

УДК 523.985.3

**Е. С. Андриец<sup>1</sup>, Н. Н. Кондрашова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко  
ул. Обсерваторная 3, Киев, 04053  
andrietselena@gmail.com

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

### **Предвспышечные изменения солнечной фотосферы по данным наблюдений на телескопе THEMIS**

*Изучено физическое состояние фотосферы за 1 ч 50 мин перед солнечной вспышкой балла C1 24 мая 2012 г. В работе использованы данные спектрополяриметрических наблюдений на франко-итальянском телескопе ТЕМИС (о. Тенерифе, Испания). Моделирование выполнялось методом инверсии с помощью программы SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta, Astrophys. J., 1992, 398]. Получены распределения по высоте температуры, напряженности магнитного поля и лучевой скорости. Построено девять полуэмпирических моделей фотосферы. Каждая модель имеет двухкомпонентную структуру: компонент с магнитным полем и немагнитное окружение. Согласно полученным моделям параметры магнитного поля и термодинамические параметры значительно изменялись на протяжении 8 мин наблюдений. В моделях имеются слои с повышенной и пониженной температурой. Напряженность магнитного поля в моделях изменялась в среднем от 0.2 Тл в нижних слоях фотосферы до 0.13 Тл — в верхних. Лучевые скорости в нижних и средних слоях фотосферы не превышали 2 км/с, а в верхних достигали 5-6 км/с. Выявлены различия физического состояния и его изменений в разных местах активной области перед вспышкой.*

**ПЕРЕДСПАЛАНОВІ ЗМІНИ СОНЯЧНОЇ ФОТОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА ТЕЛЕСКОПІ ТЕМІС, Андриєць О. С., Кондрашова Н. М. — Вивчено фізичний стан фотосфери за 1 год 50 хв перед сонячним спалахом балу C1 24 травня 2012 р. У роботі використано дані спектрополяриметричних спостережень на франко-італійському телескопі ТЕМІС (о. Тенеріфе, Іспанія). Моделювання виконува-**

лось методом інверсії за допомогою програми SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta, *Astrophys. J.*, 1992, 398]. Отримано розподіли з висотою температури, напруженості магнітного поля, променевої швидкості. Побудовано дев'ять напівемпіричних моделей фотосфери. Кожна модель має двокомпонентну структуру: компонент з магнітним полем та немагнітне оточення. Згідно з моделями параметри магнітного поля та термодинамічні параметри значно змінювалися протягом 8 хв спостережень. Моделі мають шари з підвищеною та зниженою температурою. Напруженість магнітного поля у моделях змінювалась від 0.2 Тл у нижніх шарах фотосфери до 0.13 Тл у верхніх. Променеві швидкості у нижніх та середніх шарах фотосфери не перевищували 2 км/с, а у верхніх досягали 5-6 км/с. Виявлено розбіжності фізичного стану фотосфери та його змін у різних місцях активної області перед спалахом.

*A STUDY OF PRE-FLARE CHANGES OF THE SOLAR PHOTOSPHERE USING THEMIS OBSERVATION DATA, by Andriiets E. S., Kondrashova N. N. — The physical state of the photosphere 1 hour 50 min before the C1-class solar flare on 24 May 2012 was studied. We used some data of the spectropolarimetric observations with the telescope THEMIS (Tenerife, Spain). Semiempirical models were derived from the inversion with SIR code, described by Ruiz Cobo and del Toro Iniesta [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta, *Astrophys. J.*, 1992, 398]. Nine semiempirical models of the photosphere were constructed. Each photospheric model has a two-component structure: a magnetic flux tube and nonmagnetic surroundings. The height dependences of the temperature, magnetic field, and line-of-sight velocity were obtained for magnetic components. According to the models, the parameters of the magnetic field and the thermodynamical parameters changed strongly before the flare during 8 minutes of the observations. The models contain the layers with increased and decreased temperature. The magnetic field strength in the models varied from 0.2 T in the lower photospheric layers to 0.13 T in the upper ones. Line-of-sight velocities in the lower and middle layers of the photosphere did not exceed 2 km/s, and were up to 5-6 km/s in the upper ones. Some differences in the physical state of the photosphere and its changes are revealed for different places of the active region before the flare.*

