

УДК 523.985.355.3

**Фотосферные слои вспышки и флоккула.  
IV. Полуэмпирические модели**Э. А. Барановский<sup>1</sup>, Н. Н. Кондрашова<sup>2</sup>, М. Н. Пасечник<sup>2</sup><sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория  
98409, п. Научный, Крым<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко  
04053, Киев-53, ул. Обсерваторная, 3

*Построены неоднородные полуэмпирические фотосферные модели флоккула и слабой вспышки путем согласования вычисленных и наблюдаемых профилей 11 фраунгоферовых линий. Во флоккуле наиболее прогретыми были верхние слои магнитных силовых трубок, в средних слоях находилась область пониженной плотности. В основной фазе развития вспышки силовые трубки также имели более высокую температуру, чем окружающая их фотосфера, в некоторых слоях прогрев достигал 1500 К. Вспышечное возмущение распространялось из верхних слоев в нижние и имело волновой характер. Изменения термодинамических параметров в фотосферных слоях, возможно, были связаны с прохождением конденсации, образовавшейся в хромосфере во время вспышки.*

**ФОТОСФЕРНІ ШАРИ СПАЛАХУ ТА ФЛОКУЛА. IV. НАПІВЕМПІРИЧНІ МОДЕЛІ**, Барановський Е. О., Кондрашова Н. М., Пасечник М. М. — Побудовані неоднорідні напівемпіричні фотосферні моделі флоккула та слабкого спалаху, узгодженням обчислених та спостережених профілів 11 фраунгоферових ліній. У флоккулі найбільш прогрітими були верхні шари силових трубок, у середніх шарах знаходилась область зниженої щільності. У основній фазі розвитку спалаху магнітні силові трубки також мали більшу високу температуру, ніж навколишня їхня фотосфера, у деяких шарах прогрів досягав 1500 К. Спалахове збурення розповсюджувалось з верхніх шарів у нижні і мало хвильовий характер. Зміни термодинамічних параметрів у фотосферних шарах, ймовірно, були пов'язані з проходженням конденсації, яка утворилась у хромосфері під час спалаху.

**PHOTOSPHERIC LAYERS OF A FLARE AND A PLAGE. IV. SEMIEMPIRICAL MODELS**, by Baranovskij E. A., Kondrashova N. N., Pasechnik M. N. — Semiempirical inhomogeneous photospheric models of a plage and a small flare were constructed by fitting the calculated and observed profiles of 11 Fraunhofer lines. In the plage the upper layers of magnetic fluxtubes were more heated, and there was a region of decreased density in the middle photosphere. During the main phase of the flare the temperature in the magnetic fluxtubes was also higher than in their surroundings. Some photospheric layers were heated by 1500 K. The flare disturbance propagated from the upper to the

*lower layers and had a wave character. The variations of the thermodynamical parameters may be caused by the passage of a chromospheric condensation.*

## ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе [6] мы проанализировали поведение профилей фраунгоферовых линий, их асимметрию и смещения в спектрах спокойного флоккула и слабой вспышки на протяжении ее основной фазы. Выявленные изменения фраунгоферового спектра свидетельствуют о различии физических условий в фотосферных слоях флоккула и вспышки, а также о вариациях термодинамических параметров фотосферы в процессе развития вспышки. Цель настоящей работы — на основе имеющегося наблюдательного материала изучить физическое состояние фотосферы флоккула и вспышки.

Наблюдения с высоким пространственным разрешением показывают, что в фотосфере имеются неоднородности в виде грануляции, волн, ярких точек, ассоциируемых с мелкомасштабными магнитными силовыми трубками большой напряженности. Крупномасштабные движения тонкоструктурных элементов вызывают асимметрию и доплеровские смещения профилей линий. В активных областях увеличивается концентрация магнитных силовых трубок, изменяются размеры и скорости движения элементов грануляции [33,43]. О различиях профилей линий в спектрах флоккулов и невозмущенной фотосферы, полученных с высоким разрешением, сказано, например, в [24].

В последнее время появилось много работ по моделированию флоккулов и факелов, учитывающих их мелкомасштабную структуру [16—18, 23, 25—27, 35—41, 47 и др.]. Большая часть моделей — полуэмпирические, т. е. полученные путем согласования вычисленных профилей линий с наблюдаемыми. В настоящей работе построены полуэмпирические модели фотосферы флоккула и вспышки также с учетом ее неоднородной структуры.

## ОБЗОР ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОТОСФЕРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ВСПЫШЕК

Первые модели активных областей были однокомпонентными, основанными на наблюдательных данных низкого пространственного разрешения. Параметры в них усреднены по площади и времени. К таким моделям относится, например, модель яркого элемента VAL-F [46]. В работах [31] и [19] была обнаружена тонкая структура фотосферы активных областей. Выяснилось, что факелы состоят из ярких мелкомасштабных магнитных элементов (*filigree*) с диаметром 100—200 км, расположенных в межгранульных промежутках. Их свойства подробно описаны в книге Паркера [10].

Появилась большая группа двухкомпонентных моделей [17, 18, 23, 26, 27, 35—39, 41, 47], основанных на наблюдениях интенсивности континуума и измерениях параметров профилей параметров Стокса  $I$  и  $V$ . Эти модели включают статичную, осесимметричную магнитную силовую трубку, в которой сосредоточено сильное магнитное поле, погруженную в спокойную атмосферу без магнитного поля. В качестве модели невозмущенной фотосферы в этих работах использовались HSRA [22], VAL-C [46], MACKKL [30]. Моделированию силовых трубок посвящено много работ (см., например, [37]). Эти модели различаются распределением температуры, величиной напряженности магнитного поля, долей площади солнечной поверхности, занимаемой трубками (фактором заполнения). Температура в силовых

