

УДК 523.985.3

Е. С. Андриец¹, Н. Н. Кондрашова², Е. В. Курочка¹

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

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

Двухкомпонентные модели фотосферы солнечной вспышки балла 2N/M2

Изучено физическое состояние фотосферы в процессе развития солнечной вспышки 2N/M2 18 июля 2000 г. по зееман-спектрограммам, полученным В. Г. Лозицким на эшелюном спектрографе в ортогональных круговых поляризациях. Построены полуэмпирические модели фотосферы для трех моментов вспышки в начальной и главной фазах. Моделирование выполнялось с помощью программы SIR с использованием профилей Стокса I и V семи линий железа и хрома. Модель фотосферы вспышки имеет двухкомпонентную структуру: компонент с магнитным полем и немагнитное окружение. Получены распределения по высоте температуры, напряженности магнитного поля и лучевой скорости. Температура в магнитном компоненте имела немонотонный ход по высоте. Модели содержат слои с повышенной относительно модели невозмущенной фотосферы температурой в средней и верхней фотосфере. По мере развития вспышки отмечалось увеличение температуры на 500—800 К в нижних слоях. Напряженность магнитного поля на протяжении вспышки увеличилась на 0.05 Тл в нижней и на 0.08—0.1 Тл в верхней фотосфере, при этом ее высотный градиент уменьшился от 0.0012 до 0.0008 Тл/км. Модель для начальной фазы вспышки показывает, что в нижней фотосфере наблюдались восходящие потоки вещества, а в верхней — нисходящие. В главной фазе вспышки скорость потоков вещества значительно уменьшилась. Значения параметров модели немагнитного окружения мало отличались от значений этих параметров для невозмущенной фотосферы.

ДВОКОМПОНЕНТНІ МОДЕЛІ ФОТОСФЕРИ СОНЯЧНОГО СПАЛАХУ БАЛУ 2N/M2, Андрієць О. С., Кондрашова Н. М., Курочка Є. В. — Вивчено фізичний стан фотосфери у процесі розвитку сонячного спалаху 2N/M2 18 липня 2000 р. за ешельними зєєман-спектрограмами, отриманими В. Г. Лозицьким на ортогональних кругових поляризаціях. Отримано напівемпіричні моделі для трьох моментів спалаху у початковій та головній фазах. Моделювання виконувалося за допомогою програми SIR з використанням семи ліній заліза та хрому. Модель фотосфери спалаху має двокомпонентну структуру: компонент з магнітним полем та немагнітне оточення. Отримано розподіли з висотою температури, напруженості магнітного поля та променевої швидкості. Температура в магнітному компоненті мала немонотонний хід з висотою. В моделях є шари з підвищеною відносно моделі незбуреної фотосфери температурою в середній та верхній фотосфері. Відмічалось збільшення температури на 500—800 К в нижніх шарах протягом спалаху. Напруженість магнітного поля на протязі спалаху збільшилась на 0.05 Тл у нижній та на 0.08—0.1 Тл у верхній фотосфері, при цьому її висотний градієнт зменшився від 0.0012 до 0.0008 Тл/км. Модель для початкової фази спалаху показує, що в нижній фотосфері спостерігались висхідні потоки речовини, а у верхній — низхідні. У головній фазі спалаху швидкість потоків речовини значно зменшилась. Значення параметрів фотосфери немагнітного оточення мало відрізнялися від значень цих параметрів для незбуреної фотосфери.

TWO-COMPONENT PHOTOSPHERIC MODELS OF A SOLAR FLARE OF 2N/M2 CLASS, by Andriiets O. S., Kondrashova N. N., Kurochka E. V.