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение предвспышечных изменений магнитного поля и термодинамических параметров фотосферы активных областей очень важно для понимания механизмов накопления энергии и предпосылок возникновения солнечных вспышек. В работах [1, 2, 16] было выявлено, что спектральные линии, образующиеся в фотосфере, уже за несколько часов и менее до вспышек претерпевают изменения формы, интенсивности, асимметрии. Оценки показали, что в местах активных об-

ластей, где впоследствии произошли вспышки, температура, плотность и скорости в нижней фотосфере были увеличены [4]. Примерно за полчаса до вспышек эти параметры еще больше увеличиваются, избыток температуры достигает 300 К. В работе [9] выявлены значительные изменения температуры в средних и верхних слоях фотосферы за 30 мин до появления двухленточной вспышки балла 2N/M2 3 июня 1979 г. О восходящих потоках, наблюдаемых перед вспышками, сообщено в работах [3, 8, 11, 21]. В работе [17] сообщается о быстрых фотосферных потоках и изменениях напряженности магнитного поля, наблюдавшихся за несколько часов до начала вспышки балла X4 26 ноября 2000 г. В работе [19] на основе данных Hinode/SOT-SP исследованы изменения фотосферного магнитного поля в двух ярких элементах активной области NOAA 10953 в течение 12 ч перед микро-вспышкой балла В1 29 апреля 2007 г. Выявлено увеличение напряженности вертикального магнитного поля и угла наклона вектора магнитного поля примерно за 2.5 ч до вспышки. В целом изменения параметров фотосферы перед вспышками еще недостаточно изучены.

Цель работы — на основе спектрополяриметрических наблюдений проанализировать изменения магнитного поля и термодинамических параметров в фотосфере активной области NOAA 11484 перед слабой вспышкой 24 мая 2012 г.

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Сектрополяриметрические наблюдения активной области были проведены на франко-итальянском телескопе THEMIS Института астрофизики на Канарских островах (о. Тенерифе, Испания). В наблюдаемой активной области, примерно через 1 ч 50 мин после наблюдений, возникла слабая вспышка балла C1. На рис. 1 приведены изображение активной области NOAA 11484 24 мая 2012 г. и положение щели спектрографа.

Исследуемая активная область находилась на западном краю Солнца. Вспышка балла C1 началась в  $10^h42^m20^s$  UT, достигла максимума в  $11^h07^m$  UT и закончилась в  $11^h26^m$  UT (координаты вспышки

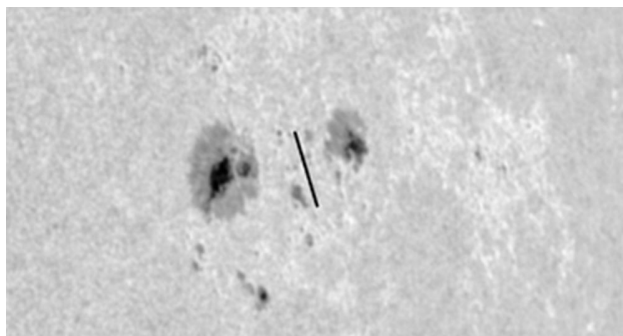


Рис. 1. Изображение активной области NOAA 11484 24 мая 2012 г. Линией отмечено положение щели спектрографа во время наблюдений

Рис. 2. H $\alpha$ -изображение вспышки балла C1 в активной области NOAA 11484 24 мая 2012 г. в 11<sup>h</sup>05<sup>m</sup> UT

