

УДК 523.985.3

**С. Н. Черногор, К. В. Аликаева**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

## **Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой вспышки.**

### **II. Полуэмпирические фотосферные модели**

*Продолжено изучение физических условий во вспышечной петле 2 августа 1990 г. На основе полуэмпирического моделирования были исследованы термодинамические и магнитные параметры и лучевые скорости в фотосферной части основания вспышечной петли и в пространстве под ее вершиной. Полученные модели свидетельствуют о наличии неоднородностей в распределении температуры, концентрации атомов водорода, электронной концентрации и лучевых скоростей с глубиной во вспышечной атмосфере. В импульсной фазе слои с неоднородностями смещаются вглубь фотосферы вплоть до ее основания. Со временем возмущение затухает в нижних слоях фотосферы.*

**СТАН ХРОМОСФЕРНОЇ ТА ФОТОСФЕРНОЇ РЕЧОВИНИ СЛАБКОГО СПАЛАХУ. II. НАПІВЕМПІРИЧНІ ФОТОСФЕРНІ МОДЕЛІ,** Черногор С. М., Аликаева К. В. — Продовжено вивчення фізичних умов в спалаховій петлі 2 серпня 1990 р. На основі напівемпіричного моделювання були досліджені термодинамічні та магнітні параметри і променеві швидкості у фотосферній частині основи спалахової петлі та під її вершиною. Отримані моделі свідчать про наявність неоднорідностей в розподілі температури, концентрації атомів водню, електронної концентрації та променевих швидкостей з глибиною в спалаховій атмосфері. В імпульсній фазі шари з неоднорідностями зміщуються вглиб фотосфери до її основи. З часом збудження затухає в нижніх шарах фотосфери.

**STATE OF THE CHROMOSPHERIC AND PHOTOSPHERIC MATERIAL OF THE SUBFLARE. II. SEMIEMPIRICAL PHOTOSPHERIC MODELS,** by Chornogor S. N., Alikaeva K. V. — The study of physical conditions in the flare loop on 2 August 1990 is continued. From the semiempirical simulations, the thermodynamic and magnetic properties and the line-of-sight velocities at the photospheric part of the flare loop were investigated. The models reveal the presence of some inhomogeneous layers in the distributions of temperature, total hydrogen number density, electron number density, and LOS velocities with depth in the flare atmosphere. In the impulsive phase these inhomogeneities penetrated to the photosphere down to its base and dissipated with time.

## ВВЕДЕНИЕ

Накопленные наблюдательные данные о солнечных вспышках убедительно свидетельствуют, что во вспышечном процессе участвуют все слои солнечной атмосферы. Это необходимо учитывать при построении реальных гидродинамических моделей вспышек. К сожалению, при теоретическом моделировании атмосферного отклика [5, 11], как правило, диапазон высот ограничивается снизу хромосферой. Таким образом, фотосферные слои остаются вне рассмотрения.

Динамическая картина отклика всей атмосферы, включая фотосферу, теоретически рассмотрена авторами работы [16]. Ими выполнено моделирование низкотемпературной и высокотемпературной частей вспышечной петли для разных моментов импульсной фазы. Согласно этим моделям возникающее в результате магнитного пересоединения избыточное давление в короне приводит к образованию более холодной и плотной, чем окружающая атмосфера, конденсации, движущейся вниз в хромосферу. Результаты моделирования показывают, что влияние конденсации, которая отождествляется с ударной волной, распространяется частично и на фотосферу. Оно проявляется в дополнительном нагреве, увеличении плотности и скорости вещества верхней фотосферы. Более того, чем жестче поток нетепловых электронов, тем глубже в фотосферу проникает возмущение (до 300 км).

Высокая температура ( $T \approx 5620$  К) в области температурного минимума (ОТМ) получена в полуэмпирической модели Динга [8] для белой вспышки с необычно интенсивными крыльями в линии  $K$  Ca II. Автор считает, что перенос энергии из короны в нижние слои атмосферы не может полностью обеспечить нагрев ОТМ. Существенно нагреть ОТМ могут достаточно мощные пучки ускоренных электронов или протонов, возникающие непосредственно в ОТМ.