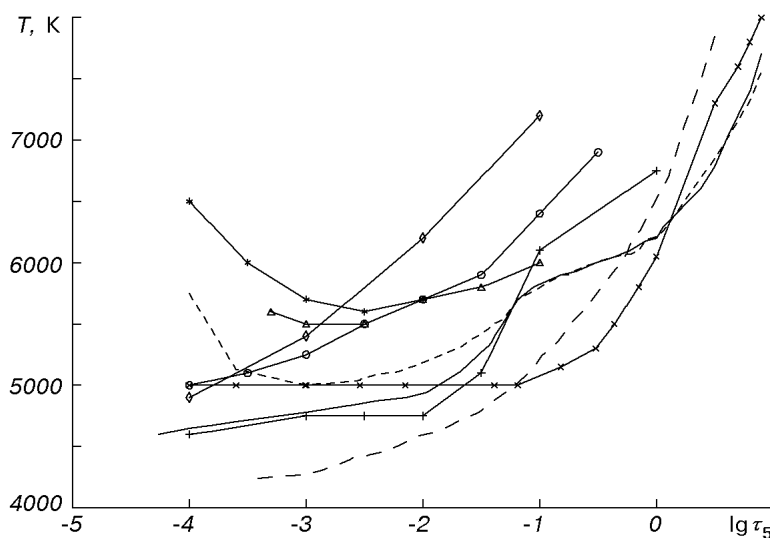


Рис. 1. Зависимость температуры от оптической глубины в моделях флоккулов: [27] (звездочки), [41] (кружочки), [47] (треугольники), [26] (крестики), [23] (косые крестики), [17] (короткие штрихи) и [40] (ромбы), PLA [38] (сплошная линия) и модель невозмущенной фотосферы для сравнения VAL-C (длинные штрихи)

трубках на 100—1000 К выше, чем в окружающей их фотосфере на тех же оптических глубинах. Напряженность магнитного поля по данным разных авторов составляет от 1 до 2.5 кГс, а фактор заполнения — от нескольких процентов до нескольких десятков процентов. Скорость потока в трубках, согласно [11, 35, 42], не более 0.3 км/с.

Температурные распределения в моделях силовых трубок, полученных разными исследователями, приведены на рис. 1. Для сравнения дана модель невозмущенной фотосферы VAL-C. Во всех моделях в верхних и средних слоях фотосферы трубка горячее окружающей среды на несколько сотен градусов. Модели Валтона [47], Кучмия и Штельмахера [27] и Штельмахера и Вира [41], построенные на основе измерений профилей  $I$ -параметра Стокса, имеют более высокую температуру в этих слоях, чем модели, основанные на измерениях профилей  $V$ -параметра [17, 26, 38]. Температура в глубоких слоях фотосферы активных областей (ниже  $\lg \tau_5 = -1$ ) определяется по величине контраста интенсивности континуума. Для низких значений контраста ( $\approx 0.9$  [23, 38]) и высоких (1.3—1.4 [35], 1.8 [26]) получены сильно отличающиеся температурные распределения. По сравнению с моделью невозмущенной фотосферы для модели Келлера [26] характерен избыток температуры в нижних слоях (рис. 1), а для модели Гроссмана—Дорфа [23] — ее дефицит. В немногих работах [16, 25] профили линий вычислены с использованием трехкомпонентной модели, включающей горячую магнитную силовую трубку и два немагнитных элемента грануляции с противоположно направленными движениями вещества в них: вверх — в грануле и вниз — в межгранульном промежутке. Чтобы описать грануляцию в однородную усредненную модель спокойной фотосферы вводились возмущения температуры и скорости [25]. Такие модели лучше описывают форму профилей линий, однако в этих работах получен скорее качественный, чем количественный результат.

Что касается вспышек, то модели их фотосферной части немногочисленны и, как правило, не учитывают пространственную неоднородность среды. Полуэмпирические модели Мачадо и др. [28, 29], Гана и Фанга [21] построены путем согласования вычисленных и наблюдаемых профилей

сильных линий  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ , H и K Ca II,  $h$  и  $k$  Mg II, крылья которых образуются в верхней фотосфере. Влияние магнитного поля при моделировании не учитывалось. Получено, что во время вспышек в области температурного минимума и верхней фотосфере температура выше на несколько сотен градусов, чем в невозмущенной фотосфере. В работе [21] прослежено изменение состояния верхней фотосферы в процессе развития мощной вспышки балла 2В. Установлено, что температура постепенно понижалась, и к концу вспышки опустилась до предвспышечного уровня. В работах [1–3, 8] полуэмпирические модели вспышек построены на основе анализа фраунгоферовых линий, преимущественно железа, образующихся в разных слоях фотосферы. Их особенностью является наличие одного или нескольких горизонтальных неоднородных слоев, в которых температура выше, чем в невозмущенной фотосфере на тех же уровнях. Согласно этим работам избыток температуры в верхних и средних слоях может достигать 2000 К. В работе [1] найдено, что в процессе развития вспышек прогретые слои смещались вглубь фотосферы.

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Мы использовали спектры спокойного флоккула и слабой вспышки, наблюдавшихся соответственно 23 и 24 мая 1979 г. в разных местах активного комплекса (АК) McMath 16025+16030, а также спектр невозмущенной фотосферы. Методика наблюдений и обработки описана в работе [6]. Исследуемая вспышка балла sf возникла в 12<sup>h</sup>56<sup>m</sup> UT и закончилась в 13<sup>h</sup>29<sup>m</sup> UT, максимум ее интенсивности в линии  $H_{\alpha}$  наблюдался в 13<sup>h</sup>02<sup>m</sup> UT. Повышения уровня интенсивности рентгеновского излучения не было. Используются спектры, полученные во время главной фазы развития вспышки, вскоре после  $H_{\alpha}$ -максимума интенсивности, в 13<sup>h</sup>06.1<sup>m</sup>; 13<sup>h</sup>18.0<sup>m</sup> и в 13<sup>h</sup>27.8<sup>m</sup> UT. Фотометрические разрезы спектров вспышки и флоккула делались в месте максимальной интенсивности линии  $H_{\alpha}$ .