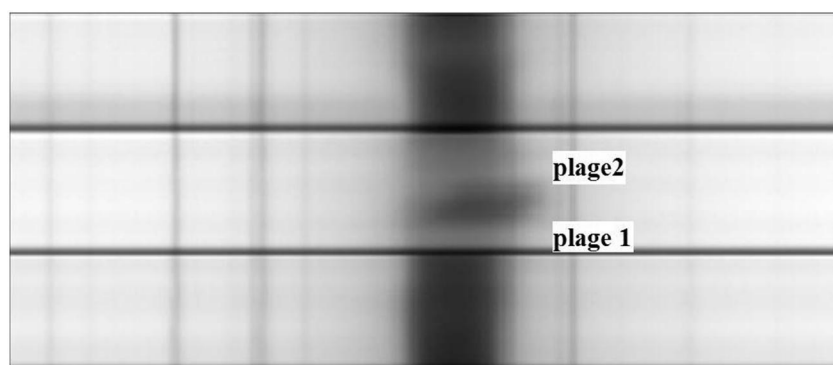
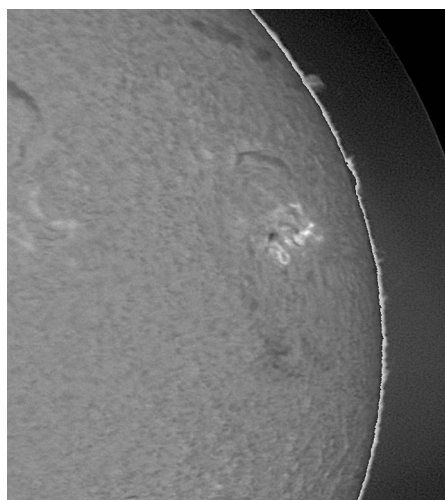


Рис. 3. Спектрограмма с изображением линии H $\alpha$ , полученная на телескопе ТЕМИС в 8<sup>h</sup>52<sup>m</sup> 24 мая 2012 г. с указанными двумя яркими флоккулами, изучаемыми в данной работе

N11W67). На рис. 2 представлено изображение вспышки в линии H $\alpha$  в активной области NOAA 11484, полученное обсерваторией Тэйде (Испания, о. Тенерифе). В щель спектрографа попадали два ярких флоккула, которые отмечены на спектрограмме на рис. 3.

Получена временная серия спектров, которые одновременно записывались в двух спектральных участках: H $\alpha$  и 630 нм. В таблице приведены параметры выбранных для моделирования спектральных линий: длины волн, элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня [18] и фактор Ланде [6].

Было отобрано пять спектров лучшего качества для моментов времени 8<sup>h</sup>52<sup>m</sup>, 8<sup>h</sup>54<sup>m</sup>, 8<sup>h</sup>56<sup>m</sup>30<sup>s</sup>, 8<sup>h</sup>58<sup>m</sup>, 9<sup>h</sup>00<sup>m</sup>. В результате обработки получены профили Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  шести линий железа, титана и хрома разной интенсивности, имеющих разную магнитную чувствительность. На рис. 4 для примера приведены  $V$ - и  $U$ -профили Стокса линии Fe I 630.25 нм, полученные из наблюдений.

Профили интенсивности  $I$  незначительно изменялись со временем, поэтому здесь не приводятся. Параметр Стокса  $Q$  был очень мал.

**Параметры выбранных спектральных линий**

$\lambda$ , нм	Элемент	$EPL$ , эВ	$g_{\text{эф}}$
630.151	Fe I	3.65	1.7
630.250	Fe I	3.69	2.5
630.346	Fe I	4.32	1.3
630.377	Ti I	1.44	0.9
633.010	Cr I	0.94	1.8
633.085	Fe I	4.73	1.2

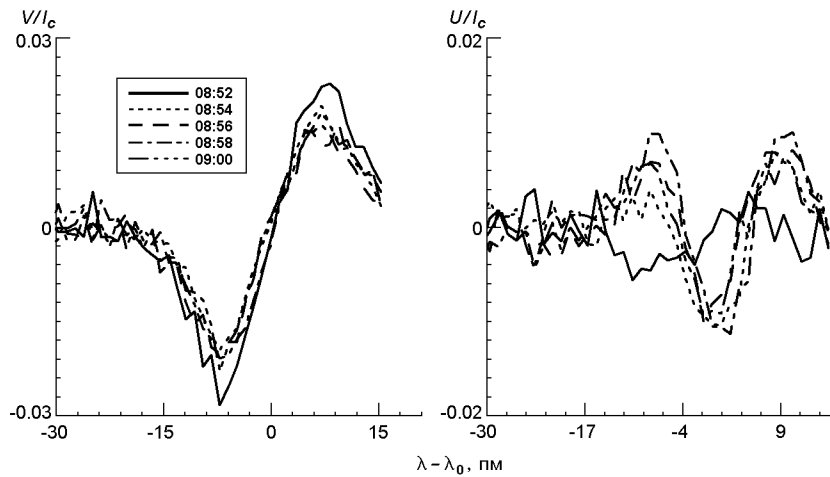


Рис. 4.  $V$ - и  $U$ -профили Стокса линии Fe I 630.25 нм, полученные из наблюдений для всех моментов времени для первого флоккула

