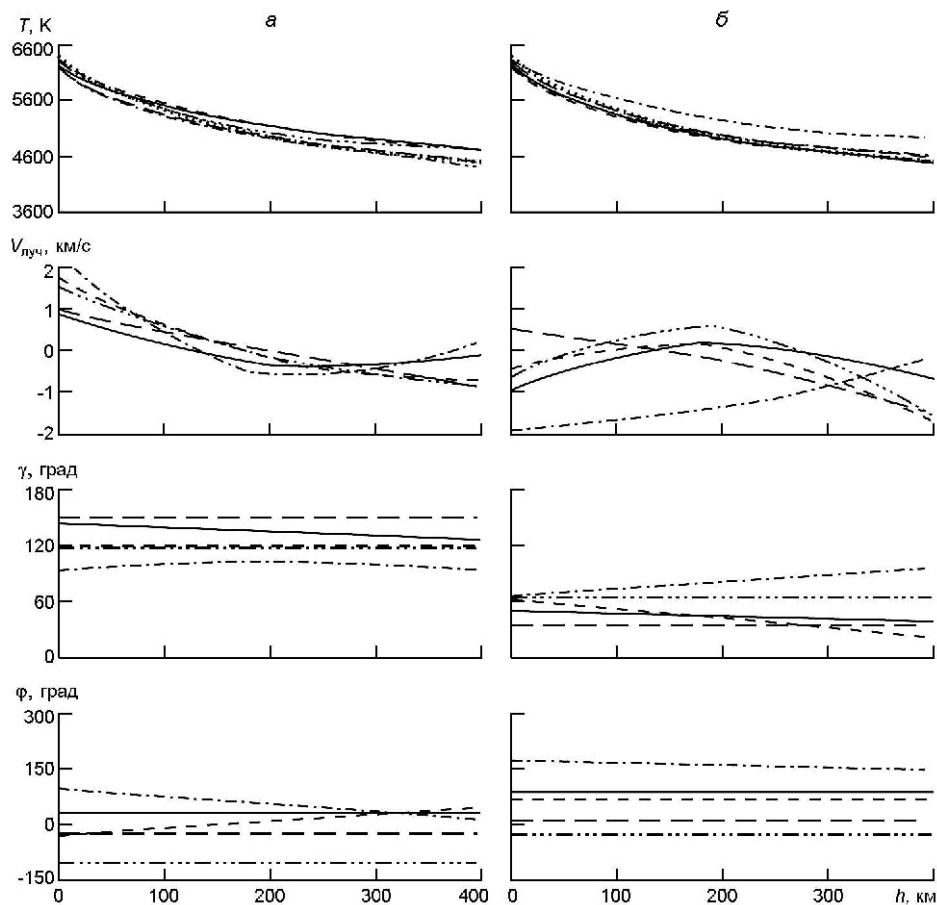


Рис. 2. Зависимости температуры T , лучевой скорости $V_{\text{луч}}$, угла наклона вектора магнитного поля и азимутального угла вектора магнитного поля от высоты h для первого пикселя в первом (а) и втором (б) компонентах модели для разных моментов времени: сплошные линии — $11^{\text{h}}47^{\text{m}}55^{\text{s}}$, короткие штрихи — $11^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}}$, штрих-пунктирные — $11^{\text{h}}50^{\text{m}}51^{\text{s}}$, штриховые линии с тремя точками — $11^{\text{h}}51^{\text{m}}14^{\text{s}}$, длинные штрихи — $11^{\text{h}}51^{\text{m}}42^{\text{s}}$, пунктир — температура из модели невозмущенной фотосферы HSRA. Положительные значения лучевой скорости соответствуют направлению движения вещества от наблюдателя

В полученных моделях значения температуры в верхних слоях фотосферы выше, чем соответствующие значения температуры в рамках модели невозмущенной фотосферы. В некоторых случаях увеличение температуры относительно ее значений для невозмущенной фотосферы достигает 400 К. Температурное распределение с высотой в трубках изменяется со временем. Учет влияния отклонений от локального термодинамического равновесия может привести к изменению полученных значений температуры не более чем на 200 К [48]. Лучевые скорости изменяются в пределах ± 2 км/с. В большинстве случаев в нижних слоях фотосферы преобладают нисходящие потоки, а в верхних — восходящие. Распределения лучевой скорости с высотой для каждого пикселя различны в разные моменты наблюдений. Азиму-