#### Характеристики используемых линий

$\lambda$ , нм	Элемент	N	EPL, эВ	$d_0$	$\xi_{ef}$	$h_d$ , км	$h_W$ , км
629.09713	Fe I	1258	4.73	0.528	1.5	263	192
629.39224	Fe I	1260	4.83	0.114	2.0	140	127
629.78013	Fe I	62	2.22	0.649	1.0	399	300
630.15091	Fe I	816	3.65	0.719	1.67	489	286
630.25017	Fe I	816	3.69	0.650	2.5	381	264
630.34671	Fe I	1140	4.32	0.045	1.5	139	130
630.37619	Ti I	104	1.44	0.075	0.92	180	173
632.21740	Ni I	249	4.15	0.158	1.2	152	138
632.76079	Ni I	44	1.68	0.360	1.17	239	212
633.00941	Cr I	6	0.94	0.267	1.83	219	202
633.08519	Fe I	1254	4.73	0.317	1.17	180	150

Для построения моделей отобраны 11 фраунгоферовых линий металлов Fe I, Ti I, Cr I, Ni I на участке спектра  $\lambda\lambda$  629.1–633.0 нм. Их характеристики приведены в таблице: длины волн [34], элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня и номер мультиплета [32], эффективный фактор Ланде [15], центральная глубина профиля линии и высоты образования (вычисленные по центральной глубине и эквивалентной ширине) для невозмущенной фотосферы в центре диска из работы [5].

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ФРАУНГЕФЕРОВЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ФЛОККУЛА И ВСПЫШКИ

В результате анализа фраунгоферова спектра флоккула и его сравнения со спектром невозмущенной фотосферы найдено, что изменения наиболее выражены в ядрах сильных линий, образующихся в верхних слоях фотосферы выше 200 км [6]. Центральные глубины этих линий уменьшены в среднем на 16 %. Линии, образующиеся в нижних слоях, показывают как увеличение, так и уменьшение центральных глубин. Полуширины линий, как правило, увеличены, в некоторых случаях на 30 %. Исключение составили линии Fe I, Ti I и Cr I с высотой образования 180—220 км, которые были сужены и усилены. Выявлено также, что средние и верхние части бисекторов линий смещены в длинноволновую часть спектра. Изменения лучевой скорости движения вещества на уровне фотосферы относительно ее величины для невозмущенной фотосферы, полученные по смещениям линий в спектрах, были невелики ( $\pm 0.25$  км/с).

В работе [6] выявлены также изменения профилей линий в процессе развития вспышки. Оказалось, что поведение линий зависит от их интенсивности, высоты образования и потенциала возбуждения. Изменения параметров профилей линий находились по отношению к их значениям для невозмущенной фотосферы. Общая картина этих изменений такова. В 13<sup>h</sup>06.1<sup>m</sup> UT, через четыре минуты после  $H_{\alpha}$ -максимума интенсивности, в 13<sup>h</sup>06.1<sup>m</sup> UT, сильные линии, образующиеся в верхних слоях (240—490 км), были ослаблены на 2—4 % и расширены на 10—15 %, а в средних и нижних слоях (меньше 240 км) — преимущественно усилены в среднем на 10 %. В последующие моменты наблюдений, в 13<sup>h</sup>18.0<sup>m</sup> и 13<sup>h</sup>27.8<sup>m</sup> UT, ослабленными оказались линии, образующиеся в нижних слоях фотосферы, а центральные глубины линий, образующихся в верхних слоях, увеличились и мало отличались от их значений для невозмущенной фотосферы. Большинство линий во все моменты наблюдений вспышки имели красную асимметрию и были смещены в длинноволновую часть спектра относительно их положения в спектре невозмущенной фотосферы, т. е. преобладало опускание фотосферного вещества. Скорость нисходящего потока изменялась с высотой и со временем. Более подробные сведения о поле скоростей приведены в [7]. Наибольшие изменения лучевой скорости наблюдались в 13<sup>h</sup>18.0<sup>m</sup> UT, через 16 мин после  $H_{\alpha}$ -максимума. В конце вспышки в верхних слоях фотосферы лучевая скорость уменьшилась примерно на 0.6 км/с. Особо резкие изменения скорости движения вещества, от 0.8 км/с в 13<sup>h</sup>06.1<sup>m</sup> UT до 1.5 км/с в 13<sup>h</sup>18.0<sup>m</sup> UT, наблюдались в средней фотосфере на высотах 180—220 км. Также следует отметить, что линии, образующиеся в этом слое, были сужены, особенно сильно в 13<sup>h</sup>18.0<sup>m</sup> UT (в среднем на 25 %). В этот момент наблюдений у многих линий выделились компоненты. У линий, образующихся в верхних слоях, — в «красном» крыле, в нижних слоях — в «синем» крыле, а у линий с высотой образования 180—220 км — и в «синем» и в «красном» крыльях.

### МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Термодинамические параметры фотосферы флоккула и вспышки определялись путем согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий методом подбора, пока не достигалось наилучшее совпадение профилей. Теоретические профили вычислялись по программе Э. А. Барановского. Методика вычислений подробно изложена в [14].

Алгоритм программы содержит метод решения интегрального уравнения

для функции источников [13]. Уравнения ионизационного равновесия решались в приближении, описанном в работе [12]. Отклонение от ЛТР учитывалось только при вычислении степени ионизации элементов. Расчеты выполнены с моделью атома железа, включающей 16 уровней и континуум.

В качестве источника непрерывного поглощения рассматривались следующие атомы и ионы: H, H<sup>+</sup>, He, He<sup>+</sup>, Mg I, Si I, C I, Al I, Fe I. Учитывалось также рассеяние на атомах водорода, гелия и электронах. В качестве основных механизмов, вызывающих уширение линий, принимались взаимодействия Ван-дер-Ваальса и затухание вследствие излучения (квадратичным эффектом Штарка для исследуемых линий можно было пренебречь).

При расчетах предполагалось, что магнитное поле — продольное (угол между лучом зрения и вектором магнитного поля  $\gamma = 0$ ). Выражения для расчета профилей линий с учетом магнитного поля получены путем преобразования уравнений Унно для параметров Стокса [45].