В  $08^h52^m$  амплитуда  $V$ -профиля была максимальной, в последующие моменты она уменьшилась.  $U$ -профиль в первый момент времени имел наименьшую амплитуду и отличался по характеру от  $U$ -профилей для последующих моментов времени (рис. 4).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Для построения полуэмпирических моделей фотосферы использован метод инверсии с помощью программы SIR (Stokes Inversion based on Response functions) [20]. В расчетах предполагалось локальное термодинамическое равновесие. Каждая из моделей состоит из двух компонентов: магнитной составляющей и немагнитной окружающей среды. В качестве модели окружающей среды принята гарвардско-смитсоновская модель спокойной фотосферы. Начальная температура в модели магнитного элемента задавалась такой же, как в модели окружающей среды, начальная величина магнитного поля бралась постоянной по высоте и составляла 0.1 Тл. Макротурбулентные скорости и фактор заполнения (доля площади, занимаемая магнитной составляющей) предполагались постоянными с высотой фотосферы. Начальное значение макротурбулентной скорости принималось равным 1.5 км/с,

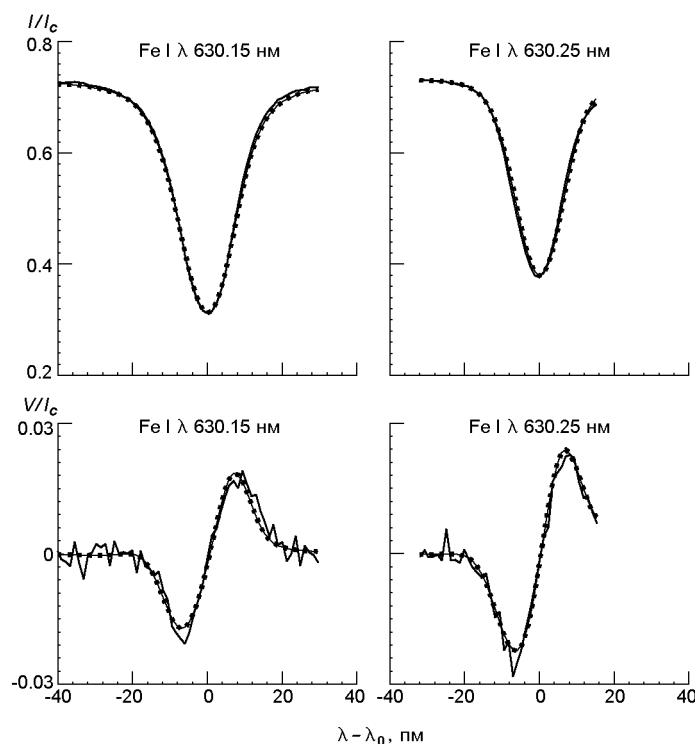


Рис. 5. Наблюдаемые (сплошная линия) и теоретические (пунктирная линия)  $I$ -профили спектральных линий (а) и  $V$ -профили спектральных линий (б) для  $08^h 52^m$  UT

как в невозмущенной фотосфере. При расчетах проводилось согласование наблюдаемых и вычисленных профилей линий до их наилучшего совпадения. На рис. 5 приведены примеры такого согласования профилей линий Fe 630.15 и 630.25 нм для момента времени  $08^h 52^m$  для первого флоккула.

В результате моделирования получены высотные распределения температуры, давления, напряженности магнитного поля, угла наклона вектора магнитного поля, а также лучевой скорости. Всего получено девять моделей для двух ярких мест активной области, в которых примерно через 1 ч 50 мин произошла вспышка. Доля площади магнитной составляющей моделей составляла примерно 55 %. Полученные модели магнитной составляющей показали значительные отличия всех термодинамических параметров и характеристик магнитного поля перед вспышкой от их значений в моделях спокойного (без вспышек) флоккула [7] и невозмущенной фотосферы. Как видно из рис. 6, распределения температуры по высоте в магнитной составляющей всех моделей имели немонотонный характер. В распределениях имеются слои с повышенной и пониженной температурой.

