

УДК 523.985.355.3

Н. Н. Кондрашова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27
kondr@mao.kiev.ua

Нижняя атмосфера в главной фазе солнечной двухленточной вспышки

Исследовано физическое состояние фотосферы в главной фазе солнечной двухленточной вспышки 3 июня 1979 г. Построенные полуэмпирические фотосферные модели показали, что фотосфера оставалась в возбужденном состоянии длительное время на протяжении фазы затухания вспышки. В полученных моделях температура в верхних слоях больше, а в нижних меньше, чем в стандартной модели невозмущенной фотосферы. Со временем прогрев распространился на нижние фотосферные слои, а верхние слои охладилась. В результате сравнения полученных моделей с моделями двухленточной вспышки 7 октября 1979 г. выявлено, что ход температуры с высотой на главной стадии развития вспышек сильно различался.

НИЖНЯ АТМОСФЕРА В ГОЛОВНІЙ ФАЗІ СОНЯЧНОГО ДВОСТРІЧКОВОГО СПАЛАХУ, Кондрашова Н. М. — Досліджено фізичний стан фотосфери в головній фазі сонячного двострічкового спалаху 3 червня 1979 р. Побудовані напівемпіричні фотосферні моделі показали, що фотосфера тривалий час впродовж головної фази спалаху перебувала у збуреному стані. В отриманих моделях температура у верхніх шарах більша, а в нижніх менша, ніж у стандартній моделі незбуреної фотосфери. З часом прогрів розповсюдився на нижні фотосферні шари, а верхні шари охолодилися. В результаті порівняння отриманих моделей з моделями двострічкового спалаху 7 жовтня 1979 р. виявлено, що розподіли температури з висотою фотосфери на головній стадії спалахів значно відрізнялися.

LOWER ATMOSPHERE AT THE MAIN PHASE OF A SOLAR TWO-RIBBON FLARE, by Kondrashova N. N. — The physical state of the photosphere at the main phase of a two-ribbon solar flare on 3 June 1979 is

studied. Semiempirical photospheric models are derived from the inversion. The inferred models revealed that the photosphere remained in a disturbed state for a long time during the main phase of the flare. For the inferred atmospheres, the temperature is higher in the upper photospheric layers and lower in the lower photosphere relative to the quiet-Sun model atmosphere. During the flare the heating penetrated to deeper photospheric layers and the upper ones were cooling. Our comparison of the inferred models with the models for a two-ribbon solar flare on 7 October 1979 shows different height distributions of the temperature at the main phase of flares.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям солнечные вспышки возникают в результате магнитных пересоединений, освобождающих накопленную в магнитном поле энергию в виде потоков тепла, частиц, гидродинамических течений. Выделяют два основных вида вспышек: компактные, вся энергия которых реализуется в начальной фазе, и продолжительные, двухленточные, так называемые динамические вспышки, освобождение энергии в которых продолжается и в главной фазе [29]. Последние описываются классической моделью Коппа и Пноймана [19]. Согласно этой модели быстрые в начале вспышки магнитные пересоединения замедляются на поздних стадиях ее развития. В работе [11] показано, что дополнительное высвобождение энергии магнитного поля в главной фазе вспышки происходит в медленной магнитозвуковой ударной волне.

Спектральные исследования движений вещества также свидетельствуют о том, что магнитные пересоединения и хромосферное испарение продолжаются и в главной фазе двухленточных вспышек [10, 12, 14, 15, 26]. Результаты численного моделирования процесса охлаждения солнечной атмосферы после максимума вспышки указывают на то, что на ранней стадии главной фазы продолжается испарение хромосферы, затем по мере ее охлаждения оно постепенно уменьшается [например, 13, 17, 24, 28].

Полуэмпирические фотосферные модели солнечных вспышек, основанные на спектральных наблюдениях, показывают, что в максимуме вспышек и в их главной фазе возмущение распространяется из области магнитного пересоединения и освобождения энергии вниз и может проникать вглубь фотосферы вплоть до ее основания [2, 3, 16, 20].

Физические процессы в фотосфере на стадии после максимума вспышек еще недостаточно исследованы. Необходимо накопление данных. В настоящей работе изучено физическое состояние фотосферы в главной фазе продолжительной динамической вспышки 3 июня 1979 г.