В качестве исходной модели невозмущенной фотосферы взята гидродинамическая модель солнечной грануляции А. С. Гадуна [4]. Модель получена путем усреднения временно-зависимой последовательности 2-мерных ГД-моделей.

Из нее нами были выделены два компонента — модели гранулы и межгранульного пространства. Зависимости температуры  $T$  от  $\lg \tau_5$  для этих моделей приведены на рис. 2, а, плотности — рис. 2, б. Доля площади, занимаемой гранулами, принималась равной 70 %, а межгранульным пространством — 30 %. Предполагалось, что в грануле вещество поднимается, а в межгранульном пространстве — опускается. Контраст интенсивности континуума гранула — межгранульное пространство составлял 1.4.

Расчеты начинались с уточнения значений сил осцилляторов и постоянной затухания путем согласования вычисленных профилей линий с наблюдаемыми в спектре невозмущенной фотосферы. Обилие элементов и исходные значения сил осцилляторов брались из книги [5]. Распределения лучевой скорости в компонентах модели были также приведены в соответствие с нашими наблюдениями (рис. 2, в). Значения микро- и макротурбулентных скоростей принимались постоянными по высоте фотосферы и равными соответственно 1 км/с и 1.8 км/с.

Для случая активной области (флоккул и вспышка) в 2-компонентную модель невозмущенной фотосферы был включен третий компонент — силовая трубка. В качестве исходной взята полуэмпирическая модель трубки PLA [38], которая является улучшенной версией модели флоккула Соланки [35]. Температурная зависимость из этой модели приведена на рис. 1. Эта модель основана на наблюдениях на фурье-спектрометре обсерватории Китт-Пик профилей V-параметра Стокса для линий C I и Fe II. При выборе значений напряженности магнитного поля мы основывались на данных, полученных разными исследователями (см. обзор Соланки [37]). В этих работах найдено, что в верхних слоях H меньше, чем в средних и нижних, поэтому мы приняли, что напряженность магнитного поля в модели изменяется от 1500 Гс в нижних до 500 Гс в верхних слоях фотосферы. Микротурбулентная скорость принята постоянной и равной 1 км/с. Согласно [11, 36, 37, 42] в силовых трубках лучевая скорость невелика и не должна превышать 0.3 км/с. В наших расчетах ее величина принималась равной -0.2 км/с.

Для каждого из трех компонент модели вычислялся профиль линии. Полученные профили суммировались с учетом долей занимаемой компонентами площади. Профиль линии, вычисленный таким образом, сравнивался с наблюдаемым и методом проб и ошибок определялись температура  $T$ ,

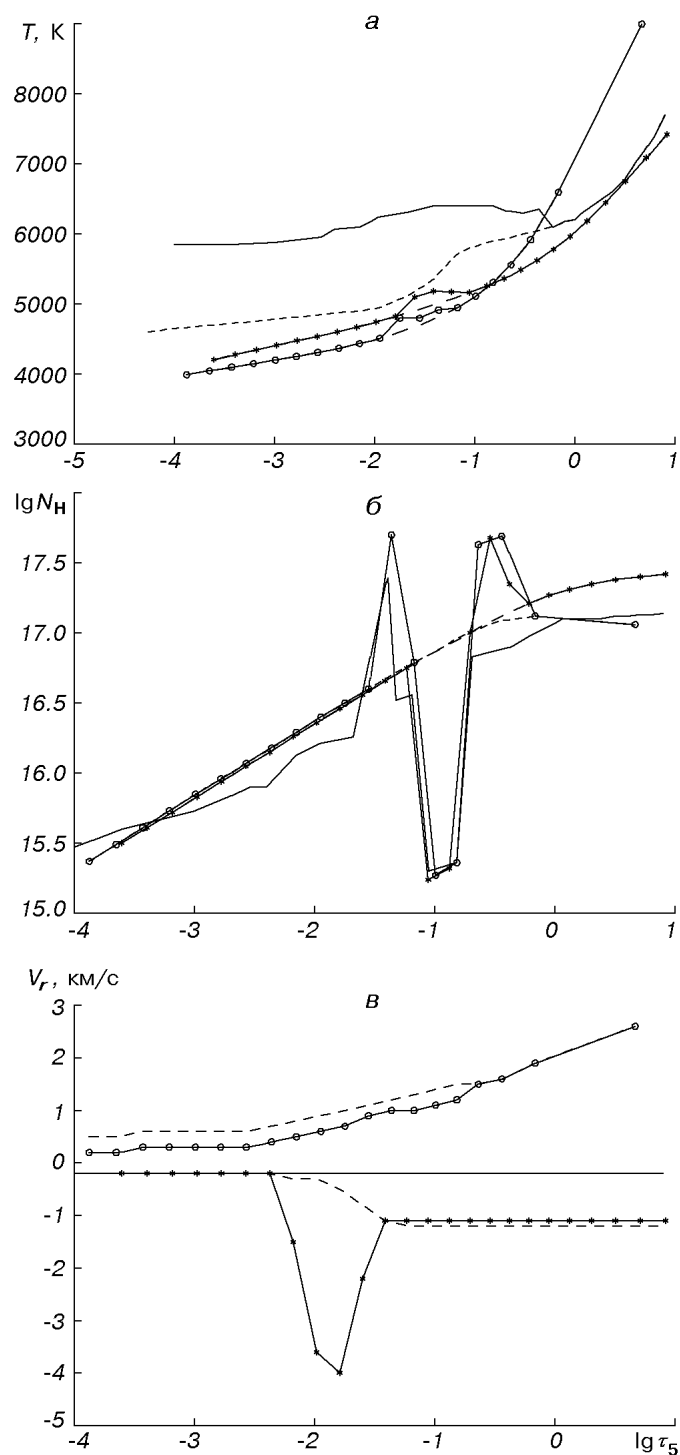


Рис. 2. Зависимости температуры (а), концентрации атомов водорода (б) и лучевой скорости (в) от оптической глубины в трехкомпонентной модели флоккула: модель трубки (сплошная линия), модель гранулы (кружочки) и модель межгранульного промежутка (звездочки). Для сравнения приведена модель PLA (короткие штрихи) и невозмущенной фотосферы (длинные штрихи)

плотность атомов водорода  $N_H$ , макротурбулентная скорость  $V_{ма}$ , лучевая скорость  $V_r$ , напряженность магнитного поля. При расчетах велся контроль за тем, чтобы интенсивность в непрерывном спектре не отличалась от ее

величины для невозмущенной фотосферы, приведенной в [9], так как изменений интенсивности континуума в спектрах флоккула и вспышки не зарегистрировано.