Зависимости температуры от высоты в модели магнитной составляющей первого флоккула для моментов времени  $08^h 54^m$ ,  $08^h 56^m$  и  $09^h 00^m$  за 1 ч 48 мин и менее до вспышки значительно отличаются от

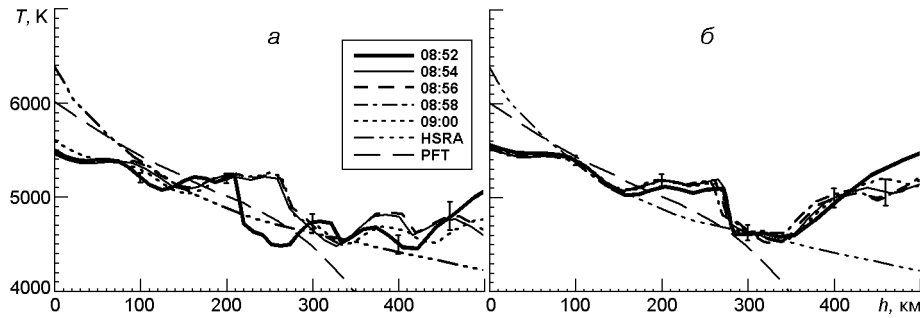


Рис. 6. Зависимость температуры в магнитной составляющей моделей от высоты для разных моментов наблюдений первого флоккула (а) и второго (б). Для сравнения приведены соответствующие зависимости в модели спокойного флоккула PFT [7], и в модели невозмущенной фотосферы HSRA

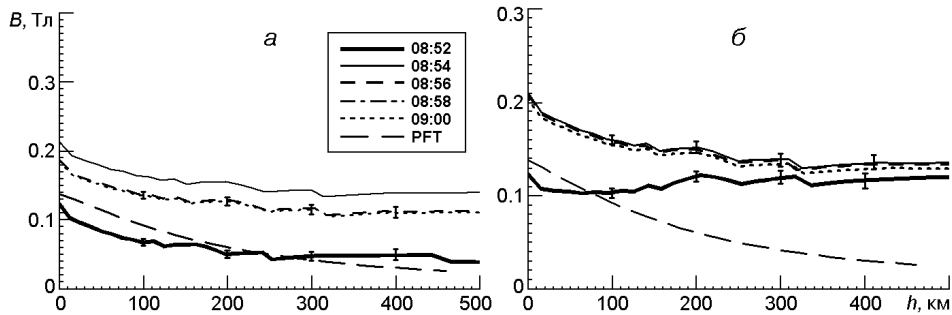


Рис. 7. Зависимости напряженности магнитного поля в магнитной составляющей моделей от высоты для разных моментов наблюдений первого флоккула (а) и второго (б). Для сравнения штриховой линией нанесена напряженность магнитного поля в модели спокойного флоккула RFT из работы [7]

зависимости для  $08^h52^m$  UT. В этих трех моделях слой с повышенной температурой шире (до 150 км), и температура в них выше, чем в модели для  $08^h52^m$  UT. В моделях второго флоккула все температурные зависимости близки между собой и отличаются от зависимостей, полученных для первого флоккула, особенно в верхних слоях фотосферы, где температура значительно выше.

Зависимости напряженности магнитного поля от высоты для двух флоккулов также различны (рис. 7).

Общим для всех полученных моделей является то, что напряженность магнитного поля плавно уменьшается с высотой. Согласно полученным моделям в  $08^h52^m$  UT напряженность магнитного поля в первом флоккуле уменьшается с высотой в фотосфере от 0.12 Тл на высоте 0 км до 0.04 Тл на высоте 500 км. Значения напряженности магнитного поля близки к ее значениям в модели спокойного флоккула [7]. Во второй момент напряженность магнитного поля сильно увеличилась во всех слоях фотосферы и достигла 0.21 Тл на высоте 0 км и 0.14 Тл в верхних слоях, а в последующие моменты уменьшилась примерно на 0.03 Тл.