На основе моделирования в [13] показано, что в формирование бальмеровских профилей «усов» вносят вклад дискретные горячие и плотные слои атмосферы, локализованные на разных высотах и движущиеся с разными скоростями. Эти движения обусловлены ударной волной, распространяющейся вверх из фотосферы через хромосферу.

С другой стороны, результаты полуэмпирического моделирования хромосферы [7, 12] подтверждают факт образования движущейся вниз из области магнитного пересоединения в короне конденсации, которая существует около 1 мин [10]. Предполагалось, что конденсация не проникает глубже области температурного минимума. Скорость вещества внутри конденсации принималась постоянной. Однако, как показано в [9], это предположение опровергается наблюдениями.

В ряде работ последних лет важная роль отводится процессам в фотосфере на ранней стадии возникновения вспышки или до ее начала [14, 17, 18, 20]. Эти процессы рассматриваются в качестве первопричины подъема магнитных петель в корону и их последующего быстрого пересоединения с крупномасштабным полем в короне, что и приводит к взрывному освобождению энергии, т. е. к вспышке. В [17] авторы связывают поярчание корональных петель и аркад с диссипацией МГД-волн, возникающих в результате движений фотосферных оснований этих магнитных структур под действием конвекции фотосферной плазмы.

Прояснить вопрос о роли процессов в фотосфере на разных этапах развития вспышек можно путем моделирования с использованием данных наблюдений. Следует отметить, что эмпирические модели для описания глубоких фотосферных слоев весьма малочисленны. Такие модели должны создаваться на основе анализа вспышечного фраунгоферова спектра.

Основой для полуэмпирических моделей для слабой (F1) и для более сильной (F2) вспышек в [15] послужили наблюдения вспышечного ультрафиолета на КА «Skylab». По сравнению с моделями невозмущенной атмосферы для моделей F1 и F2 характерен более горячий и глубже расположенный температурный минимум, более высокие плотности в области, где формируется бальмеровская серия. Однако фотосферная часть этих моделей не дает реального представления о состоянии фотосферных слоев в процессе развития вспышки.

Полуэмпирические модели верхней фотосферы для мощной вспышки рассчитаны по эмиссионным линиям нейтрального и ионизованного железа в работе [4]. Показано, что согласие непрерывного спектра, теоретических и наблюдаемых профилей может быть достигнуто только при наличии в фотосфере тонких, нагретых до  $T = 6400$  К слоев. Этот вывод нашел свое подтверждение в работе [1]. На основе анализа фраунгоферова спектра получена серия полуэмпирических моделей, описывающих состояние фотосферного вещества на разных этапах развития вспышек. Показано, что в главной фазе вспышек происходит постепенное охлаждение верхних фотосферных нагретых слоев и продвижение их вглубь до самого основания фотосферы.

Таким образом, во вспышках происходит перестройка всей фотосферы вплоть до ее основания. Возмущение фотосферных слоев, возможно, носит волновой характер. Остается пока мало изученным вопрос о состоянии фотосферного вещества на начальной стадии вспышек и непосредственно перед ними.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей статье мы продолжаем исследование фотосферных слоев слабой вспышки 2 августа 1990 г., начатое в [3]. Наша цель — построение полуэмпирических моделей в виде распределений температуры  $T$ , концентрации атомов водорода  $n_H$ , электронной концентрации  $n_e$ , лучевой скорости  $v_r$ , напряженности продольного магнитного поля  $H_{||}$  в зависимости от оптической толщины  $\tau_5$  для нескольких моментов наблюдений в импульсной фазе вспышки.

Расчеты выполнялись по программе, которая позволяет в приближении ЛТР одновременно моделировать термодинамические и магнитные характеристики исследуемой структуры по наилучшему согласию вычисленных профилей спектральных линий с профилями наблюдаемого спектра. Выбор моделей не предусматривал наличие гидростатического равновесия, поскольку в случае вспышки оно может не выполняться. Расчет профилей линий производился для модели атома Fe, состоящей из 15 уровней и континуума, а для атома Ca — из восьми уровней и континуума. Коэффициент непрерывного поглощения учитывает поглощение атомами и отрицательными ионами водорода, атомами C I, Si I, Mg I, Al I, Fe I и рассеяние свободными электронами и атомами водорода.