#### МОДЕЛЬ ФЛОККУЛА

Построение модели мы начинали с подбора площадей, занимаемых компонентами. При этом использовали сильную зависимость величины контраста интенсивности континуума от фактора заполнения. На существование этой зависимости неоднократно обращалось внимание, например в теоретической работе [40]. Для площадей, занимаемых гранулами, межгранульными промежутками и силовыми трубками, нами получено соотношение 52:32:16. При этом макротурбулентная скорость составила 0.75 км/с. Отношение интенсивности непрерывного спектра в трубке к средней интенсивности континуума невозмущенной фотосферы оказалось равным 1.12. На рис. 2, а приведена полученная нами зависимость температуры в трубке от оптической глубины. В интервале  $\lg\tau_5$  от  $-4.0$  до  $-0.5$  температура в нашей модели выше, чем в исходной модели PLA. Для того чтобы описать отмеченное выше ослабление на 16% сильных линий в спектре флоккула, мы увеличили температуру в верхних и средних слоях фотосферы трубки примерно на 1000 К по сравнению с моделью PLA. В нижних слоях достаточно было увеличить температуру на 500 К. Для лучшего согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий, образующихся в средней фотосфере, в моделях гранулы и межгранульного промежутка в районе  $\lg\tau_5 \approx -1.5$  температура была увеличена на 100 К по сравнению с ее значением в модели невозмущенной фотосферы. Следует отметить, что в более поздних работах Соланки с сотрудниками [17, 18] пересмотрели температурное распределение в верхней части модели PLA и пришли к выводу, что в области  $\lg\tau_5 = -3.5 \dots -2.0$  можно ожидать более высоких значений температуры, чем в ранней модели. Наша модель лучше согласуется с моделями Кучмия и Штельмахера [27] и Валтона [47], а также с теоретической моделью силовой трубки Штейнера и Стенфло [40], но показывает гораздо более высокую температуру в верхних слоях, чем модели, полученные по измерениям V-параметра Стокса [17, 26, 38].

На рис. 2, б приведены зависимости плотности атомов водорода от оптической глубины для трех компонентов модели. Наблюдаемое усиление и сужение линий, образующихся на высотах 180—220 км ( $\lg\tau_5 \approx -1$ ), может свидетельствовать о том, что в этом слое было сильно понижено давление. В нашей модели концентрация атомов водорода понижена на 1.5 порядка. На соседних высотах  $N_H$  несколько повышена (рис. 2, б).

Изменение лучевой скорости (рис. 2, в) в грануле невелики по сравнению с ее значениями для невозмущенной фотосферы. Чтобы описать «красную» асимметрию крыльев сильных линий, в модели межгранулы необходимо было увеличить скорость опускания вещества на 3.5 км/с вблизи  $\lg\tau_5 \approx -2$ .

Можно заметить, что полученные изменения плотности и скорости относятся не к одним и тем же слоям фотосферы. Были рассмотрены и другие варианты изменения скорости, плотности и магнитного поля с высотой фотосферы, в том числе в одних и тех же слоях. Однако расчеты не привели к улучшению согласия вычисленных и наблюдаемых профилей линий. Возможно, полученные распределения физических параметров связаны с волновыми процессами во флоккуле под влиянием увеличения концентрации магнитных силовых трубок и движения гранул [10].



## МОДЕЛИ ВСПЫШКИ

Моделирование выполнено для трех моментов наблюдений вспышки в ее главной фазе: в  $13^{\text{h}}06.1^{\text{m}}$ ;  $13^{\text{h}}18.0^{\text{m}}$  и  $13^{\text{h}}27.8^{\text{m}}$  UT. За исходную модель трубки, как и для флоккула, взята модель PLA. Ослабление линий в спектрах вспышки было меньше, чем в спектре флоккула, поэтому, согласно нашим расчетам, доля площади, занимаемая трубками, была меньшей. В первый момент наблюдений соотношение площадей гранулы, межгранульного промежутка и трубки получено 66:24:10, во второй момент 65:25:10 и в третий 66:27:7.

Зависимости термодинамических параметров от оптической глубины в полученных моделях трубки приведены на рис. 3. Их изменение происходит неравномерно по высоте — выделяются слои с повышенной или пониженной температурой, давлением, лучевой скоростью. Зависимости  $T(\lg\tau_5)$  для трех моментов наблюдения вспышки даны на рис. 3, а. Здесь же для сравнения приведены модели спокойного флоккула PLA (трубки) и межгранульной области невозмущенной фотосферы. Модели показывают, что в первый момент наблюдений верхние слои фотосферы были прогреты на 500 К относительно PLA и на 1000 К относительно невозмущенной фотосферы. Ниже расположенный слой  $\lg\tau_5 = -1.3\dots-2$  был горячее невозмущенной фотосферы на 1500 К на этих же оптических глубинах, а второй, более глубокий, — на 500 К. В следующий момент наблюдений, через 12 мин, верхний слой охладился до температуры невозмущенной трубки PLA. Прогретые слои опустились в глубь фотосферы — вспыхечное возмущение достигло области образования континуума. Но отклонение температуры от ее величины в первоначальной модели в этих слоях уменьшилось. К концу вспышки прогретыми оказались те же слои фотосферы, что и в первый момент наблюдений, причем в верхних и средних слоях температура стала выше примерно на 200 К, чем в предыдущий момент. По-видимому, изменения температуры со временем имели колебательный характер. Модели гранулы и межгранульного пространства показывают подобные, но менее выраженные, изменения температуры фотосферы под действием вспышки (100—500 К).