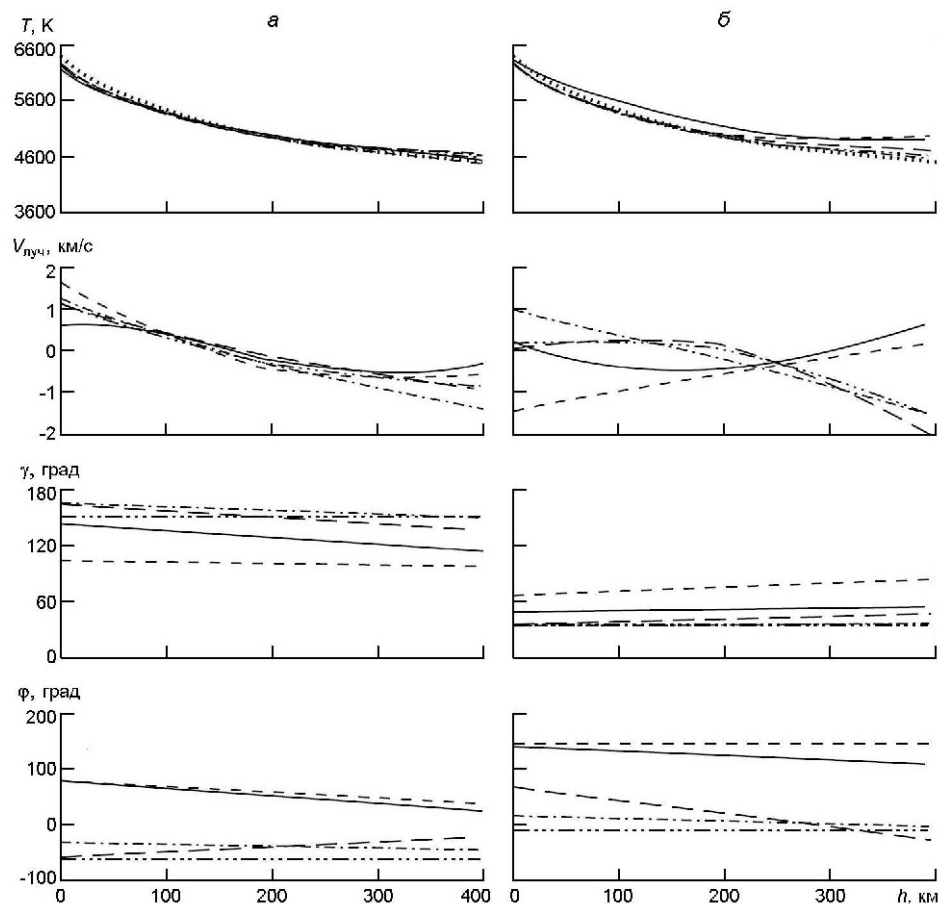


Рис. 3. То же для второго пикселя

тальный угол вектора магнитного поля больше для второго компонента.

В таблице приведены значения напряженности магнитного поля, макротурбулентной скорости и фактора заполнения для компонентов моделей. Эти параметры также изменяются со временем.

В первый момент, $11^h 47^m 55^s$, профили Стокса V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм — аномальные, состоят из трех долей (3-lobes profiles). Помимо обычного профиля, состоящего из двух долей, имеется внешняя доля в коротковолновом крыле. Наблюдается и линейная поляризация. Профили Стокса Q и U имеют сложную форму. Напряженность магнитного поля в двух компонентах моделей для первых трех пикселей примерно одинакова (0.06...0.07 Тл), факторы заполнения примерно равны. Близки по величине также значения угла наклона вектора магнитного поля. Макротурбулентная скорость немного больше ее исходной величины. В моделях для четвертого и пятого пикселей, ближе к поре, значения напряженности больше (на 0.03...0.05 Тл) в первом компоненте с отрицательной полярностью магнитного потока, фактор

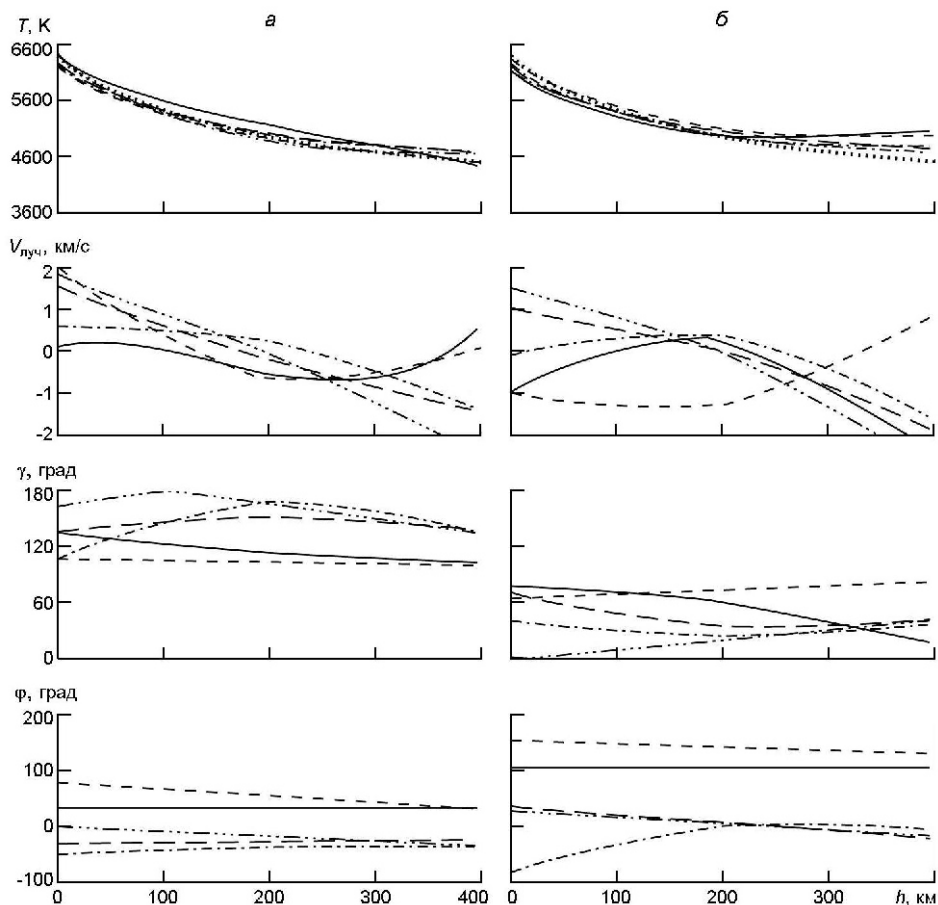


Рис. 4. То же для третьего пикселя

заполнения 0.3, угол наклона вектора магнитного поля немного больше, чем в первых трех пикселях. Макротурбулентная скорость немного меньше ее исходной величины. Во втором компоненте всех моделей напряженность магнитного поля не превышает 0.069 Тл.

Температура в большинстве случаев в глубоких слоях меньше ее значений в модели спокойной фотосферы, а в средних и верхних — больше. Во втором — четвертом пикселях увеличение температуры больше во втором компоненте моделей и достигает 300...500 К в верхних слоях. В нижних слоях фотосферы в первом компоненте модели показывают нисходящие, а во втором компоненте — восходящие потоки. Подъем вещества преобладает и в верхних слоях второго компонента.

В $11^h49^m54^s$ в области яркой хромосферной точки (пиксели 1...3) появились двойственные хромосферные потоки. К $11^h50^m00^s$ профили Стокса Q , U и V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм изменились по сравнению с профилями для первого момента. Увеличилась амплитуда внешней доли профилей V . Сильно изменились профили Стокса Q и U .