Кроме того, программа позволяет производить расчет профилей магниточувствительных линий с учетом напряженности продольного или поперечного магнитного поля на основании уравнений Унно для параметров Стокса. Содержание химических элементов, силы осцилляторов, постоянные затухания находились путем подбора с использованием модели невозмущенной фотосферы VAL-C [19] и наблюдаемых профилей линий вне активной области. При выборе модели дополнительным ограничением является условие, что интенсивность непрерывного излучения в пределах  $\pm 1$  % соответствует экспериментальным значениям для данного  $\cos\theta$ . Подробно програм-

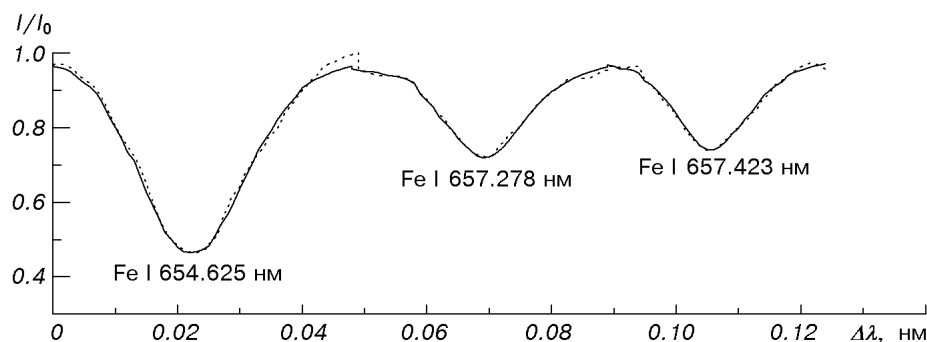


Рис. 1. Наблюдаемые (точки) и рассчитанные по модели (сплошная линия) профили френгоферовых линий

ма вычисления профилей линий изложена в работе [6]. Вычисления велись в пределах ошибок наблюдений: центральной интенсивности  $\Delta d_0 < 1\%$ , полуширины  $\Delta\lambda_{1/2} < 1$  пм. Согласие наблюдаемых и рассчитанных по модели профилей френгоферовых линий иллюстрирует рис. 1.

#### МОДЕЛИ ВСПЫШЕЧНЫХ ФОТОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Список используемых при моделировании линий и их характеристики приведены в предыдущей работе [3]. Наблюдаемые профили линий были исправлены за инструментальный профиль в IV порядке спектра спектрографа горизонтального солнечного телескопа АЦУ-26 [2]. Наибольшим изменениям во вспышке оказалась подвержена линия Fe I  $\lambda$  654.625 нм, которая в невозмущенной фотосфере формируется вблизи области температурного минимума. Эта линия значительно ослабла (центральная глубина на 20 %) и уширилась. Схожий характер изменений показали и остальные линии. Примечательно, что наибольшие изменения отмечены спустя одну минуту после  $H_\alpha$ -максимума. Эти особенности профилей спектральных линий описывают полученные в настоящей работе полуэмпирические модели.

Распределения  $T$ ,  $v_r$ ,  $n_H$  и  $n_e$  от  $\lg\tau_5$  в импульсной фазе представлены на рис. 2 для основания вспышечной петли. Для сравнения приведена модель VAL-F [19] для яркого флоккула, которую можно отождествить с невозмущенным флоккулом. Как оказалось, наблюдаемые изменения спектральных линий во вспышке невозможно описать моделями с монотонным распределением исследуемых параметров с оптической толщиной. Как видно, в распределении термодинамических параметров вещества и лучевой скорости есть неоднородности в верхней фотосфере ( $-3.5 > \lg\tau_5 > -2.5$ ), в средней фотосфере ( $-1.7 > \lg\tau_5 > -0.5$ ) и небольшое превышение температуры в глубоких слоях ( $\lg\tau_5 > -0.3$ ). В верхних и средних слоях в максимуме  $H_\alpha$ -вспышки температурный избыток относительно модели VAL-F составляет около 1000 К. Слои, расположенные глубже уровня  $\lg\tau_5 > 0.5$ , не оказывают влияния на профили выбранных линий, поэтому наши модели на них не распространяются. Отметим также тот факт, что температурный избыток со временем становится меньше.