Изменение концентрации атомов водорода  $N_{\text{H}}$  в зависимости от оптической глубины в силовой трубке приведены на рис. 3, б. Расчеты показали, что в  $13^{\text{h}}06.1^{\text{m}}$  UT в средней и нижней фотосфере выделились два слоя с пониженной ( $\lg\tau_5 \approx -1.25$ ) и повышенной ( $\lg\tau_5 \approx -0.75$ ) плотностью.

В  $13^{\text{h}}18.0^{\text{m}}$  UT средняя и нижняя фотосфера представляла собой ряд слоев разной толщины, в которых чередовались пониженная и повышенная плотность атомов водорода. К концу вспышки в средней фотосфере, по-видимому, существовал довольно широкий слой с пониженной плотностью.

Изменения лучевой скорости в грануле, межгранульном промежутке и в трубке в разные моменты вспышки приведены на рис. 3, в. Лучевую скорость  $V_r$  в модели трубки мы приняли постоянной по высоте и равной  $-0.2$  км/с, как и для флоккула. Предполагается, что в грануле происходит подъем вещества, что соответствует положительным значениям  $V_r$  на рисунке, а в межгранульном промежутке — его опускание, что соответствует отрицательным значениям  $V_r$ . В верхних слоях фотосферы в течение наблюдений  $V_r$  изменялась не более чем на 0.6 км/с. В первый момент наблюдений в нижних слоях скорость подъема и опускания фотосферного вещества была увеличена на 1 км/с.

Через 12 мин, в  $13^{\text{h}}18.0^{\text{m}}$  UT, в крыльях линий, как получено в нашей предыдущей работе [6, рис.6], выделились компоненты. Мы попытались варьировать величину напряженности магнитного поля в модели силовой

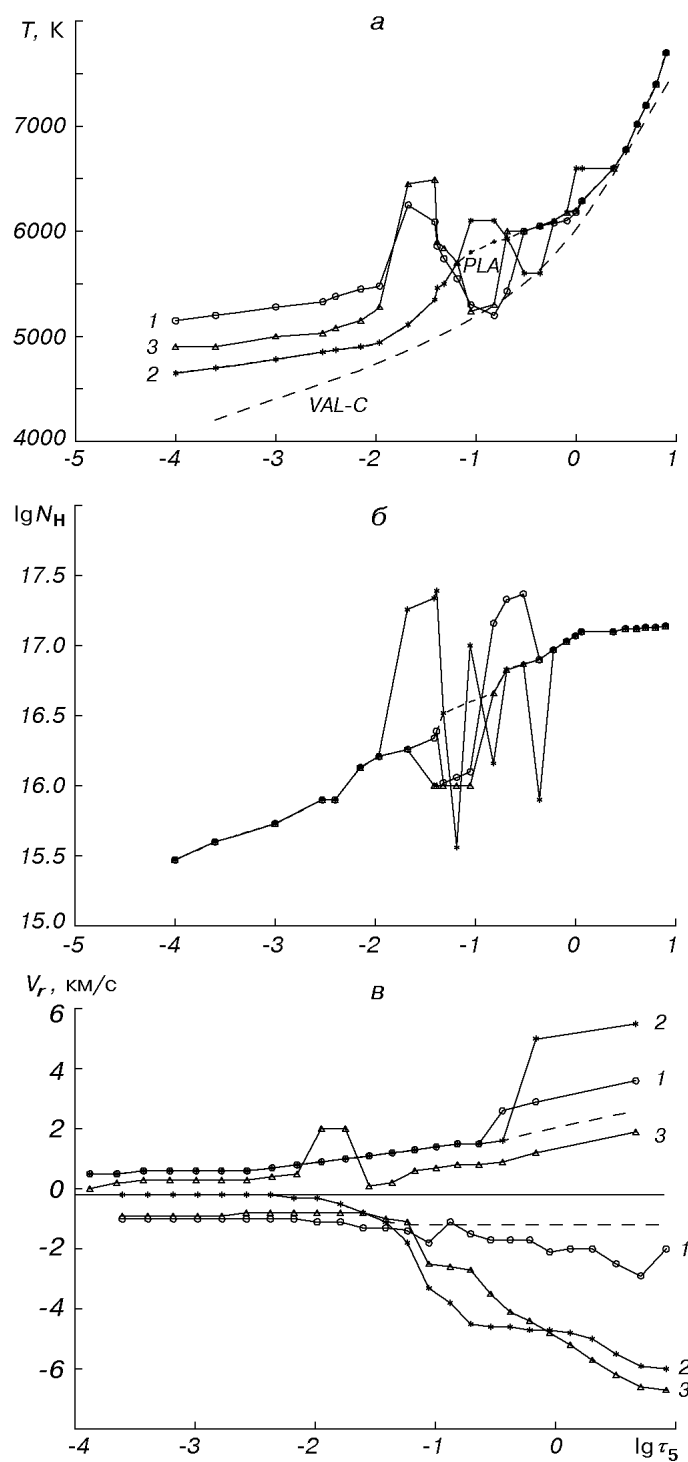


Рис. 3. Зависимости температуры (*a*) и концентрации атомов водорода (*б*) от оптической глубины в модели трубки для трех моментов наблюдений вспышки: 1 —  $13^{\text{h}}06.1^{\text{m}}$  UT (кружочки), 2 —  $13^{\text{h}}18.0^{\text{m}}$  UT (звездочки) и 3 — в  $13^{\text{h}}27.8^{\text{m}}$  UT (треугольники). Для сравнения приведена модель PLA (короткие штрихи) и модель невозмущенной фотосферы (длинные штрихи); *в* — зависимость лучевой скорости в моделях гранулы (положительные значения) и межгранульного промежутка (отрицательные значения), штрихи — в исходной модели невозмущенной фотосферы

трубки, при этом вычисленный профиль линии сильно изменялся. Однако эти изменения не повлияли на средний профиль линии, что объясняется малой долей площади, занимаемой трубками. Наблюдаемые профили нам удалось описать, лишь сильно увеличив скорость движения фотосферного вещества и ее градиент в грануле и межгранульном промежутке в области  $\lg\tau_5 > -1$ . Скорость поднимающегося потока увеличена в среднем на 3 км/с, а опускающегося — на 3.5 км/с. Особенно резко скорость опускания увеличена в средней фотосфере, в области  $\lg\tau_5 \approx -1$ . В работе [6] уже отмечалось, что линии, образующиеся в этом довольно узком слое, сильно сместились в длинноволновую сторону спектра.