The physical state in the photosphere during the 2N/M2 solar flare on 18 July 2000 was studied. We used Echelle Zeeman spectrograms obtained by Lozitsky V. G. in orthogonal circular polarizations with the solar spectrograph. Semiempirical models are derived for three times of the flare at the onset and main phases using an inversion with SIR code. Seven photospheric lines of Fe I and Cr I are used. The photosphere 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 two components. The temperature in a magnetic flux tube had some inhomogeneities with height. The layers with increased temperature were found in the middle and upper photosphere in relation to undisturbed photosphere. Temperature increase was noted at 500–800 K in the lower layers during the flare. The magnetic field during the flare increased by 0.05 T in the lower and of 0.08–0.1 T in the upper photosphere, while its vertical gradient decreased from 0.0012 to 0.0008 T/km. The model for onset stage shows the upperflows in the lower photosphere and downflows in the upper photosphere. The line-of-sight velocities significantly decreased in the main phase of the flare. The parameters of the photosphere nonmagnetic surroundings differed little from their values in the quiet photosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых мощных событий на Солнце является вспышка. Основное значение в возникновении и развитии вспышек принадлежит магнитному полю — источнику их энергии. Согласно современным представлениям энергия, реализуемая в солнечных вспышках, высвобождается в результате магнитных пересоединений. Вспышки охватывают все слои солнечной атмосферы, в том числе фотосферу. В начальном периоде их развития фотосфера играет роль среды, через которую происходит вынос магнитного потока из конвективной зоны в верхние слои атмосферы [17]. Магнитный поток взаимодействует с лежащим выше магнитным полем, что приводит к магнитным пересоединениям в образующемся токовом слое. Важную роль в развитии вспышек играют также фотосферные крупномасштабные горизонтальные движения вдоль и поперек нейтральной линии магнитного поля и вихревые движения. После освобождения энергии вспышки излучение, потоки частиц и тепла, крупномасштабные потоки, волны, хромосферные конденсации воздействуют на нижние слои солнечной атмосферы и вызывают изменения ее физического состояния. Получены доказательства того, что магнитные пересоединения могут происходить не только в короне, но и в хромосфере, и даже в фотосфере [12, 37]. Поэтому фотосферные слои, как и хромосферные и корона, подвергаются значительным изменениям в процессе вспышки. Изучение этих изменений заслуживает особого внимания.

В данной работе использованы данные спектрополяриметрических наблюдений вспышки балла 2N/M2 18 июля 2000 г. Моделирование фотосферной части вспышки выполнялось на основе профилей Стокса I и V с помощью программы SIR [33]. Работа является продолжением исследования [3].

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Вспышка 18 июля 2000 г. балла 2N/M2 возникла в активной области NOAA 9077 в 4^h58^m UT, достигла максимума в $5^h05^m30^s$ UT и закончилась в 6^h38^m UT. Ее координаты N18W57. На эшелюном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета (ГСТ АО КНУ) В. Г. Лозицким получены зееман-спектрограммы вспышки в ортогональных круговых поляризациях, позволяющие анализировать профили Стокса I и V . На рис. 1 представлена спектрограмма с изображением вспышки 18 июля 2000 г. в линии H .

В данной работе для моделирования фотосферы вспышки использованы спектрограммы, полученные в 05^h02^m , 05^h14^m и 05^h34^m UT. При моделировании использованы профили семи фраунгоферовых линий железа и хрома. В таблице приведены длины волн, элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня [31] и фактор Ланде [10].

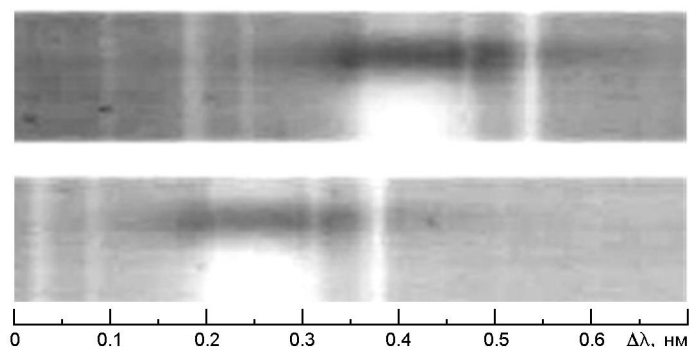


Рис. 1. Спектрограмма в левой и правой круговых поляризациях с изображением вспышки в линии H, полученная на телескопе ГСТ АО КНУ в 5^h02^m 18 июля 2000 г.