НАБЛЮДЕНИЯ И ДАННЫЕ О ВСПЫШКЕ

Спектры двухленточной вспышки балла 2N/M2 3 июня 1979 г. были получены на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (Киев). Согласно данным Solar Geophysical Data [27] H-вспышка началась в 08^h42^m UT, максимумы — в 09^h05^m UT и 09^h37^m , конец вспышки — в 11^h13^m UT. Вспышка происходила в месте с координатами N18, E39. Спектрограммы получены после второго максимума H-вспышки на протяжении ее главной фазы в 09^h46^m UT, $10^h11.8^m$ UT и $10^h30.1^m$ UT. Щель спектрографа пересекала яркий узел одной из вспышечных лент. На рис. 1 дано H-изображение вспышки для момента 09^h46^m UT. Стрелками указаны положения щели спектрографа в разные моменты наблюдений. В 09^h46^m UT и $10^h30.1^m$ UT щель проходила через одно и то же место вспышечного узла, а в $10^h11.8^m$ UT ее положение было немного сдвинуто к средней части ленты.

На рис. 2 приведены данные GOES о мягком рентгеновском излучении (SXR) в диапазонах $\lambda = 0.05...0.4$ нм и $\lambda = 0.1...0.8$ нм, полученные с шагом 3.06 с (<http://goes.ngdc.noaa.gov>). Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты наблюдений. Видно, что спектры получены после максимума интенсивности рентгеновского излучения.

Для моделирования отобраны фотосферные линии железа и титана в интервале длин волн $\lambda = 587...593$ нм, их основные характеристики даны в таблице.

Длины волн, отождествление линий и потенциалы возбуждения нижнего уровня взяты из работы [23], их центральные глубины для

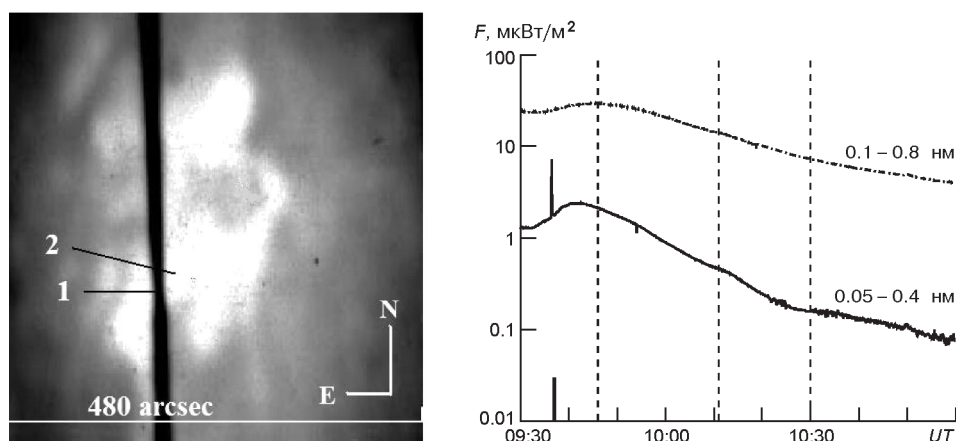


Рис. 1. Изображение вспышки 3 июня 1979 г., полученное с помощью H-фильтра в 09^h46^m UT: 1 — положение щели спектрографа в 09^h46^m и $10^h30.1^m$ UT, 2 — в $10^h11.8^m$ UT

Рис. 2. Вариации интенсивности F рентгеновского излучения 3 июня 1979 г. в диапазонах длин волн $\lambda = 0.05...0.4$ нм и $\lambda = 0.1...0.8$ нм. Моменты наблюдений отмечены вертикальными штриховыми линиями. Сплошная короткая вертикальная линия указывает время максимума H-вспышки

Параметры фраунгоферовых линий, использованных для моделирования

| , нм | Элемент | EPL , эВ | $g_{\text{эф}}$ | d_0 | h_d , км | h_w , км |
|----------|---------|------------|-----------------|-------|------------|------------|
| 588.0026 | Fe I | 4.56 | 0.58 | 0.108 | 169 | 141 |
| 588.0270 | Ti I | 1.05 | 1.46 | 0.063 | 207 | 193 |
| 592.9682 | Fe I | 4.55 | 1.10 | 0.405 | 233 | 176 |
| 592.7797 | Fe I | 4.65 | 0.43 | 0.436 | 244 | 179 |
| 591.6257 | Fe I | 2.45 | 1.03 | 0.498 | 307 | 238 |
| 593.0191 | Fe I | 4.65 | 1.00 | 0.661 | 400 | 241 |