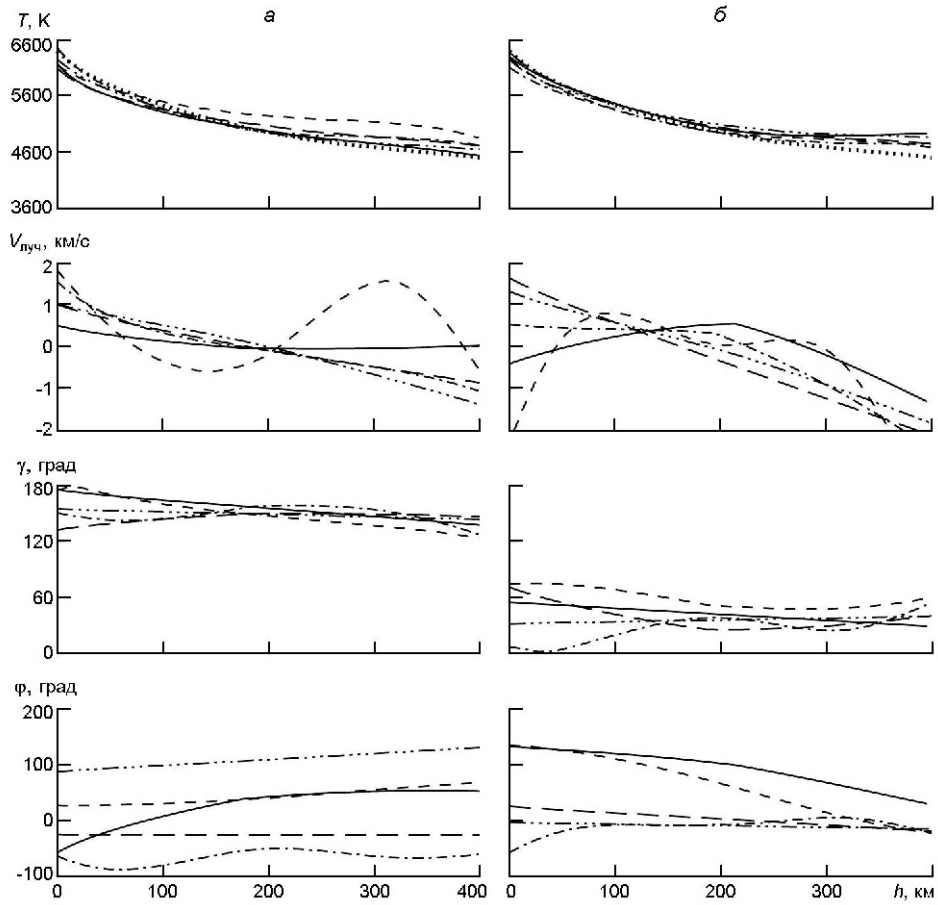


Рис. 5. То же для четвертого пикселя

Напряженность магнитного поля в первом компоненте моделей уменьшилась. В первых трех пикселях она составляет 0.041...0.048 Тл. Для второго и третьего пикселей модели показывают небольшое увеличение напряженности (на 0.02...0.03 Тл) во втором компоненте. В этих пикселях уменьшился угол наклона вектора магнитного поля в первом компоненте и увеличился во втором компоненте. В результате его значения приблизились к 90° , что соответствует горизонтальному магнитному полю. В нижних слоях фотосферы движения в компонентах моделей имеют противоположное направление. В первом компоненте вещество опускается, во втором — поднимается. В верхних слоях направление движения различается в разных пикселях.

В третий момент, в $11^h 50^m 51^s$, увеличилась эмиссия в длинноволновом крыле линии H. Двойственные хромосферные потоки охватили область ближе к поре. В четвертом и пятом пикселях два компонента линии H четко выделяются. Для четвертого и пятого пикселей фотосферные модели показывают увеличение напряженности на 0.03...0.04 Тл по сравнению с ее значениями в предыдущий момент. Увели-