К концу вспышки скорость подъема стала меньше, чем для спокойной фотосферы. Скорость опускания в среднем слое тоже уменьшилась, а в самом нижнем — увеличилась на 0.8 км/с.

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Однородные модели фотосферы недостаточно хорошо описывают наблюдаемые асимметричные профили фраунгоферовых линий. В нашей работе построены неоднородные модели фотосферной части флоккула и вспышки. Они состоят из трех компонентов — гранулы, межгранульного промежутка и силовой трубки, в которой сосредоточено сильное магнитное поле — порядка 1.5 кГс. Особенностью полученных моделей является то, что изменение термодинамических параметров происходит неравномерно по высоте. Выделяются области, где температура, плотность, лучевая скорость повышены или понижены относительно их значений для невозмущенной фотосферы. В моделях, приведенных в работах [1—3, 8], изменения параметров имеют аналогичный характер.

Согласно рассчитанной нами модели флоккула температура фотосферных слоев на 500—2000 К выше, чем в модели невозмущенной фотосферы. Разница температуры во флоккульной трубке и в невозмущенной фотосфере уменьшается с глубиной. В средних слоях фотосферы выделилась узкая область с пониженной на полтора порядка плотностью атомов водорода и существовал слой, в котором вещество опускалось со скоростью на 3.5 км/с большей, чем в соседних слоях.

Полученные модели вспышки показывают, что физическое состояние вещества фотосферы изменялось в течение главной фазы развития вспышки. Фотосферная область вспышки представляла собой чередование слоев с температурой, плотностью и лучевой скоростью, резко отличающейся от их значений для невозмущенной фотосферы. Изменения этих параметров со временем указывают на волновой характер распространения вспышечного возмущения. Смещение прогретых слоев вглубь фотосферы ко второму моменту наблюдений и преобладание нисходящего движения вещества, по-видимому, свидетельствуют о том, что вспышечное возмущение распространялось сверху вниз. Возможно, оно было вызвано прохождением хромосферной конденсации и связанных с нею волн [20]. Не исключены и колебания фотосферы, подобные тем, которые наблюдались Ганом и Фангом в хромосферных слоях во время мощной вспышки [21]. В нашей предыдущей работе [7], в которой использованы спектры с более высоким временным разрешением, выявлены колебания лучевых скоростей в фотосфере рассматриваемой здесь вспышки. Увеличение лучевой скорости движения вещества в гранулах и межгранульных промежутках относительно ее значений для невозмущенной фотосферы (рис. 3, в) свидетельствует об усилении конвекции в фотосферных слоях вспышки. Структурные изменения фотосферы от первого момента ко второму были малы, а к концу вспышки размер трубок

уменьшился. Если в начале наблюдений площадь, занимаемая трубками, составляла 10 % от общей площади, то в конце — 7 %.

Таким образом, термодинамические параметры состояния фотосферного вещества были изменены как во вспышке, так и во флоккуле. Однако величина и характер этих изменений были разными. Так, во флоккуле ход температуры с высотой был более равномерным. И во флоккуле, и во вспышке выделились слои с пониженной плотностью. Наибольшие различия между флоккулом и вспышкой проявились в изменениях лучевых скоростей движения фотосферного вещества. Во флоккуле изменения лучевой скорости в целом были небольшими в отличие от вспышки, в средних и нижних фотосферных слоях которой скорость движения вещества изменялась резко и на большую величину.

Наши модели хорошо описывают форму профилей наблюдаемых линий. Однако в последнее время в ряде теоретических работ показано, что диаметр трубок должен увеличиваться с высотой, в результате чего в верхних слоях фотосферы трубки могут сливаться. Учитывается также неоднородность распределения температуры в трубке по горизонтали, наклон трубок, нисходящий поток вещества вдоль границ трубки. Эти тонкие эффекты должны найти свое отражение в дальнейших разработках полуэмпирических моделей активных образований.

В свое время А. С. Гадун предоставил нам программы расчетов модели грануляции и давал весьма ценные советы по ее использованию.

1. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. и др. Полуэмпирические модели фотосферы солнечного комплекса активности // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—11, № 2.—С. 11—24.
2. Барановский Э. А., Курочка Е. В. Эмиссия в линиях нейтрального и ионизованного железа в солнечных вспышках // Солнеч. данные.—1989.—№ 10.—С. 98—103.
3. Барановский Э. А., Лозицкая Н. И., Лозицкий В. Г. Магнитные поля и термодинамические условия в солнечной вспышке 8 июня 1989 года // Кинематика и физика небес. тел.—1991.—7, № 3.—С. 52—58.
4. Гадун А. С. Многомерные гидродинамические модели атмосферы Солнца: эффекты переноса излучения в многомерной возмущенной среде // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—11, № 3.—С. 54—72.
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
6. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. I. Профили, асимметрия и смещения фраунгоферовых линий // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 4.—С. 61—75.
7. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. III. Поле скоростей // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.—С. 310—317.
8. Лозицкий В. Г., Барановский Э. А. Определение магнитного поля и термодинамических параметров в солнечной вспышке // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1993.—88.—С. 67—72.
9. Макарова Е. А., Харитонов А. В., Казачевская Т. В. Поток солнечного излучения. — М.: Наука, 1991.—400 с.
10. Паркер Е. Космические магнитные поля. — М.: Мир, 1982.—Ч. 1.—608 с.
11. Alissandrakis C. E., Dara H. C., Koutchmy S. Study of small scale magnetic flux and the corresponding velocity pattern // Astron. and Astrophys.—1991.—249, N 2.—P. 533—538.
12. Athay R. G., Lites B. W. Fe I ionisation and excitation equilibrium in the solar atmosphere // Astrophys. J.—1972.—176, N 3.—P. 809—831.
13. Avrett E. H., Loeser R. Formation of line and continuous spectra. I. Source-function calculations. — Cambridge, 1969.—N 303.—98 p.—(Smith. Astrophys. Obs. Special Rep.).
14. Baranovsky E. A. Semiempirical LTE modelling of solar photospheric layers. I. Theoretical background // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.—1993.—23.—P. 1—8.
15. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
16. Brandt P. N., Solanki S. K. Solar line asymmetries and the magnetic filling factor // Astron. and Astrophys.—1990.—231, N 1.—P. 221—234.
17. Briand C., Solanki S. K. Empirical models of solar magnetic elements constraints imposed by Mg I Stokes profiles // Astron. and Astrophys.—1995.—299, N 2.—P. 596—610.