Параметры выбранных спектральных линий

Элемент	, нм	<i>EPL</i> , эВ	$g_{\text{эф}}$
Fe I	557.61	3.43	0
Fe I	630.25	3.67	2.5
Fe I	630.15	3.64	1.7
Fe I	525.06	2.19	1.5
Fe I	525.02	0.12	3.0
Fe I	524.71	0.09	2.0
Cr I	524.76	0.96	2.5

При обработке производилось разделение комбинации профилей Стокса $I \pm V$ на отдельные профили I и V , вычитался инструментальный контур спектрографа телескопа. Ошибка центральной глубины наблюдаемых I -профилей составляет 2-3 %, а V -профилей — в среднем 20 %. На рис. 2 приведены профили некоторых линий с типичным изменением во времени. Их сравнение показывает, что I -профили всех линий сильно ослаблены вблизи максимума вспышки, в 5^h02^m UT, по сравнению с профилями для других моментов.

В последующие моменты они усилились на 1—6 %. Амплитуда V -профилей линий была наибольшей в первый момент, а в 5^h34^m UT резко уменьшилась.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчетов использована программа SIR (Stokes Inversion based on Response functions) [33], которая дает возможность получить двухкомпонентные модели фотосферы, основанные на наблюдаемых профилях Стокса. В данной работе использованы I - и V -профили линий. В алгоритме программы принято условие локального термодинамического равновесия. Расчеты начинались с уточнения значений сил осцилляторов и постоянной затухания путем согласования вычислен-

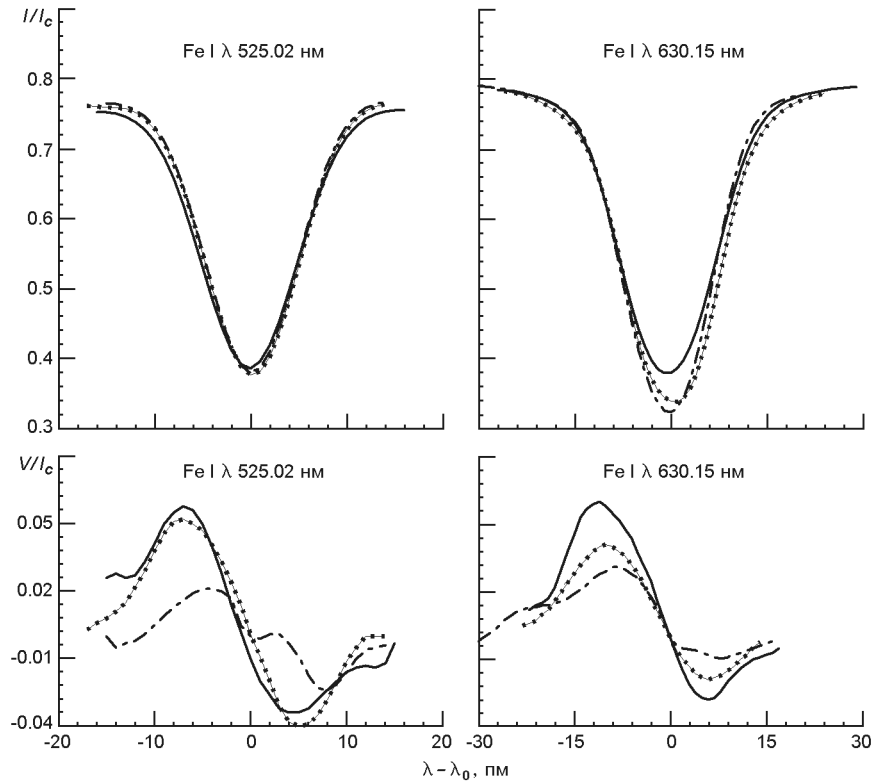


Рис. 2. I - и V -профили Стокса линий Fe I $\lambda = 525.02$ и 630.15 нм, полученные из наблюдений вспышки 18 июля 2000 г. в 5^h02^m (сплошная линия), 5^h14^m (пунктирная линия), 5^h34^m (штрихпунктир)

ных профилей линий с наблюдаемыми в спектре невозмущенной фотосферы.

Модель вспышки включает два компонента: компонент с магнитным полем и немагнитное окружение. В качестве исходных моделей в расчетах принята гарвардско-смитсоновская модель фотосферы HSRA [16]. Макротурбулентные скорости и фактор заполнения (доля площади, занимаемая магнитным компонентом) предполагались постоянными с глубиной. Исходная величина макротурбулентной скорости принималась равной 1.5 км/с, напряженности магнитного поля — 0.1 Тл.