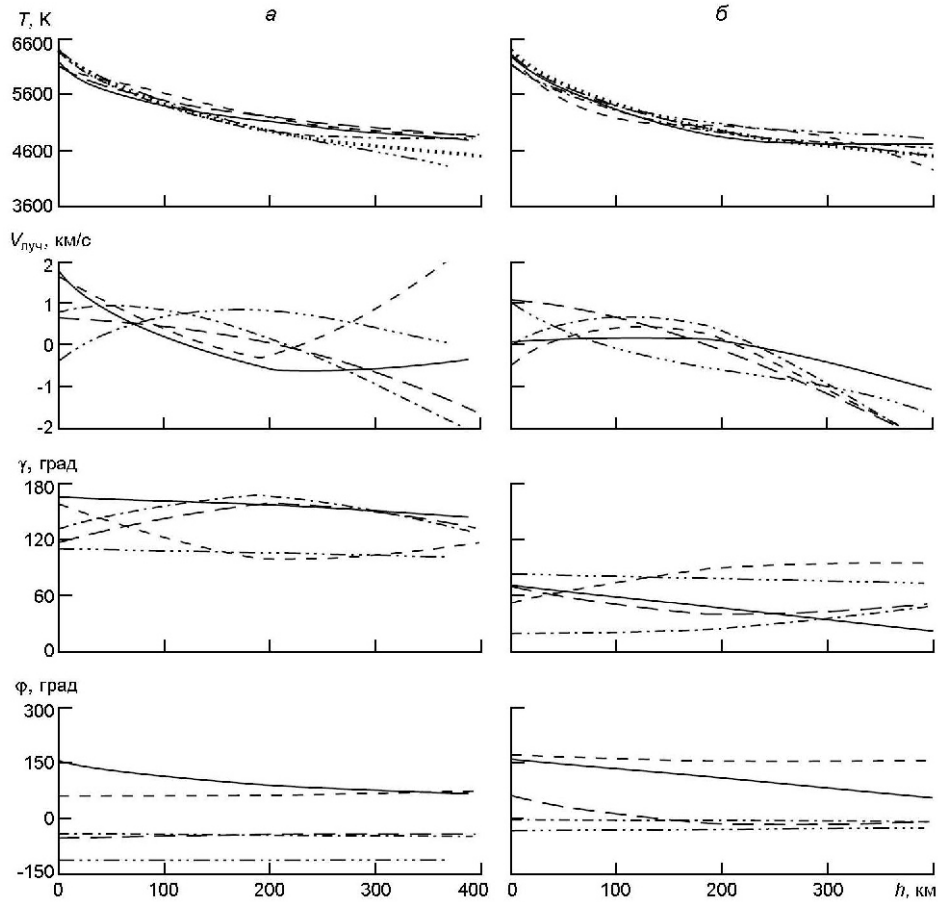


Рис. 6. То же для пятого пикселя

чение напряженности на 0.03, 0.05 Тл отмечается в первом компоненте для второго и третьего пикселей. В $11^h50^m51^s$ профили Стокса V линий Fe I 630.15 и 630.25 нм во втором пикселе и линии Fe I 630.15 нм в третьем пикселе состоят из одной доли в коротковолновом крыле. В области формирования линии Fe I 630.25 нм в третьем и четвертом пикселях к этому моменту произошла смена полярности магнитного поля, полярность стала положительной. Угол наклона вектора магнитного поля близок к 90° лишь в первом пикселе. Фактор заполнения компонента с положительной полярностью во втором — пятом пикселях превышает фактор заполнения компонента с отрицательной полярностью. Температура немного изменилась по сравнению с ее значениями в предыдущий момент. Модели показывают, что с этого момента изменилось направление движения в нижних слоях второго компонента. В нижних слоях компонентов моделей преобладают нисходящие, а в верхних слоях — восходящие потоки.

В $11^h51^m14^s$ все профили линии H в рассматриваемых пикселях однокомпонентные, область двойственных потоков сместилась к по-

Напряженность магнитного поля (B), макротурбулентная скорость ($V_{\text{макро}}$) и фактор заполнения (f) для двух компонентов (I и II) моделей в пяти пикселях

Время	B , Тл		$V_{\text{макро}}$, км /с		f	
	I	II	I	II	I	II
Пиксель № 1						
11 ^h 47 ^m 55 ^s	0.076	0.069	1.63	1.77	0.52	0.48
11 ^h 50 ^m 00 ^s	0.048	0.028	1.77	2.19	0.43	0.57
11 ^h 50 ^m 51 ^s	0.032	0.054	1.68	2.20	0.69	0.31
11 ^h 51 ^m 14 ^s	0.051	0.048	1.71	2.04	0.40	0.60
11 ^h 51 ^m 42 ^s	0.070	0.059	1.81	1.99	0.42	0.58
Пиксель № 2						
11 ^h 47 ^m 55 ^s	0.077	0.067	1.70	1.92	0.46	0.54
11 ^h 50 ^m 00 ^s	0.041	0.086	1.88	2.17	0.68	0.32
11 ^h 50 ^m 51 ^s	0.071	0.065	1.74	1.85	0.43	0.57
11 ^h 51 ^m 14 ^s	0.089	0.067	1.76	2.02	0.38	0.62
11 ^h 51 ^m 42 ^s	0.091	0.072	1.75	1.91	0.36	0.64
Пиксель № 3						
11 ^h 47 ^m 55 ^s	0.064	0.054	1.53	1.79	0.37	0.63
11 ^h 50 ^m 00 ^s	0.041	0.084	1.86	2.15	0.67	0.33
11 ^h 50 ^m 51 ^s	0.090	0.075	1.65	1.78	0.47	0.53
11 ^h 51 ^m 14 ^s	0.081	0.089	1.50	1.46	0.42	0.58
11 ^h 51 ^m 42 ^s	0.113	0.091	1.47	1.78	0.36	0.64
Пиксель № 4						
11 ^h 47 ^m 55 ^s	0.097	0.064	1.28	1.71	0.34	0.66
11 ^h 50 ^m 00 ^s	0.104	0.062	1.23	1.66	0.32	0.68
11 ^h 50 ^m 51 ^s	0.105	0.094	1.49	1.59	0.42	0.58
11 ^h 51 ^m 14 ^s	0.107	0.101	1.48	1.51	0.43	0.57
11 ^h 51 ^m 42 ^s	0.113	0.119	1.23	1.45	0.51	0.49
Пиксель № 5						
11 ^h 47 ^m 55 ^s	0.126	0.059	1.34	1.95	0.30	0.70
11 ^h 50 ^m 00 ^s	0.084	0.063	1.73	2.12	0.46	0.54
11 ^h 50 ^m 51 ^s	0.122	0.100	1.34	1.44	0.45	0.55
11 ^h 51 ^m 14 ^s	0.120	0.120	2.14	2.00	0.38	0.62
11 ^h 51 ^m 42 ^s	0.143	0.108	1.26	1.64	0.48	0.52

ре. Профиль V линии Fe I 630.15 нм для первых трех пикселей имеет одну долю в коротковолновом крыле. В большинстве случаев напряженность магнитного поля мало изменилась по сравнению с ее значениями в предыдущий момент. Изменение напряженности магнитного поля не превышает 0.02 Тл. Увеличился фактор заполнения второго компонента моделей. Из анализа профилей V линий в работе [27] сделан вывод о том, что выходящим магнитным потоком положительной полярности к этому моменту охвачены четыре первых пикселя в области формирования линии Fe I 630.25. Смена полярности произошла в области формирования линии Fe I 630.25 нм в первом, втором и четвертом пикселях и в области формирования линии Fe I 630.15 нм в третьем пикселе. В пятом пикселе ориентация магнитного поля близка к горизонтальной. Во втором — четвертом пикселях измене-

ния невелики. Фактор заполнения второго компонента больше. Как и в предыдущий момент, в нижних слоях преобладают нисходящие, а в верхних — восходящие потоки. В первом компоненте избыток температуры не превышает 100...150 К. Во втором компоненте в третьем-пятом пикселях он достигает 300 К.