Лучевые скорости в рассматриваемом диапазоне оптических толщин варьируются по знаку и величине (от 2 до  $-1.8$  км/с). Заметное уменьшение значений скорости со временем происходит только в глубоких слоях. Из полученных моделей следует, что в верхних слоях фотосферы ( $\lg\tau_5 \approx -3$ ) и

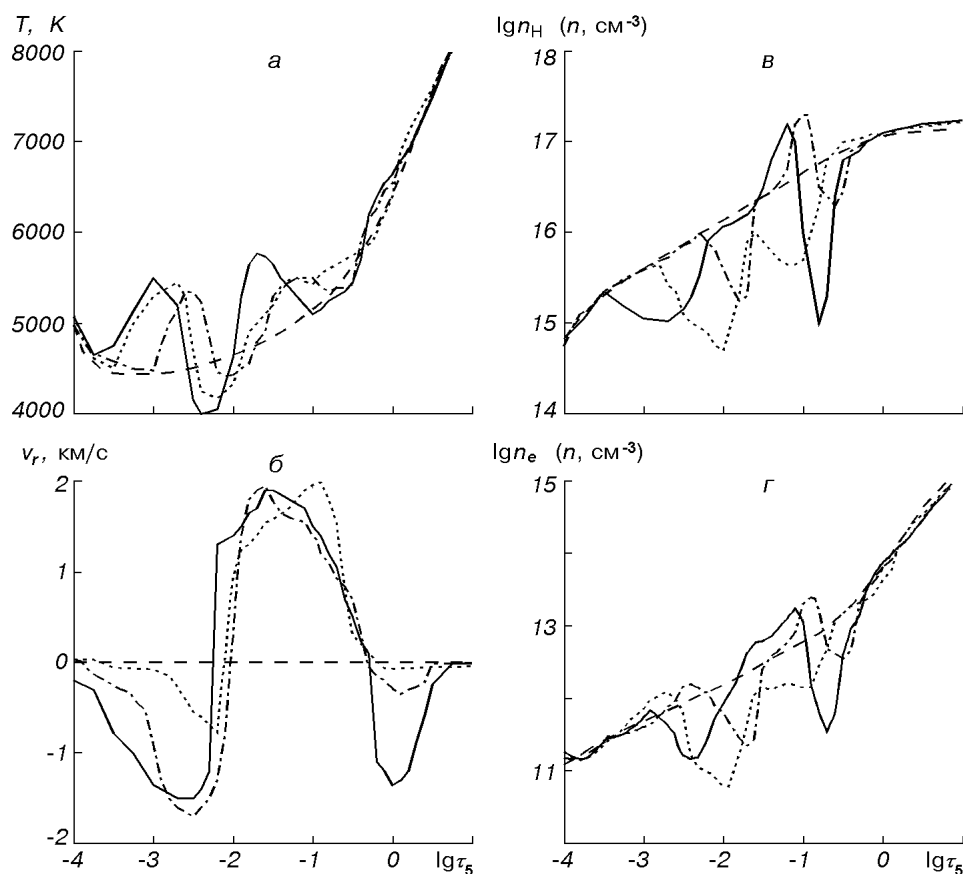


Рис. 2. Распределения температуры (а), лучевой скорости (б), концентрации атомов водорода (в) и электронной концентрации (г) с оптической толщиной в импульсной фазе для основания вспышечной петли. Сплошная линия — 05h50m13s, точки — 05h50m35s, штрих-пунктирная — 03h51m12s, штриховая линия — модель VAL-F

наиболее глубоких ( $\lg \tau_5 \approx 0$ ) в импульсной фазе вспышки преобладают восходящие потоки вещества. В фотосферных слоях, где преимущественно формируются ядра линий, имеют место нисходящие движения, что и обусловило сдвиги линий в красную сторону спектра, о которых сообщается в работе [3].