В результате вычислений получены высотные распределения температуры, напряженности магнитного поля, а также лучевой скорости в магнитном компоненте. Распределения термодинамических параметров в моделях немагнитного компонента оказались близкими к HSRA. При расчетах проводилось согласование наблюдаемых и вычисленных профилей линий до их лучшего совпадения. Из наших вычислений следует, что V -профили являются чувствительными не только к магнитному полю, но и к температуре и к полю скоростей.

На рис. 3 приведен пример согласования наблюдаемых и вычисленных I - и V -профилей линий Fe I $\lambda = 525.02$ и 630.15 нм.

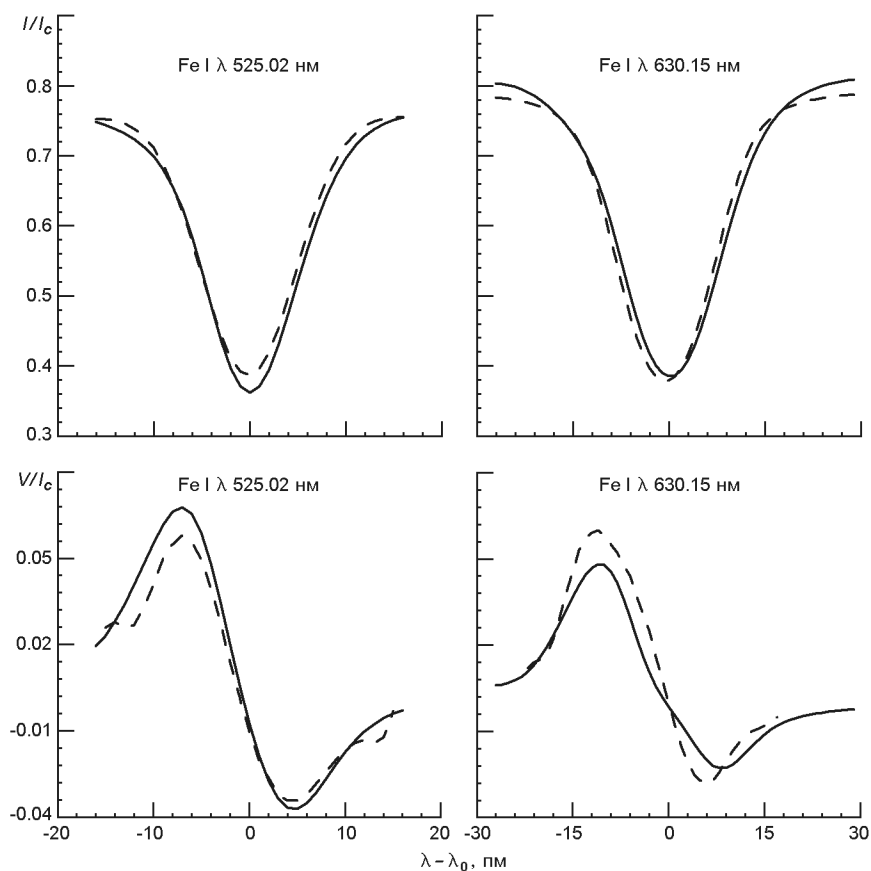


Рис. 3. Наблюдаемые (штриховая линия) и теоретические (сплошная линия) I - и V -профили спектральных линий для 05^h02^m UT

Получены модели для трех моментов вспышки. В первый момент, в 5^h02^m UT (за 3 мин перед максимумом вспышки), доля площади магнитной составляющей модели составляла примерно 75 %. После максимума вспышки, в 5^h14^m и 5^h34^m UT, фактор заполнения уменьшился до 36 и 35 % соответственно. На рис. 4 приведены температурные распределения с высотой в моделях магнитного компонента для трех моментов вспышки. Для сравнения дана модель спокойной фотосферы HSRA. Полученные модели магнитной составляющей показали значительные отличия значений всех термодинамических параметров и характеристик магнитного поля от соответствующих значений в модели невозмущенной фотосферы.