В $11^h51^m42^s$ профили Стокса V обеих линий для первых трех пикселей показывают положительную полярность магнитного поля. 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. Изменения напряженности магнитного поля и факторов заполнения в моделях невелики. Напряженность магнитного поля немного увеличилась. Угол наклона вектора магнитного поля в первом компоненте изменяется в пределах $120^\circ \dots 160^\circ$, а во втором компоненте — от 35° до 70° . Фактор заполнения второго компонента больше, как и в предыдущий момент. Распределение лучевой скорости по глубине имеет тот же характер, что и в предыдущие моменты. Модели показывают в нижних слоях нисходящие движения, а в верхних — восходящие потоки. Для четвертого и пятого пикселей ближе к поре получены наибольшие значения напряженности магнитного поля и наименьшие значения макротурбулентной скорости.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [27] получены свидетельства выхода нового мелкомасштабного потока в изучаемой области появления двойственных хромосферных потоков и аномальных профилей Стокса. В данной работе изучено изменение состояния фотосферы. Выполнено моделирование фотосферы в области яркой хромосферной точки, где появились двойственные хромосферные потоки. Полученные полуэмпирические модели, состоящие из двух компонентов с разными полярностями магнитного потока, позволили хорошо согласовать вычисленные и наблюдаемые в этой области аномальные профили Стокса V фотосферных линий.

Физическое состояние фотосферы во флоккулах, в которых наблюдались аномальные профили, изучено ранее в работах [1, 40, 65]. В работе [1] для небольшого флоккула авторы взяли двухкомпонентную модель с одним магнитным компонентом и нашли, что напряженность магнитного поля менее 0.09 Тл. Для инверсии профилей Стокса V необычной формы, наблюдаемых во флоккулах и сетке спокойного Солнца, в работе [65] взята модель, состоящая из двух компонентов с разной напряженностью магнитного поля. В одном из компонентов поле сильное с напряженностью 0.2 Тл, во втором — примерно 0.04 Тл той же полярности и содержит 1...2 % общего потока в элементе разрешения. Авторы считают также возможным, что второй компонент может

иметь поле противоположной полярности с напряженностью 0.07...0.08 Тл и долей 3...7 %. Для объяснения природы второго компонента авторы привлекают модель обратного потока, когда небольшая часть силовых линий магнитного поля возвращается на солнечную поверхность вблизи трубки [16, 36]. В работе [40] также интерпретированы аномальные профили Стокса V инфракрасных линий Fe I 1564.85 и 1565.29 нм в области флоккулов с помощью моделей с двумя магнитными компонентами (магнитными силовыми трубками). Для согласования вычисленных и наблюдаемых профилей сложной формы авторам понадобилось принять значение напряженности магнитного поля в основании фотосферы в одной из трубок равным 0.15...0.17 Тл, а во второй трубке $-0.06...-0.105$ Тл. Оказалось, что доля потока большей напряженности (0.14...0.17 Тл) близка к 90 %, что может свидетельствовать о сильной концентрации мелкомасштабных магнитных полей. Было получено, что макротурбулентная скорость равна 2 км/с, факторы заполнения изменяются в пределах от 2 до 24 %.

В предыдущей работе [27] сообщается также и о наблюдениях в области двойственных потоков профилей V Стокса, имеющих одну долю в коротковолновом крыле линий Fe I 630.15 и 630.25 нм. Эти профили встречаются в первых трех пикселях в $11^h50^m51^s$ и $11^h51^m14^s$ перед сменой полярности магнитного поля. Их появление сопровождалось увеличением эмиссии в длинноволновом крыле линии H .

Однодольные V -профили впервые наблюдались в исследовании [52] в спокойных и активных участках Солнца, в области выходящего магнитного потока. Согласно этой работе в спектрах разных мест Солнца профили имели одну долю или в коротковолновом или в длинноволновом крыле. Впоследствии однодольные профили были изучены в работах [17, 20, 26, 33, 37, 43, 49, 51, 61]. Результаты работ [17, 20, 26, 37, 49], в которых выполнено численное 2D- и 3D-МГД-моделирование магнитоконвекции, показывают, что такие профили могут формироваться при неоднократной смене полярности магнитного поля вдоль луча зрения при наличии градиента скорости. Модель микроструктурированной магнитной атмосферы (MISMA) [44, 45], состоящей из ансамбля оптически тонких магнитных элементов, погруженных в среду без магнитного поля, также может объяснить однодольные профили Стокса V . Эта модель применяется в работе [63] для интерпретации асимметрии профилей Стокса линий Fe I 630.15 и 630.25 нм, наблюдаемых в сетке и межсеточных областях спокойного Солнца с помощью телескопа SOT/SP на спутнике Hinode. В результате инверсии найдено, что 25 % профилей относятся к пикселям, в которых сосуществуют как положительная, так и отрицательная полярности. Эти пиксели расположены либо на границах между участками противоположной полярности, либо в невозмущенных областях. В работе [20] для описания однодольных V -профилей Стокса, наблюдаемых в спокойных участках Солнца, анализировались несколько простых моделей атмосферы с разными конфигурациями магнитного по-

ля и потока с большими градиентами на границе раздела. Получен вывод, что модель трубки, внедренной в немагнитную атмосферу, может объяснить такие профили, но не исключаются и другие возможные механизмы. Так, авторы подчеркивают значительную роль температурного распределения, в том числе для образования V -профилей с одной долей.

В работе [41] высказано предположение, что аномальные профили Стокса V могут наблюдаться при наличии мелкомасштабного сифонного потока вдоль петли, соединяющей силовые трубки по обе стороны от нейтральной линии магнитного поля. Авторы работ [38, 61] также считают, что появление однодольных профилей Стокса V может быть вызвано сифонным потоком вдоль магнитной петли. В работе [38] изучено изменение фотосферных физических параметров с оптической глубиной в области однодольных профилей с помощью метода инверсии с использованием программы SIR. По предположению авторов работы физический механизм, который наилучшим образом объясняет предполагаемую конфигурацию магнитного поля и движения потока, представляет собой сифонный поток вдоль дугообразной трубки магнитного потока. Подобные сифонные потоки в арочных силовых трубках предсказаны в работах [9, 57, 58].