18. *Bruls J. H. M. J., Solanki S. K.* The chromospheric temperature rise in solar magnetic flux tubes // *Astron. and Astrophys.*—1993.—273, N 1.—P. 293—303.
19. *Dunn R. B., Zirker J. B.* The solar filigree // *Solar Phys.*—1973.—33, N 2.—P. 281—304.
20. *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.*—1989.—346, N 2.—P. 1019—1029.
21. *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.
22. *Gingerich O. J., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // *Solar Phys.*—1971.—18, N 3.—P. 347—365.
23. *Grossmann-Doerth U., Knolker M., Schussler M., Solanki S. K.* The deep layers of solar magnetic elements // *Astron. and Astrophys.*—1994.—285, N 2.—P. 648—654.
24. *Guenther E., Mattig W.* High resolution line profiles in quiet and plage regions of the Sun // *Astron. and Astrophys.*—1991.—243, N 1.—P. 244—250.
25. *Immerschitt S., Schroter E. H.* The behaviour of asymmetry and other profile parameters of the Fe I  $\lambda$  5576.1 Å line in solar regions of varying magnetic activity // *Astron. and Astrophys.*—1989.—208, N 1/2.—P. 307—313.
26. *Keller C. U., Solanki S. K., Steiner O., Stenflo J. O.* Structure of solar magnetic fluxtubes from the inversion of Stokes spectra at disk center // *Astron. and Astrophys.*—1990.—233, N 2.—P. 583—597.
27. *Koutchmy S., Stellmacher G.* Photospheric faculae. II. Line profiles and magnetic field in the bright network of the quiet Sun // *Astron. and Astrophys.*—1978.—67, N 1.—P. 93—102.
28. *Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W.* Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.*—1980.—242.—P. 336—351.
29. *Machado M. E., Linsky J. L.* Flare model chromospheres and photospheres // *Solar Phys.*—1975.—42, N 2.—P. 395—420.
30. *Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M. et al.* A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // *Astrophys. J.*—1986.—306, N 1.—P. 284—303.
31. *Mehlretter J. P.* Observations of photospheric faculae at the center of the solar disk // *Solar Phys.*—1974.—38, N 1.—P. 43—57.
32. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards.—1966.—349 p.
33. *Muller R., Roudier Th., Hulot J. C.* Perturbation of the granular pattern by the presence of magnetic flux tubes // *Solar Phys.*—1989.—119, N 2.—P. 229—243.
34. *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak Contribution.*—1972.—N 559.—43 p.
35. *Solanki S. K.* Velocities in solar magnetic fluxtubes // *Astron. and Astrophys.*—1986.—168, N 1/2.—P. 311—329.
36. *Solanki S. K.* The origin and the diagnostic capabilities of the Stokes V asymmetry observed in solar faculae and the network // *Astron. and Astrophys.*—1989.—224, N 1-2. —P. 225—241.
37. *Solanki S. K.* Empirical models of photospheric flux tubes // *Solar photosphere: structure, convection and magnetic fields* / Ed J. O. Stenflo. — Dordrecht: Kluwer, 1990.—P. 103—120. —(IAU Symp. N 138).
38. *Solanki S. K., Brigljevic V.* Continuum brightness of solar magnetic elements // *Astron. and Astrophys.*—1992.—262, N 2.—P. L29—L32.
39. *Solanki S. K., Stenflo J. O.* Models of solar magnetic fluxtubes: constraints imposed by Fe I and Fe II lines // *Astron. and Astrophys.*—1985.—148, N 1.—P. 123—132.
40. *Steiner O., Stenflo J. O.* Model calculations of the photospheric layers of solar magnetic fluxtubes // *Solar photosphere: structure, convection and magnetic fields* / Ed J. O. Stenflo. — Dordrecht: Kluwer, 1990.—P. 181—184.—(IAU Symp. N 138).
41. *Stellmacher G., Wiehr E.* A common model for solar filigree and faculae // *Astron. and Astrophys.*—1979.—75, N 3.—P. 263—267.
42. *Stenflo J. O., Harvey J. W.* Dependence of the properties of magnetic fluxtubes on area factor or amount of flux // *Solar Phys.*—1985.—95, N 1.—P. 99—118.
43. *Title A. M., Tarbell T. D., Topka K. P., et al.* Statistical properties of solar granulation derived from the SOUP instrument on Spacelab 2 // *Astrophys. J.*—1989.—336, N 1.—P. 475—494.
44. *Topka K. P., Tarbell T. D., Title A. M.* High-resolution observations of changing magnetic features on the Sun // *Astrophys. J.*—1986.—306, N 1.—P. 304—316.
45. *Unno W.* Line formation of a normal Zeeman triplet // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1956.—8, N 3/4.—P. 108—125.
46. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—45, N 4.—P. 635—725.
47. *Walton S. R.* Flux tube models of solar plages // *Astrophys. J.*—1987.—312, N 2.—P. 909—929.