В распределении концентрации атомов водорода имеются области как с повышенным, так и с пониженным значением  $n_H$  относительно модели флоккула. Эти вариации могут достигать двух порядков величины. Распределение электронной концентрации  $n_e$  во вспышечной атмосфере имеет качественно схожий характер. Исходя из полученных моделей, мы оценили степень ионизации водорода  $x = n_p / (n_p + n_H)$  для значений  $\lg \tau_5$ , соответствующих температурным пикам. При этом предполагалось, что электронная концентрация  $n_e \approx n_p$ . Сравнение с данными, полученными по модели яркого флоккула для тех же  $\lg \tau_5$ , показало, что отношение степени ионизации водорода в неоднородностях к значениям  $x$  по модели VAL-F уменьшается как со временем, так и вглубь фотосферы. В самых глубоких слоях степень ионизации такая же, как и в модели флоккула.

Напряженности магнитного поля в средней и верхней атмосфере сравнительно невелики и не превышают 20 мТл, а в глубоких слоях ( $-0.5 < \lg \tau_5 < 1.0$ ) увеличиваются до 40 мТл. Однако из-за невысоких

значений факторов Ланде выбранные линии недостаточно чувствительны к изменениям магнитного поля. По этой причине напряженности магнитного поля определяются с меньшей точностью.

Другой особенностью полученных моделей является постепенное смещение неоднородностей со временем вглубь фотосферы. Чтобы определить скорости опускания неоднородностей, шкала оптических толщ была преобразована в шкалу геометрических высот на основе баланса локального и внешнего газового давления:

$$[H^2/(8\pi) + P_r]^{всп} = P_r^{внеш}.$$

При этом использовались данные о концентрации атомов водорода и напряженности магнитного поля из полученных моделей. В результате оказалось, что слои с повышенной температурой и концентрацией вещества в течение 1 мин продвигаются вглубь фотосферы вплоть до ее основания. Расчеты показывают, что во время импульсной фазы вспышки скорость опускания неоднородности в верхней фотосфере уменьшалась от 3.64 до 2.57 км/с, а в средней фотосфере составляла 2.37 км/с.

Полученные фотосферные модели с неоднородными слоями свидетельствуют о возмущениях, движущихся вглубь фотосферы и затухающих у ее основания. Эти модели позволяют сделать вывод о распространяющемся из области магнитного пересоединения в верхних ярусах атмосферы активной области пакета волн. Были сделаны оценки скорости распространения звуковых и ударных волн в соответствии с полученными полуэмпирически-