В работе [51] для объяснения аномальных профилей Стокса V фотосферных линий в сетке и флоккулах предложены две модели. Одна из них содержит смесь килогауссовых силовых трубок и субкилогауссового поля, а вторая — обратный поток в виде слабых полей, окружающих изолированные силовые трубки, а также на краях скоплений силовых трубок. Предположение о наличии слабых полей противоположной полярности, окружающих магнитные силовые трубки с килогауссовыми полями, сделано также в работах [3, 16, 35, 47, 65]. Подобная конфигурация магнитного поля наблюдалась в области выходящего магнитного потока [52]. В работе [43] для анализа аномальных профилей Стокса V для спокойного участка Солнца, содержащих одну долю, были использованы как метод инверсии с учетом больших градиентов скорости и напряженности магнитного поля, так и трехмерное численное моделирование магнитоконвекции. Оба подхода позволили получить хорошее согласие вычисленных и наблюдаемых профилей. Был сделан вывод о том, что большинство однодольных профилей Стокса V появляются при выходе или погружении магнитного потока. Они локализуются в подножиях магнитных петель. Подобный вывод сделан и в работе [61] из анализа наблюдений на SP/SOT (спектрополяриметр SOT на борту Hinode) выхода петель, имеющих форму буквы Γ . Авторы работы выявили большое количество однодольных профилей Стокса V и предложили рассматривать появление подобных профилей как спектрополяриметрическое проявление выхода магнитных петель. Сценарии выхода очень маленьких (размера гранулы) петель описаны в работах [5, 6, 19, 33, 60]. Отмечается, что освобождение энергии при магнитных пересоединениях вследствие взаи-

модействия выходящего маломасштабного потока с магнитным полем активной области вызывает прогрев окружающей хромосферы. О наблюдениях выходящих мелкомасштабных, порядка 2 и меньше, короткоживущих структур с горизонтальным магнитным полем сообщается и в работах [8, 23, 24]. В работе [21] наблюдалось большое (до 90°) изменение азимутального угла вектора магнитного поля при выходе нового магнитного биполя. Модели, полученные в данной работе, также показывают значительные изменения азимутального угла и угла наклона вектора магнитного поля в магнитных силовых трубках выходящего магнитного потока. Значения напряженности магнитного поля находятся в пределах значений напряженности при выходе магнитного потока, полученных в работах [2, 32, 64].

Следует отметить, что в изучаемой в данной работе активной области NOAA 11024 в день наблюдений на телескопе THEMIS происходил основной выход магнитного потока на малых и больших масштабах [59, 60]. «Змеевидное» магнитное поле появлялось в виде небольших биполярных фрагментов между основными полярностями. Появившиеся змеевидные силовые линии взаимодействовали с крупномасштабным магнитным полем активной области. По-видимому, рассматриваемое в данной работе событие выхода нового мелкомасштабного магнитного потока противоположной полярности является эпизодом змеевидного выхода магнитного поля. Оно сопровождалось динамичной эволюцией мелкомасштабного магнитного поля, прогревом фотосферных слоев активной области, появлением двойственных хромосферных потоков. Согласно полученным моделям в зоне выхода нового магнитного потока находился ансамбль магнитных силовых трубок, обладающих отличающимися термодинамическими и магнитными параметрами.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты моделирования фотосферы на участке появления двойственных хромосферных потоков в активной области NOAA 11024. Для вычислений использованы профили Стокса фотосферных линий железа и титана, полученные из спектрополяриметрических наблюдений на франко-итальянском телескопе THEMIS. Полуэмпирические модели, состоящие из двух магнитных компонентов с разными полярностями, получены методом инверсии с помощью программы SIR при условии локального термодинамического равновесия. Они позволили хорошо описать аномальные профили фотосферных линий. Модели показывают, что все физические параметры фотосферы в магнитных трубках изменяются со временем. Увеличение температуры в верхних слоях может достигать 400 К. Напряженность магнитного поля изменяется в пределах от 0.03 до 0.13 Тл, лучевая скорость — в пределах ± 2 км/с. Полученные модели показывают,

что в нижних слоях фотосферы преобладали нисходящие потоки, а в верхних слоях — восходящие. Макротурбулентная скорость больше во втором компоненте моделей.

Обобщая результаты предыдущих работ [27, 31] и настоящей работы, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемой области в окрестности маленькой поры во время наблюдений на телескопе THEMIS происходил выход нового мелкомасштабного магнитного потока противоположной полярности. Об этом свидетельствует анализ временных изменений аномальных профилей Стокса V фотосферных линий и смена полярности магнитного потока [27]. Результаты моделирования свидетельствуют о сильной мелкомасштабной неоднородности фотосферы и динамичной эволюции магнитного поля и поля скоростей в зоне выхода нового магнитного потока. Микровспышка, которая возникла вблизи этого участка через 12 мин, возможно, вызвана выходом нового магнитного потока и его магнитными пересоединениями с магнитным полем активной области.

Автор благодарит Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за помощь с спектрополяриметрическими наблюдениями, Р. И. Костыка за предоставленные программы обработки данных, авторов программы SIR, использованной в работе.