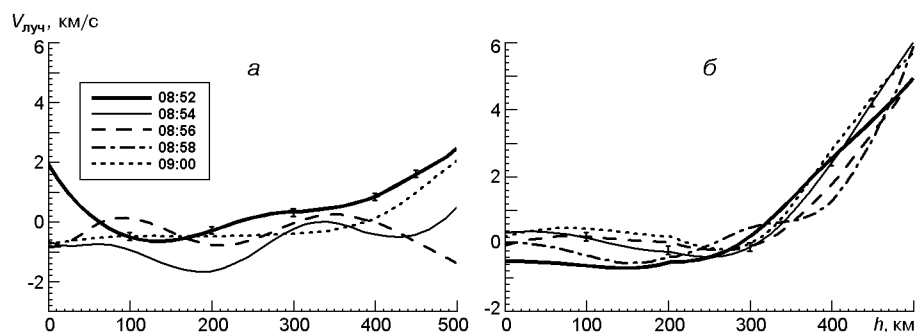


Рис. 8. Зависимости лучевых скоростей в магнитной составляющей моделей от высоты для разных моментов наблюдений первого флоккула (а) и второго (б). Положительные значения скорости соответствуют направлению движения вещества от наблюдателя

Во втором флоккуле в первый момент наблюдений напряженность магнитного поля почти не изменялась с высотой (примерно 0.12 Тл) и была больше, чем в первом флоккуле. Во второй момент она увеличилась до значения 0.21 Тл в нижних и 0.13 Тл — в верхних слоях фотосферы и оставалась на том же уровне в последующие моменты.

Согласно полученным моделям лучевые скорости перед вспышкой значительно изменялись со временем (рис. 8). В первом флоккуле в первый момент скорость изменялась от  $-0.63$  до  $2.2$  км/с. Наибольшие положительные скорости, соответствующие движению вещества от наблюдателя, получены для самых нижних и верхних слоев фотосферы. В нижних и средних слоях движение с небольшой скоростью направлено к наблюдателю. Такое распределение скорости с высотой может свидетельствовать о вихревом характере движений в предвспышечном флоккуле. Во второй момент времени наблюдений движение направлено к наблюдателю, лучевая скорость достигала  $1.5$  км/с на высотах около  $200$  км. В последующие моменты скорость изменялась от  $-0.8$  до  $0.15$  км/с в нижних и средних и от  $-1.2$  до  $1.8$  км/с — в верхних слоях фотосферы. Можно отметить довольно значительные вариации скорости от момента к моменту, особенно в верхней фотосфере, что можно объяснить наличием волн.

Во втором флоккуле распределения лучевой скорости по высоте близки по характеру. В нижних и средних слоях фотосферы изменения скорости лежат в пределах  $\pm 0.5$  км/с, а начиная с высоты  $300$  км лучевая скорость по направлению от наблюдателя резко увеличивается с высотой, достигая  $5-6$  км/с. Таким образом, высотные распределения лучевой скорости в двух флоккулах сильно различаются.

На рис. 9 приведены зависимости от высоты угла наклона вектора магнитного поля, отсчитываемого от внешней вертикали. Во всех моделях этот угол увеличивается с высотой. В первом флоккуле в первый момент он изменялся от  $107^\circ$  в нижней фотосфере до  $180^\circ$  в верхних ее слоях, во второй момент резко уменьшился на всех высотах. В



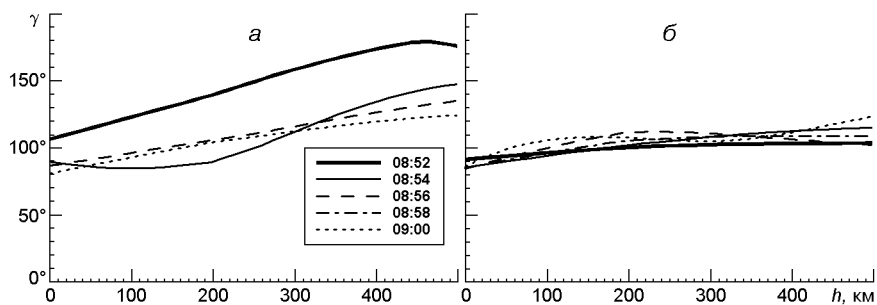


Рис. 9. Зависимость угла наклона вектора магнитного поля для разных моментов наблюдений первого флоккула (а) и второго (б)

последующие моменты он изменялся в среднем от 80 до 130. Во втором флоккуле не было такого большого изменения угла между первым и вторым моментами наблюдений. В среднем он изменялся от 85 до 115.