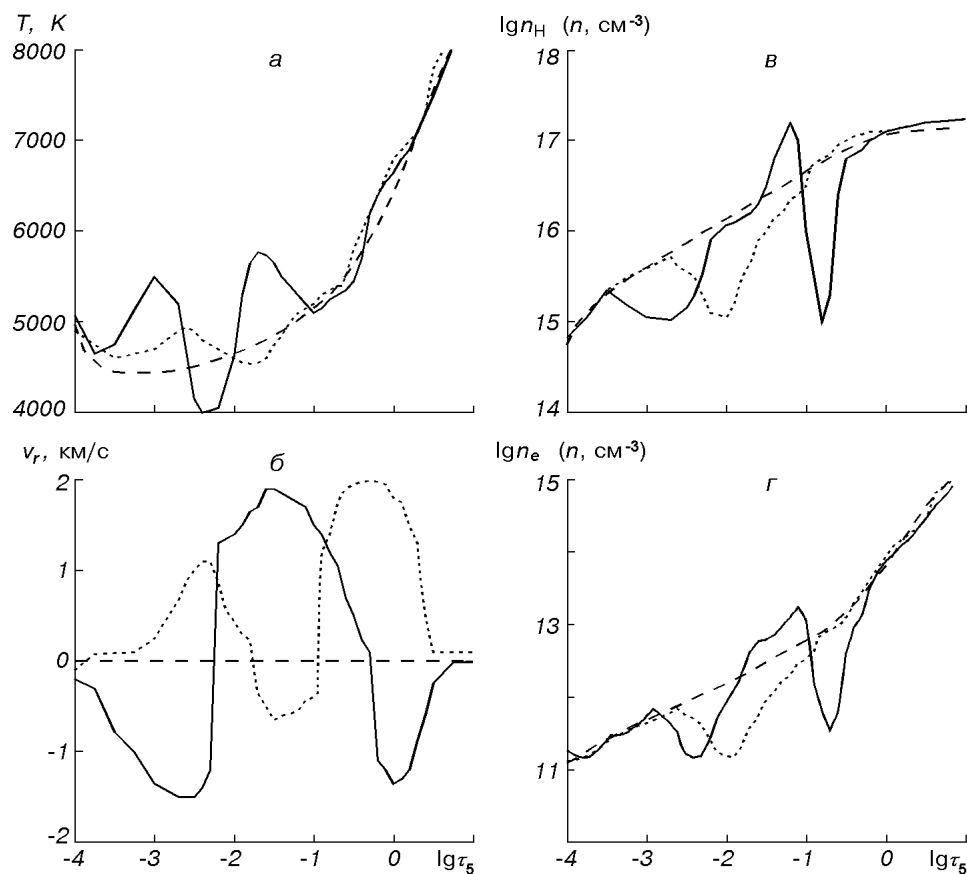


Рис. 3. Фотосферные модели в  $H_\alpha$ -максимуме вспышки для основания вспышечной петли (сплошная линия) и пространства под ее вершиной (точки); модель VAL-F — штриховая линия

ми моделями. Звуковые скорости в верхней и средней фотосфере составляли 6–7 км/с, а ударные варьировались в пределах от 3 до 15 км/с. Причем только значение скорости ударной волны  $v_y \approx 3$  км/с для температурного пика в верхней фотосфере в первый момент наблюдения совпадает со скоростью смещения этого пика. Возможно, что связанная с конденсацией ударная волна проникает в верхние слои вспышечной фотосферы, а затем трансформируется в другие виды волн. Таким образом, вопрос о природе волн во вспышечной атмосфере остается открытым.

На рис. 3 приведены фотосферные модели в  $H_\alpha$ -максимуме вспышки для основания вспышечной петли и пространства под ее вершиной. Модель для «вершины», в отличие от моделей для основания, показывает более монотонный ход температуры. Только в области около 500 км есть узкий слой, превышение температуры в котором составляет меньше 500 К (рис. 3, а). Имеются отличия распределений лучевых скоростей для двух деталей вспышечной петли. В основании и в «вершине» петли лучевые скорости противоположны по направлению (рис. 3, б). В распределениях  $n_H$  и  $n_e$  с оптической толщиной в «вершине» вспышечной петли, в отличие от ее основания, есть только одна область с пониженным значением концентрации (рис. 3, в, г). Напряженности магнитного поля различаются только в глубоких слоях. Для области под вершиной петли они мало изменяются вглубь фотосферы и не превышают 15 мТл.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические модели вспышек, в которых исследуется гидродинамический и радиативный отклик хромосферы на вторжение потоков нетепловых электронов из верхних слоев атмосферы, предсказывают возникновение движущейся вниз хромосферной конденсации [5, 11, 16 и др.], которая не проникает глубже области температурного минимума.

Полученные в настоящей работе фотосферные полуэмпирические модели свидетельствуют о следующем.

1. В импульсной фазе во всей толще фотосферы возникают неоднородности температуры и плотности. Эти неоднородности представляют собой относительно узкие прогретые слои. Распределения  $n_H$  и  $n_e$  с глубиной представляют собой чередование слоев повышенной и пониженной концентрации.

2. Превышение температуры относительно модели невозмущенного флоккула VAL-F достигает около 1000 К. Концентрация атомов водорода и электронов варьирует в пределах двух порядков.