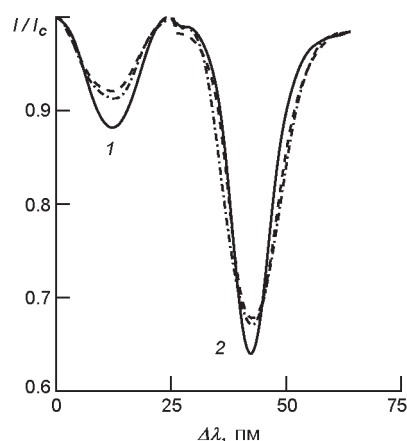


Рис. 3. Изменение типичных профилей линий железа в течение главной фазы вспышки: 1 — линия Fe I 588.003 нм, 2 — Fe I 592.968 нм

невозмущенной фотосферы — из работы [5]. В таблице приведены также факторы Ланде [9] и высоты формирования линий для центральных глубин и эквивалентных ширин в невозмущенной фотосфере, вычисленные по программе SPANSAT [4]. Изменение профилей типичных линий на протяжении главной фазы вспышки показаны на рис. 3. Подробный анализ изменений профилей линий в течение рассматриваемой вспышки сделан в работе [7].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование фотосферы рассматриваемой вспышки осуществлялось путем согласования наблюдаемых и вычисленных профилей линий. С этой целью использовалась программа SIR [25] для параметра I профилей линий. В качестве исходной модели принята гарвардско-смитсоновская модель невозмущенной фотосферы HSRA [18]. При расчетах учитывалось, что в непрерывном спектре не наблюдалась эмиссия. В результате моделирования были получены распределения температуры, лучевой и микротурбулентной скоростей и других параметров по высоте фотосферы. Макротурбулентная скорость предполагалась постоянной с глубиной, ее значение подбиралось в процессе расчетов. Поскольку вспышка возникла не в центре солнечного диска, полученные модели были трансформированы в систему локальных геоцентрических координат.

На рис. 4, 5 приведены полученные зависимости температуры и лучевой скорости от высоты. Максимальные ошибки определения этих параметров указаны вертикальными линиями. Область высот ограничена чувствительностью линий к изменениям параметров моделей. На рис. 4, а, кроме моделей для 09^h46^m UT, $10^h11.8^m$ UT и $10^h30.1^m$ UT (кривые 1—3), даны также распределения температуры в моделях невозмущенной фотосферы HSRA и спокойного флоккула VAL-F [30]. Сравнение обнаруживает значительные отличия зависимостей температуры, полученных для фотосферы на главной стадии рассматриваемой вспышки, от таких же зависимостей в моделях невозмущенной фотосферы и флоккула. Эти отличия свидетельствуют о том, что фотосфера оставалась возмущенной даже спустя 50 мин после максимума вспышки. В средней и верхней фотосфере на стадии затухания вспышки температура увеличена, а в нижних слоях — уменьшена. В первый момент наблюдений 09^h46^m избыток температуры в верхних слоях относительно модели HSRA достигал 500 К. В последующие моменты наблюдений верхние слои охладились на 100—200 К, в то время как прогрев распространился в более глубокие слои фотосферы. Следует отметить, что распределения температуры и лучевой скорости, полученные для моментов $10^h11.8^m$ UT и $10^h30.1^m$ UT, мало различаются между собой.

Все полученные модели показывают, что в средних и верхних слоях фотосферы движения вещества восходящие, а в глубоких — нисходящие (рис. 5). Макротурбулентная скорость на протяжении главной стадии вспышки была примерно равна или немного меньше, чем в невозмущенной фотосфере (в 09^h46^m UT и $10^h30.1^m$ UT ее значение было равно 1.4 км/с, а в $10^h11.8^m$ UT — 1.7 км/с).