Как видно из рис. 4, распределения температуры по высоте в магнитной составляющей всех моделей имеют немонотонный характер и сильно отличаются от распределения в модели HSRA. В распределениях имеются слои с повышенной и пониженной температурой. В первый момент, за три минуты до максимума вспышки, наблюдаются три слоя с повышенной температурой. Максимум температуры 5100 К со-

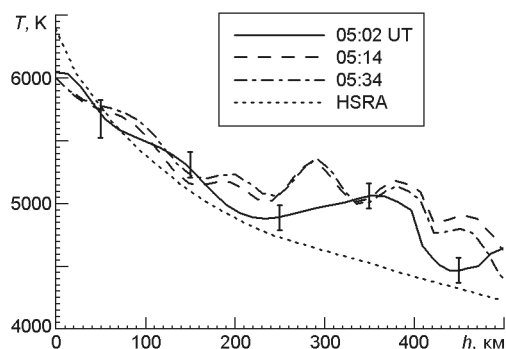


Рис. 4. Зависимость температуры в магнитной составляющей моделей от высоты для вспышки 18 июля 2000 г. Для сравнения пунктирной линией нанесена модель невозмущенной фотосферы HIRA. Вертикальными линиями отмечены ошибки

ответствует высоте фотосферы 350 км. Через 9 мин после максимума вспышки ($5^{\text{h}}14^{\text{m}}$ UT) высотное распределение температуры сильно изменилось: число слоев увеличилось до пяти, температура в них увеличилась. Через 29 мин после максимума вспышки температурное распределение оставалось примерно таким же, но в средних и нижних слоях температура увеличилась, что свидетельствует о распространении вспышечного возмущения из верхних слоев в нижние.

На рис. 5 приведены зависимости напряженности магнитного поля от высоты в магнитных компонентах моделей исследуемой нами вспышки.

Из полученной модели следует, что в первый момент наблюдений напряженность магнитного поля резко уменьшается с высотой в фотосфере, ее градиент составляет 0.0012 Тл/км. Во второй момент, после максимума вспышки, ход с высотой напряженности магнитного поля оставался резким, хотя градиент уменьшился до 0.0008 Тл/км. На стадии затухания вспышки, в третий момент наблюдений, напряженность магнитного поля уменьшилась. При этом градиент почти не изменился.

На рис. 6 представлены высотные распределения лучевой скорости для магнитных составляющих полученных моделей.

Согласно полученным моделям в нижних слоях фотосферы скорость восходящих потоков составляет от -2 до 0 км/с с наибольшими значениями в третий момент наблюдений. Распределения лучевой скорости с высотой в средних слоях фотосферы имеют схожий вид. В

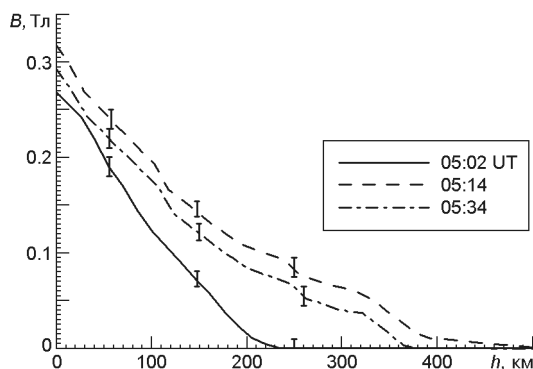
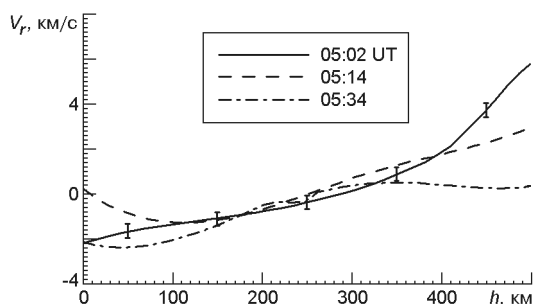


Рис. 5. Зависимости напряженности магнитного поля в магнитной составляющей моделей от высоты для трех моментов наблюдений вспышки

Рис. 6. Зависимости лучевых скоростей в магнитной составляющей моделей от высоты для трех моментов наблюдений вспышки. Положительные значения скорости соответствуют направлению движения вещества от наблюдателя



первые два момента отмечается разное направление движения вещества ниже и выше уровня 250 км: подъем в нижних слоях сменяется опусканием в верхних слоях фотосферы. В третий момент наблюдений в верхних слоях скорость близка к нулю и почти не изменяется с высотой.