1. 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.
2. Brants J. J. High-resolution spectroscopy of active regions. III — Relations between the intensity, velocity, and magnetic structure in an emerging flux region. *Solar Phys.* 1985. 98. P. 197—217.
3. Büehler D., Lagg A., Solanki S. K., van Noort M. Properties of solar plage from a spatially coupled inversion of Hinode SP data. *Astron. and Astrophys.* 2015. 576. id. A27. 19 p.
4. Carroll T. A., Kopf M. The meso-structured magnetic atmosphere. A stochastic polarized radiative transfer approach. *Astron. and Astrophys.* 2007. 468. N 1. P. 323—339.
5. Centeno R., Blanco Rodríguez J., Del Toro Iniesta, 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.
6. Centeno R., Socas-Navarro H., Lites B., et al. Emergence of small-scale magnetic loops in the quiet-Sun internetwork. *Astrophys. J.* 2007. 666. N 2. P. L137—L140.
7. Choudhary D. P., Balasubramaniam K. S. Multiheight properties of moving magnetic features. *Astrophys. J.* 2007. 664, N 2. P. 1228—1233.
8. Danilovic S., Beeck B., Pietarila A., et al. Transverse component of the magnetic field in the solar photosphere observed by SUNRISE. *Astrophys. J. Lett.* 2010. 723. N 2. P. L149—L153.
9. Degenhardt D. Stationary siphon flows in thin magnetic flux tubes. II — Radiative heat exchange with the surroundings. *Astron. and Astrophys.* 1991. 248. N. 2. P. 637—646.
10. Deinzer W., Hensler G., Schüssler M., Weisshaar E. Model calculations of magnetic flux tubes. I. Equations and method. *Astron. and Astrophys.* 1984. 139. N. 2. P. 426—434.

11. Deinzer W., Hensler G., Schüssler M., Weisshaar E. Model calculations of magnetic flux tubes. II. Stationary results for solar magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 1984. 139. N. 2. P. 435—449.
12. Domínguez Cerdeña I., Sánchez Almeida J., Kneer F. Quiet Sun magnetic fields from simultaneous inversions of visible and infrared spectropolarimetric observations. *Astrophys. J.* 2006. 646. N 2. P. 1421—1435.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Frazier E. N., Stenflo J. O. On the small-scale structure of solar magnetic fields. *Solar Phys.* 1972. 27. N 2. P. 330—346.
17. 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.
18. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y. The Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere. *Solar Phys.* 1971. 18. N 3. P. 347—365.
19. Gomory P., Beck C., Balthasar H., et al. Magnetic loop emergence within a granule. *Astron. and Astrophys.* 2010. 511. id. A14, 10 p.
20. Grossmann-Doerth U., Schüssler 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.
21. Guglielmino S. L., Martínez Pillet V., Bonet J. A., et al. The frontier between small-scale bipoles and ephemeral regions in the solar photosphere: emergence and decay of an intermediate-scale bipole observed with SUNRISE/IMaX. *Astrophys. J.* 2012. 745. N 2, article id. 160, 12 p.
22. Hasan S. S. Convective instability in a solar flux tube. II. Nonlinear calculations with horizontal radiative heat transport and finite viscosity. *Astron. and Astrophys.* 1985. 143. N. 1. P. 39—45.
23. Ishikawa R., Tsuneta S. Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2009. 495. P. 607—612.
24. Ishikawa R., Tsuneta S., Ichimoto K., et al. Transient horizontal magnetic fields in solar plage regions. *Astron. and Astrophys.* 2008. 481. P. 25—28.
25. 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.
26. 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.
27. Kondrashova N. N. Abnormal Stokes profiles of the photospheric lines in the region of chromospheric dual flows in the surroundings of a solar pore. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2018. 34. N 2. P. 53—67.
28. 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.
29. Lagg A., Solanki S. K., Doerr H.-P., et al. Probing deep photospheric layers of the quiet Sun with high magnetic sensitivity. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. id. A6. 13 p.

30. 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.
31. 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. 25—40.
32. Lites B. W., Skumanich A., Martínez Pillet V. Vector magnetic fields of emerging solar flux. I. Properties at the site of emergence. *Astron. and Astrophys.* 1998. 333. P. 1053—1068.
33. Martínez González M. J., Bellot Rubio L. R. Emergence of small-scale magnetic loops through the quiet solar atmosphere. *Astrophys. J.* 2009. 700. N 2. P. 1391—1403.
34. Martínez González M. J., Bellot Rubio L. R., Solanki S. K., et al. Resolving the internal magnetic structure of the solar network. *Astrophys. J. Lett.* 2012. 758: L40. 5 p.
35. Narayan G. Transient downflows associated with the intensification of small-scale magnetic features and bright point formation. *Astron. and Astrophys.* 2011. 529. id. A79. 12 p.
36. Osherovich V. A. A new magneto-hydrostatic theory of sunspots. *Solar Phys.* 1982. 77. P. 63—68.
37. Ploner S. R. O., Schüssler 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.
38. Quintero Noda C., Borrero J. M., Orozco Suárez D., Ruiz Cobo B. High speed magnetized flows in the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2014. 569. id. A73. 13 p.
39. Rezaei R., Schlichenmaier R., Schmidt W., Steiner O. Opposite magnetic polarity of two photospheric lines in single spectrum of the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2007. 469. N 1. P. L9—L12.
40. Rüedi 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.
41. Rüedi 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.
42. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles. *Astrophys. J.* 1992. 398. P. 375—385.
43. 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. 748:38. 23 p.
44. Sánchez Almeida J., Landi Degl'Innocenti E., Martínez Pillet V., Lites B. W. Line asymmetries and the microstructure of photospheric magnetic fields. *Astrophys. J.* 1996. 466. P. 537—548.
45. Sánchez 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.
46. 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.
47. Scharmer G. B., de la Cruz Rodríguez J., Sütterlin 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.
48. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres. *Astrophys. J.* 2001. 550. N 2. P. 970—990.
49. Sheminova V. A. On the origin of the extremely asymmetric Stokes V profiles in an inhomogeneous atmosphere. *arXiv:0902.2940.* 2005. P. 1—23.