3. Слои с неоднородностями в импульсной фазе смещаются вглубь фотосферы со скоростями 2.37–3.64 км/с. Наш вывод противоречит утверждению, содержащемуся в работе [13], о направленных вверх движениях вещества в хромосфере и фотосфере в «усах». Как следует из предыдущей нашей работы [3], наблюдаемые в хромосферной части вспышечной петли восходящие движения связаны с подъемом ее вершины. В основании же петли, где наблюдаются  $H_\alpha$  профили типа «усов», имеют место движения, направленные вниз.

4. Температура в неоднородностях со временем уменьшается.

Итак, в импульсной фазе вспышки возмущение распространяется сверху и проникает глубже области температурного минимума, вплоть до основания фотосферы. В [1] также показано, что в послемаксимальной фазе вспышки возмущение может распространяться до основания фотосферы, но скорости смещения гораздо меньше (~200 м/с). Характер фотосферных моделей вспышки 02.08.1990 г. можно объяснить распространением пакета

волн из области магнитного пересоединения в верхней атмосфере. Специального рассмотрения требует вопрос о природе возмущающего фотосферные слои фактора.

Выражаем искреннюю благодарность Э. А. Барановскому за возможность использовать программу расчета моделей.

1. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. и др. Полуэмпирические модели фотосферы солнечного комплекса активности // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—11, № 2.—С. 11—24.
2. Аликаева К. В., Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э. и др. Горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-26 на Кавказе // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 6.—С. 65—74.
3. Аликаева К. В., Черногор С. Н. Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой вспышки. I. Лучевые скорости // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 6.—С. 541—551.
4. Барановский Э. А., Курочка Е. В. Эмиссия в линиях нейтрального и ионизованного железа в солнечных вспышках // Солнеч. данные.—1989—№ 10.—С. 98—103.
5. Сомов Б. В., Спектор А. Р., Сыроватский С. И. Гидродинамика оптически прозрачной плазмы с распределенным источником нагрева // Вспышечные процессы в плазме: Тр. ФИАН АН СССР.—1979—№ 110.—С. 73—94.
6. Baranovsky E. A. Semiempirical LTE modelling of solar photospheric layers. I. Theoretical background // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.—1993.—23.—P. 1—8.
7. Canfield R. C., Gayley K. G. Impulsive  $H_{\alpha}$  diagnostics of electron-beam-heated solar flare model chromospheres // Astrophys. J.—1987.—322, N 2.—P. 999—1009.
8. Ding M. D. An unusually intense Ca II K line wing: possible role of particle acceleration in the lower atmosphere // Astron. and Astrophys.—1999.—351.—P. 368—372.
9. Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A. Analysis of the optical spectra of the solar flares. VI. Velocity field in the 13 June 1980 flare area // Astron. and Astrophys.—1992.—256, N 1.—P. 255—263.
10. Fisher G. H. Dynamics of flare-driven chromospheric condensation // Astrophys. J.—1989.—346, N 2.—P. 1019—1029.
11. Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N. Flare loop radiative hydrodynamics // Astrophys. J.—1985.—289, N 2.—P. 414—441.
12. Gan W. Q., Rieger E., Fang C. Semiempirical flare models with chromospheric condensation // Astrophys. J.—1993.—416, N 2.—P. 886—892.
13. Kitai R. On the mass motions and the atmospheric states of moustaches // Solar Phys.—1983.—87, N 1.—P. 135—154.
14. Litvinenko Yu. E. Photospheric magnetic reconnection and cancelling magnetic features on the Sun // Astrophys. J.—1999.—515.—P. 435—440.
15. 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.
16. Nagai F., Emslie A. G. Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares // Astrophys. J.—1984.—279, N 2.—P. 896—908.
17. Ruderman M. S., Goossens M., Ballester J. L., Oliver R. Resonant Alfvén waves in coronal arcades driven by footpoint motions // Astron. and Astrophys.—1997.—328.—P. 361—370.
18. Titov V. S., Demoulin P. Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares // Astron. and Astrophys.—1999.—351.—P. 707—720.
19. 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.
20. Zhang H. Q., Sakurai T., Shibata K., et al. Soft X-ray and magnetic configuration in a solar active region in February 1992 // Astron. and Astrophys.—2000.—357.—P. 725—734.

Поступила в редакцию 05.02.01