Фактор заполнения изменялся в пределах 53—56 % для первого флоккула и 56—59 % — для второго. Макротурбулентные скорости для первого флоккула находились в пределах 1.8—1.9 км/с, для второго — 2.1 км/с, т. е. были повышены относительно их значения для невозмущенной фотосферы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модели, полученные в данной работе, показывают, что физическое состояние фотосферы уже за 1 ч 50 мин перед слабой вспышкой 24 мая 2012 г. отличалось от состояния спокойной фотосферы и спокойного флоккула. Это подтверждает выводы работ [2, 4, 9, 19], основанных на изучении фраунгоферова спектра, о том, что физическое состояние фотосферы перед вспышками изменено. Как следует из приведенного выше исследования, термодинамические параметры и магнитное поле предвспышечной фотосферы изменяются со временем. Интересно, что во второй момент наблюдений в местах будущей вспышки сильно увеличилась напряженность магнитного поля, изменилась температура, лучевая скорость и углы наклона вектора магнитного поля. Предвспышечные изменения в фотосфере могут быть вызваны магнитным потоком, выходящим из-под фотосферных слоев, согласно, например, работам [5, 13, 14, 22—24]. Выходящий магнитный поток может вызвать медленные мелкомасштабные пересоединения магнитных силовых линий в нижних слоях солнечной атмосферы, предшествующие крупномасштабному магнитному пересоединению в короне, вследствие которого может произойти вспышка [10, 12, 15].

Полученные в нашей работе результаты свидетельствуют о том, что физическое состояние фотосферы перед вспышками изменено,

возможно, вследствие выноса магнитных жгутов из конвективной зоны. Они могут иметь значение для разработки прогнозов вспышечной активности. Необходимы дальнейшие детальные исследования предвспышечных проявлений в фотосфере солнечных активных областей.

## ВЫВОДЫ

Изучено физическое состояние фотосферы перед слабой вспышкой балла C1, которая происходила в активной области NOAA 11484 24 мая 2012 г. Получены полуэмпирические модели фотосферы в двух местах активной области за 1 ч 50 мин до вспышки. Согласно полученным полуэмпирическим моделям параметры магнитного поля и термодинамические параметры в магнитной составляющей моделей значительно изменялись на протяжении 8 мин наблюдений. Проведено сравнение полученных моделей с моделями невозмущенной фотосферы и спокойного флоккула. Сделаны следующие выводы.

1. В температурных распределениях по высоте имеются слои с повышенной и пониженной температурой. Верхние слои фотосферы прогреты перед вспышкой по сравнению с невозмущенной фотосферой в среднем на 1000 К.

2. Напряженность магнитного поля в моделях плавно уменьшается с высотой. В большинстве моделей ее величина составляет в среднем 0.2 Тл в нижних слоях фотосферы и 0.13 Тл — в верхних. Во второй момент наблюдений, в  $08^h54^m$  UT, напряженность магнитного поля резко увеличилась, а затем изменялась мало.

3. Лучевые скорости во флоккулах в нижних и средних слоях фотосферы не превышали 2 км/с. Во втором флоккуле лучевая скорость по направлению от наблюдателя резко увеличивается с высотой, достигая 5-6 км/с.

4. Отмечаются изменения физических параметров от момента к моменту.

5. Выявлены различия физического состояния и его изменений в разных местах активной области перед вспышкой.

Авторы благодарят Е. В. Хоменко за предоставление спектрополяриметрических данных наблюдений и группу технической поддержки телескопа ТЕМИС.

1. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н., Редюк Т. И., Рудникова Е. Г. Нижняя фотосфера солнечных активных областей перед вспышками и без них. I. Фраунгоферов спектр // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 1.—С. 24—36.
2. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н., Редюк Т. И., Рудникова Е. Г. О характере изменений во времени физического состояния фотосферных слоев перед вспышками // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1995.—92.—С. 52—56.
3. Alikeeva K. V., Chornogor S. N. Preflare chromospheric and photospheric line-of-sight velocities // Multi-wavelength investigations of solar activity: Proc. IAU Symp. N 223 / Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 227—228.

4. *Alikaeva K. V., Kondrashova N. N., Redyuk T. I., Rudnikova E. G.* Lower photosphere in solar active regions prior to flares and without flares. II. Physical conditions // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1993.—**9**, N 2.—P. 50—60.
5. *Ambastha A.* Signatures of large flares on photospheric magnetic and velocity fields // 2nd UN/NASA Workshop on International Heliophysical Year and Basic Space Science. Proc. of the conference held 27 November — 1 December, 2006 at Indian Institute of Astrophysics, Bangalore.—2006.—P. 26.
6. *Beckers J. M.* A table of Zeeman multiplets // Sacramento Peak Observatory Contribution no.141 — Physical Science Research Papers no. 371, Sacramento: Peak Observatory and Air Force Cambridge Research Laboratories.—1969.
7. *Bellot Rubio L. R., Ruiz Cobo B., Collados M.* Structure of plage flux tubes from the inversion of Stokes spectra. I. Spatially averaged Stokes I and V profiles // *Astrophys. J.*—2000.—**535**.—P. 489—500.
8. *Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A.* Coordinated observations of solar activity phenomena. II. The velocity field pattern in an elementary flare // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**306**.—P. 625—637.
9. *Chornogor S. N., Kondrashova N. N.* Physical state of the photosphere at the onset phase of a two-ribbon solar flare // *Solar Phys.*—2008.—**250**.—P. 303—314.
10. *Falchi A., Qiu J., Cauzzi G.* Chromospheric evidence for magnetic reconnection // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**328**, N 1.—P. 371—380.
11. *Harvey K. L., Harvey J. W.* A study of the magnetic and velocity fields in an active region // *Solar Phys.*—1976.—**47**.—P. 233—246.
12. *Heyvaerts J., Priest E. R., Rust D. M.* An emerging flux model for the solar flare phenomenon // *Astrophys. J.*—1977.—**216**, N 1.—P. 123—137.
13. *Ishii T. T., Kurokawa H., Takeuchi T. T.* Emergence of a twisted magnetic flux bundle as a source of strong flare activity // *Astrophys. J.*—1998.—**499**.—P. 898—904.
14. *Ishii T. T., Kurokawa H., Takeuchi T. T.* Emergence of twisted magnetic-field bundles and flare activity in a large active region NOAA 4201 // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2000.—**52**.—P. 337—354.
15. *Kim J., Jun H. S., Lee S., et al.* A rapid change in magnetic connectivity observed before filament eruption and its associated flare // *Astrophys. J.*—2001.—**547**, N 1.—P. L85—L88.
16. *Kondrashova N. N.* Pre-flare changes in the Fraunhofer lines // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1995.—**11**, N 2.—P. 33—39.
17. *Meunier N., Kosovichev A.* Fast photospheric flows and magnetic fields in a flaring active region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**412**.—P. 541—553.
18. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
19. *Murray S. A., Bloomfield D. S., Gallagher P. T.* The evolution of sunspot magnetic fields associated with a solar flare // *Solar Phys.*—2012.—**277**, N 1.—P. 45—57.
20. *Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C.* Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**.—P. 375—385.
21. *Rust D. M.* Analysis of the August 7, 1972 white light flare: changes in the magnetic and velocity fields // *Solar Phys.*—1973.—**33**, N 1.—P. 205—212.
22. *Titov V. S., Demoulin P.* Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**.—P. 707—720.
23. *Uchida Y., Shibata K.* A magnetodynamic mechanism for the heating of emerging magnetic flux tubes and loop flares // *Solar Phys.*—1988.—**116**, N 2.—P. 291—307.
24. *Wang H., Qiu J., Jing J., et al.* Evidence of rapid flux emergence associated with the M8.7 flare on 2002 July 26 // *Astrophys. J.*—2004.—**605**, N 2.—P. 931—937.

Статья поступила в редакцию 02.04.13