Получено, что макротурбулентная скорость в магнитной силовой трубке составляла 1.6 км/с в первый момент, 1.3 км/с — во второй и 2.4 км/с — в третий. Макротурбулентная скорость в немагнитной составляющей моделей равна 1.8 км/с. Микротурбулентная скорость изменялась в пределах от 0.3 до 1.0 км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенного исследования фотосферы вспышки 18 июля 2000 г. выявлены значительные изменения ее физического состояния. Полуэмпирические модели фотосферных слоев вспышек, полученные с помощью сравнения наблюдаемых и вычисленных профилей фраунгоферовых линий, приведены также в ряде работ, например [1, 6, 8, 11, 13, 19, 23—25, 28]. В большинстве случаев при расчетах этих моделей не учитывалось влияние магнитного поля, они были однокомпонентными, рассматривались лишь профили интенсивности линий. Исследования показали, что во время вспышек значительно изменяются термодинамические параметры фотосферы, эти изменения зависят от мощности и фазы рассматриваемой вспышки. Общей особенностью моделей является прогрев верхней фотосферы. Механизмы нагрева обсуждались в работах [14, 15, 26, 27, 29]. В работах [1, 5, 7, 11, 23] получено, что в температурных распределениях с высотой в моделях вспышек имеются прогретые слои в верхней фотосфере. Полученные нами модели также показывают немонотонное распределение температуры с высотой и наличие прогретых слоев. В нижних слоях отмечается дефицит температуры, как и в работах [1, 11]. По мере развития исследуемой нами вспышки прогрев распространялся из верхних слоев фотосферы в нижние. Этот результат согласуется с данными, полученными в работах [1, 5, 19, 23].

Как отмечено выше, важным параметром вспышечной области является магнитное поле. Измерения фотосферного магнитного поля в

подавляющем большинстве работ сделаны для мощных вспышек. Выявлены его быстрые изменения в начале вспышек [18, 21, 22, 30, 32, 34—36]. Согласно результатам спектральных наблюдений с анализатором поляризации напряженность продольного магнитного поля во вспышке балла 1В 8 июня 1989 г. достигала 80—90 мТл [9]. Измерения напряженности магнитного поля в трех слабых вспышках по расщеплению спектральных фотосферных линий дали ее величину от 0.02 до 0.22 Тл [4]. В работе [2] на основе спектральных наблюдений фотосферных линий с поляризационной мозаикой в пяти вспышках разных баллов установлено, что величина магнитного поля не превышала 0.05 Тл. Вблизи максимума вспышек отмечалось заметное увеличение напряженности магнитного поля, а на стадии затухания ее уменьшение. В работе [24] также сообщается об увеличении напряженности магнитного поля в максимуме вспышки балла 2В 16 июня 1989 г. в верхней фотосфере, ее значение достигало 0.16 Тл. В работе [23] получено, что в максимуме вспышки балла 1В/М4 5 ноября 2004 г. наблюдался пик напряженности продольного магнитного поля, причем ее максимальное значение составляло 0.2 Тл в верхней фотосфере.

В нашей работе предполагается, что магнитное поле сосредоточено в мелкомасштабной магнитной силовой трубке, окруженной немагнитной средой. Ранее подобные двухкомпонентные модели были построены для флоккулов. Для вспышек такие модели построены в работах [5, 20]. В работе [5] в расчетах принималось распределение напряженности магнитного поля из модели трубки во флоккуле. В работе [20] найдено, что напряженность магнитного поля в начальной фазе микровспышки балла В3 увеличивалась со временем от 0.08 до 0.12 Тл, а после максимума вспышки уменьшилась. Величина напряженности принималась постоянной по высоте.

Модель магнитной составляющей за три минуты перед максимумом исследуемой нами вспышки показывает очень большой отрицательный градиент напряженности магнитного поля — 0.0012 Тл/км. Резкое уменьшение с высотой напряженности магнитного поля получено также в работе [8] во вспышке балла 2N. Согласно полученной в этой работе модели вблизи максимума вспышки напряженность продольного магнитного поля уменьшалась с высотой от 0.35 Тл в основании фотосферы до 0 Тл на высоте 400 км. Следует отметить, что как в этой работе, так и в нашей нельзя говорить об исчезновении магнитного поля в верхних слоях фотосферы, поскольку ошибка определения его напряженности не менее 0.02 Тл. Факт резкого уменьшения напряженности магнитного поля с высотой необходимо проверить в будущем.