50. 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.
51. 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.
52. Sigwarth M., Balasubramaniam K. S., Knölker M., Schmidt W. Dynamics of solar magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 1999. 349. P. 941—955.
53. Spruit H. C. Convective collapse of flux tubes. *Solar Phys.* 1979. 61. P. 363—378.
54. Steiner O., Pneuman G. W., Stenflo J. O. Numerical models for solar magnetic fluxtubes. *Astron. and Astrophys.* 1986. 170. N. 1. P. 126—137.
55. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Phys.* 1973. 32. P. 41—63.
56. Stenflo J. O. Small-scale solar magnetic fields. / Basic Mechanisms of Solar Activity (Proceedings from IAU Symposium N. 71 held in Prague, Czechoslovakia, 25-29 August 1975) / Eds V. Bumba and J. Kleczek. International Astronomical Union. Symposium N. 71. Dordrecht — Holland. Boston: D. Reidel Pub. Co., 1976. P. 69—99.
57. Thomas J. H. Siphon flows in isolated magnetic flux tubes. *Astrophys. J.* 1988. 333. Part 1. P. 407—419.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. Viticchié B. On the polarimetric signature of emerging magnetic loops in the quiet Sun. *Astrophys. J. Lett.* 2012. 747. N 2. article id. L36. 5 p.
62. Viticchié B., Sánchez 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.
63. Viticchié B., Sánchez Almeida J., Del Moro D, Berrilli F. Interpretation of HINODE SOT/SP asymmetric Stokes profiles observed in the quiet Sun network and internetwork. *Astron. and Astrophys.* 2011. 526. id. A60. 13 p.
64. 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.
65. Zayer I., Solanki S. K., Stenflo J. O. The internal magnetic field distribution and the diameters of solar magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 1989. 211. N. 2. P. 463—475.

Статья поступила в редакцию 01.03.2018

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. II. ФОТОСФЕРНІ МОДЕЛІ**

Представлено термодинамічні параметри та параметри фотосферного магнітного поля в області хромосферних подвійних потоків в околі невеликої пори в активній

області NOAA 11024. Подвійні потоки, які з'явилися в області аномальних профілів Стокса V фотосферних ліній, були пов'язані з виходом нового маломасштабного магнітного потоку позитивної полярності. Напівемпіричні фотосферні моделі отримано методом інверсії за допомогою програми SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta. *Astrophys. J.* 1992. 398. P. 375]. Кожна модель містить два компоненти: дві тонкі трубки магнітного потоку різної полярності. У першому компоненті магнітний потік має негативну полярність, у другому — позитивну. Для моделювання використано профілі Стокса фотосферних ліній Fe I 630.15, 630.25, 630.35 нм і Ti I 630.38 нм зі спектрополяриметричних спостережень на франко-італійському телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія). Отримано залежності температури, променевої швидкості, кута нахилу вектора магнітного поля і азимутального кута у трубках від висоти, а також значення напруженості магнітного поля і макротурбулентної швидкості. Виявлено часові варіації всіх параметрів фотосфери. Новий магнітний потік виходив в області змішаних полярностей і супроводжувався прогрівом фотосфери і хромосфери. Отримані моделі магнітних силових трубок показують підвищення температури на 400 К у верхніх шарах фотосфери порівняно з температурою у моделі спокійного Сонця. Вони свідчать про складну, неоднорідну дрібномасштабну структуру магнітного поля і поля швидкостей. Напруженість магнітного поля у трубках змінюється у межах від 0.03 до 0.13 Тл протягом аналізованого періоду спостережень. Кути нахилу вектора магнітного поля і азимутальні кути сильно розрізняються у магнітних силових трубках і змінюються з часом. Променева швидкість не перевищує 2 км/с. У першому компоненті моделей у нижніх шарах фотосфери переважають низхідні, а у верхніх висхідні потоки. У другому компоненті моделі показують підйом речовини в верхніх шарах фотосфери. Макротурбулентна швидкість у більшості випадків перевищує її величину для незбуреної фотосфери. Швидкість більше в другому компоненті моделей. Вихід нового маломасштабного магнітного потоку міг призвести до початку магнітних перез'єднань 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 OF THE PHOTOSPHERIC LINES IN THE REGION OF CHROMOSPHERIC DUAL FLOWS IN THE SURROUNDINGS OF A SOLAR PORE. II. PHOTOSPHERIC MODELS

The thermodynamic parameters and parameters of the photospheric magnetic field in the region of chromospheric dual flows in the vicinity of a small pore in the active region NOAA 11024 are presented. Dual chromospheric flows have appeared in the region of anomalous Stokes V profiles of the photospheric lines and were associated with the emergence of a new small-scale magnetic flux of positive polarity. Semi-empirical photospheric models were obtained by inversion using the SIR program (Stokes Inversion based on Response functions) [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta. *Astrophys. J.* 1992. 398. P. 375]. Each model contains two components: two thin magnetic flux tubes of different polarity. In the first component, the magnetic flux has a negative polarity, in the second component it is positive. Stokes profiles of the photospheric lines Fe I 630.15, 630.25 nm, 630.35 nm and Ti I 630.38 nm from spectropolarimetric observations with the French-Italian telescope THEMIS (Tenerife, Spain) were used for modeling. The height dependences of the temperature, the line-of-sight velocity, the angle of inclination of the magnetic field vector and the azimuth angle in the tubes, as well as the values of the magnetic field strength and the macroturbulent velocity are obtained. Time variations in all parameters of the photosphere are revealed. The new magnetic flux emerged in the region

of mixed polarities and was accompanied by the warming of the photosphere and the chromosphere. The inferred flux tube models show the temperature enhancement up to 400 K in the upper photospheric layers relative to the quiet-Sun model temperature. They indicate a complex, inhomogeneous small-scale structure of the magnetic field and the velocity field. The magnetic field strength in the tubes varies from 0.03 to 0.13 T during the period under consideration. The angles of the inclination of the magnetic field vector and the azimuth angles strongly differ in magnetic flux tubes and vary in time. The line-of-sight velocity does not exceed 2 km/s. The downflows in the lower layers of the photosphere and the upflows in the upper layers are dominated in the first component of the models. In the second component of the model, the material is lifted in the upper photosphere. The macroturbulent velocity in most cases exceeds its value for the unperturbed photosphere. The velocity is greater in the second component of the models. The emergence of the new magnetic flux could lead to the magnetic reconnection and occurrence of a microflare.

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