На рис. 4, б показано сравнение распределений температуры в полученных в данной работе моделях и в полуэмпирических моделях Мачадо и Линского (ML) [22] и моделях F1 и F2 (для слабой и мощной вспышки соответственно) Мачадо и др. [21]. В слоях выше 300 км полученные в данной работе модели и модель F1 показывают медленное изменение температуры с высотой, в то время как в модели F2 отмечается ее резкое увеличение. В 09^h46^m UT на высотах 150—320 км температура выше, чем в моделях ML, F1 и F2, а в $10^h11.8^m$ UT она почти не отличается от температуры в модели F1. В $10^h30.1^m$ UT температура в верхних слоях больше, чем в модели F1, а в средних слоях такая же, как в модели ML.

Следует отметить, что ML, F1 и F2 являются обобщенными моделями вспышек, они не учитывают временных вариаций параметров. В реальности, как показывают расчеты, физические условия в фотосфере довольно сильно изменяются на протяжении вспышки и различаются для разных вспышек.

Полуэмпирические фотосферные модели были получены также в работе [3] для главной стадии двухленточной вспышки 1В/С4 7 октября 1979 г. Рис. 4, в демонстрирует сравнение высотных распреде-

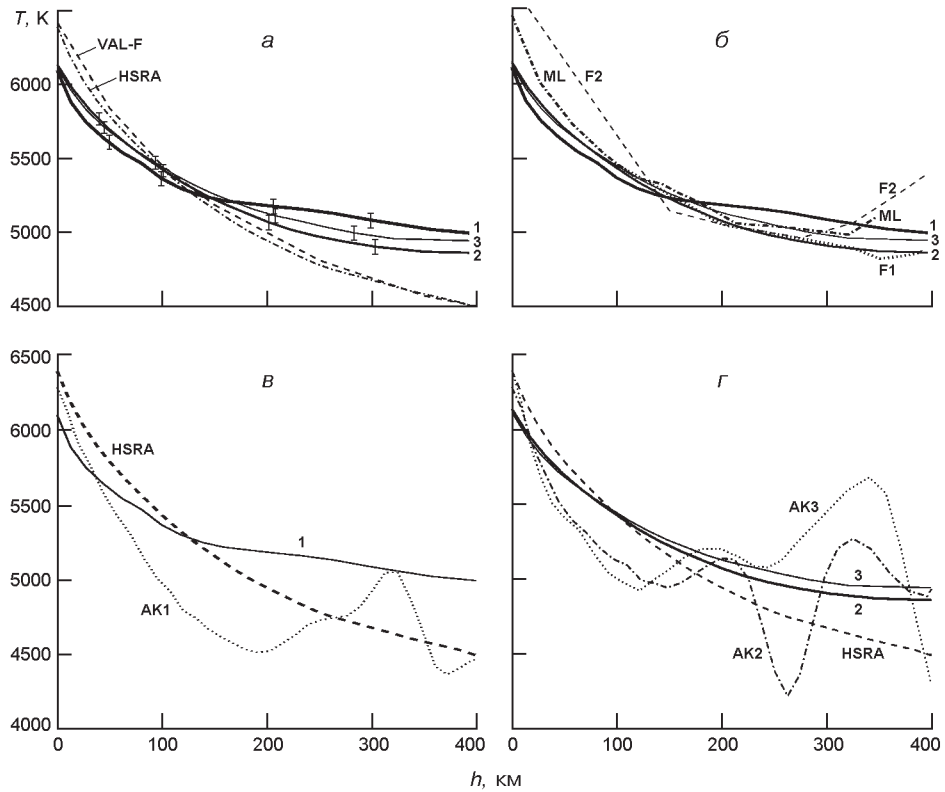


Рис. 4. Модели фотосферы вспышки 3 июня 1979 г. в 09^h46^m UT, $10^h11.8^m$ UT и $10^h30.1^m$ UT (кривые 1—3 соответственно). Для сравнения приведены модели невозмущенной фотосферы HSRA и спокойного флоккула VAL-F (а), модели ML, F1 и F2 из работ [21, 22] (б), модель AK1 для вспышки 7 октября 1979 г. из работы [3] (в), модели HSRA и AK2, AK3 [3] (г)