Вскоре после максимума исследуемой нами вспышки напряженность магнитного поля в трубке увеличилась, при этом ее градиент и фактор заполнения уменьшились. Другими словами, более сильное магнитное поле сосредоточено в меньшем масштабе. В работе [5] для

слабой вспышки 24 мая 1979 г. также получено уменьшение размера магнитной силовой трубки к концу вспышки. В стадии затухания исследуемой нами вспышки напряженность магнитного поля уменьшилась (см., например, [20]).

Следует отметить, что сравнивать однокомпонентные модели, полученные другими исследователями, и двухкомпонентные модели, полученные нами, не вполне корректно, но общие особенности моделей (прогрев верхних слоев фотосферы, немонотонный ход зависимостей температуры от высоты) данного исследования близки к результатам других авторов.

ВЫВОДЫ

Изучено физическое состояние фотосферы вспышки 2N/M2, которая происходила в активной области NOAA 9077 18 июля 2000 г. Выполнено моделирование фотосферной части вспышки, рассчитаны двухкомпонентные модели. В результате получены полуэмпирические модели магнитной составляющей и ее немагнитного окружения для трех моментов наблюдений. Согласно моделям распределение температуры по высоте имело немонотонный характер. Наблюдались слои с повышенной температурой в магнитной составляющей. На протяжении вспышки возбуждение распространялось из верхних в нижние слои фотосферы. Напряженность магнитного поля изменялась в процессе вспышки: для момента перед максимумом вспышки — от 0.26 ($h = 0$ км) до 0.01 Тл ($h = 200$ км), через 9 мин после максимума — от 0.32 ($h = 0$ км) до 0.01 Тл ($h = 500$ км). Через 20 мин напряженность магнитного поля уменьшилась в среднем на 0.03 Тл. Градиент напряженности магнитного поля с высотой уменьшался с развитием вспышки от 0.0012 Тл/км в начальной фазе до 0.0008 Тл/км в ее главной фазе. Распределения лучевой скорости с высотой в магнитных составляющих полученных моделей вспышки также изменялись со временем. В нижних слоях все полученные модели показывают подъем вещества со скоростью $-2...0$ км/с. Вблизи максимума вспышки в верхних слоях происходило опускание вещества со скоростью, достигавшей 5 км/с. В 5^h34^m UT скорость нисходящих потоков уменьшилась.

Авторы благодарят В. Г. Лозицкого за предоставление наблюдательного материала.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ, проект № 53.2/099.

1. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н. Возмущение фотосферы в процессе развития солнечной двухленточной вспышки // Кинематика и физика небес. тел.— 2006.—22, № 3.—С. 163—172.
2. Аликаева К. В., Полупан П. Н., Ганджа С. И. и др. К вопросу о фотосферных магнитных полях в области вспышек // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.— 1985.—27.—С. 3—7.

3. Андриец Е. С., Кондрашова Н. М., Курочка Е. В., Лозицкий В. Г. Модель фотосферы солнечной вспышки 2N/M2 18 июля 2000 г. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2012.—**27**, № 5.—С. 12—25.
4. Андриець О. С. Вимірювання магнітних полів у слабких сонячних спалахах по лініях фотосфери та хромосфери // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.—2011.—Вип. 47.—С. 14—17.
5. Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. IV. Полуэмпирические модели // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 5.—С. 387—399.
6. Барановский Э. А., Лозицкий В. Г., Таращук В. П. Моделирование фотосферы и хромосферы двух мощных вспышек на Солнце (28 октября 2003 г. и 1 сентября 1990 г.) // Кинематика и физика небес. тел.—2009.—**25**, № 5.—С. 373—384.
7. Чорногор С. Н., Аликаева К. В. Состояние хромосферного и фотосферного вещества субвспышки. Полуэмпирические фотосферные модели // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 2.—С. 113—120.
8. Abramenko V. I., Baranovsky E. A. Flare-related changes in the profiles of six photospheric lines // Solar Phys.—2004.—**220**, N 1.—P. 81—91.
9. Baranovski E. A., Lozitskaya N. I., Lozitskij V. G. Magnetic fields and thermodynamic conditions in the solar flare of June 8, 1989 // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—1991.—**7**, N 3.—P. 49—54.
10. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
11. 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.
12. Falchi A., Qui J., Cauzzi G. Chromospheric evidence for magnetic reconnection // Astron. and Astrophys.—1997.—**328**, N 1.—P. 371—380.
13. Gan W. Q., Fang C. Time-match semi-empirical models of the chromospheric flare on 3 February, 1983 // Solar Phys.—1987.—**107**, N 2.—P. 311—321.
14. Gan W. Q., Fang C. A hydrodynamic model of the gradual phase of the solar flare loop // Astrophys. J.—1990.—**358**, N 1.—P. 328—337.
15. Gan W. Q., Mauas P. J. D. Atmospheric heating in solar flares by chromospheric condensation // Astrophys. J.—1994.—**430**, N 2.—P. 891—897.
16. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // Solar Phys.—1971.—**18**, N 3.—P. 347—365.
17. 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.
18. Johnstone B. M., Petrie G. J. D., Sudol J. J. Abrupt longitudinal magnetic field changes and ultraviolet emissions accompanying solar flares // Astrophys. J.—2012.—**760**, N 1.—6 p.
19. Kondrashova N. N. Lower atmosphere in the main phase of a two-ribbon solar flare // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—2011.—**27**, N 2.—P. 86—91.
20. Kondrashova N. N. Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2013.—**431**, N 2.—P. 1417—1424.
21. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. Variations of photospheric magnetic field associated with flares and CMEs // Solar Phys.—1999.—**190**, N 1/2.—P. 459—466.
22. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. Magnetic energy release and transients in the solar flare of 2000 July 14 // Astrophys. J.—2001.—**550**, N 1.—P. L105—L108.
23. Kurochka E. V., Lozitsky V. G., Osyka O. B. Temporal changes of physical conditions in the photospheric layers of a solar flare // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—2008.—**24**, N 4.—P. 215—222.

24. *Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Leiko U. M.* Observations of magnetic field evolution in a solar flare // *Solar Phys.*—2000.—**191**.—P. 171—183.
25. *Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W.* Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.*—1980.—**242**, N 2.—P. 336—351.
26. *Machado M. E., Emslie A. G.* A comparison of high-temperature flare models with observations and implications for the low-temperature flare // *Astrophys. J.*—1979.—**232**, N 1.—P. 903—914.
27. *Machado M. E., Emslie A. G., Brown J. C.* The structure of the temperature minimum region in solar flares and its significance for flare heating mechanisms // *Solar Phys.*—1978.—**58**.—P. 363—387.
28. *Machado M. E., Linsky J. L.* Flare model chromospheres and photospheres // *Solar Phys.*—1975.—**42**, N 2.—P. 395—420.
29. *Metcalf T. R., Canfield R. C., Saba J. L. R.* Flare heating and ionization of the low solar chromosphere. II. Observations of five solar flares // *Astrophys. J.*—1990.—**365**, N 1.—P. 391—406.
30. *Meunier N., Kosovichev A.* Fast photospheric flows and magnetic fields in a flaring active region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**412**, N 2.—P. 541—553.
31. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
32. *Petrie G. J. D., Sudol J. J.* Abrupt longitudinal magnetic field changes in flaring active regions // *Astrophys. J.*—2010.—**724**, N 2.—P. 1218—1237.
33. *Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C.* Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**.—P. 375—385.
34. *Sudol J. J., Harvey J. W.* Longitudinal magnetic field changes accompanying solar flares // *Astrophys. J.*—2005.—**635**, N 1.—P. 647—658.
35. *Tanaka K.* Measurement and analysis of magnetic field variation during a class 2b flare // *Solar Phys.*—1978.—**58**.—P. 149—163.
36. *Wang H.* Rapid changes of photospheric magnetic fields around flaring magnetic neutral lines // *Astrophys. J.*—2006.—**649**, N 1.—P. 490—497.
37. *Wang H., Spirock T. J., Qiu J., et al.* Rapid changes of magnetic fields associated with six X-class flares // *Astrophys. J.*—2002.—**576**, N 1.—P. 497—504.

Статья поступила в редакцию 02.04.13