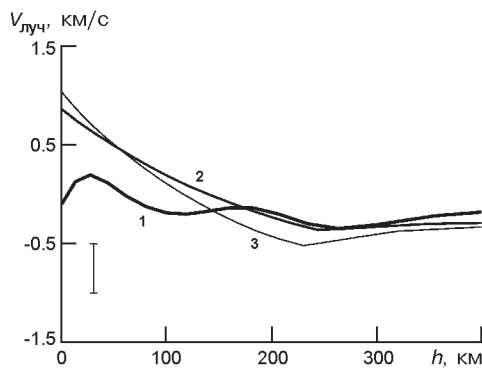


Рис. 5. Полученные в работе модельные распределения лучевых скоростей для вспышки 3 июня 1979 г. в 09^h46^m UT, $10^h11.8^m$ UT и $10^h30.1^m$ UT (кривые 1—3 соответственно)

лений температуры в 09^h46^m UT (через 9 мин после максимума интенсивности в линии H и примерно 4—5 мин спустя после максимума рентгеновского излучения вспышки 3 июня 1979 г.) и в модели AK1 из работы [3] (через 4 мин после максимума интенсивности в линии H и 2 мин после максимума рентгеновского излучения вспышки 7 октября). Видно, что распределения температуры во вспышках сильно различаются. Несмотря на то, что после максимума рассматриваемой

вспышки прошло больше времени, фотосфера почти на всем интервале высот была значительно горячее, чем во вспышке 7 октября 1979 г. Сильно различается и ход температуры по высоте. Для рассматриваемой вспышки получена гладкая кривая изменения температуры, тогда как в распределении температуры вспышки 7 октября 1979 г. видны неоднородности.

На рис. 4, *з* дано сравнение температурных распределений для $10^h11.8^m$ UT (через 35 мин после максимума H -вспышки 3 июня 1979 г.), для $10^h30.1^m$ UT (через 53 мин после максимума вспышки 3 июня 1979 г.) и в моделях вспышки 7 октября 1979 г. из работы [3] АК2 (через 30 мин после максимума) и АК3 (через 35 мин после максимума). Видно, что в нижних слоях фотосферы рассматриваемой вспышки температура выше, чем во вспышке 7 октября 1979 г. Через 35 мин после максимумов вспышек верхние слои фотосферы вспышки 7 октября 1979 г. значительно горячее, чем те же слои вспышки 3 июня 1979 г. Как и спустя несколько минут после максимумов, характер хода температуры с высотой в моделях двух вспышек различен. В фотосфере вспышки 7 октября 1979 г. сохранялись температурные неоднородности, а во вспышке 3 июня распределения температуры по высоте оставались сглаженными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из сравнения фотосферных моделей двухленточных вспышек 3 июня и 7 октября 1979 г., в их главной фазе температурные распределения по высоте фотосферы сильно различались. Следует отметить, что все модели рассчитывались по одинаковой методике. Вариации профилей линий, использованных для моделирования вспышки 7 октября 1979 г., очень сильно различаются в зависимости от высоты формирования линий, что не характерно для вспышки 3 июня 1979 г. Таким образом, полученные различия хода температуры с высотой в этих вспышках являются следствием разного поведения линий в их спектрах.

Причиной этих различий могут быть динамические особенности отклика хромосферы на возмущение, распространяющееся из области магнитного пересоединения в верхних ярусах солнечной атмосферы. Через несколько минут после максимума вспышки 3 июня 1979 г. в хромосфере наблюдался восходящий поток вещества со скоростью 25 км/с, который можно интерпретировать как признак «мягкого» хромосферного испарения [8]. Вблизи H -максимума вспышки 7 октября 1979 г. зарегистрирована смена знака асимметрии и доплеровского сдвига линии H . Подъем хромосферного вещества со скоростью до 0.5 км/с на начальной стадии вспышки сменился его опусканием со скоростью 22 км/с [1, 6]. Как предполагается в работе [3], это могло быть связано с прохождением конденсации, сопровождав-

шейся волнами. Неоднородности температуры на разных высотах фотосферы получены и в работе [20] для вспышки M4.1/1B 5 ноября 2004 г.

Таким образом, фотосфера в разных событиях может по-разному реагировать на вспышечное возмущение и служить индикатором механизма переноса энергии из места ее освобождения. Необходимы дальнейшие исследования с хорошим временным разрешением.

ВЫВОДЫ

Полученные в данной работе полуэмпирические модели двухленточной вспышки балла 2N/M2 3 июня 1979 г. показывают, что фотосфера на протяжении ее главной стадии находилась в возбужденном состоянии. Верхние и средние ее слои были прогреты, а нижние охлаждены относительно моделей невозмущенной фотосферы и спокойного флоккула.

Даже спустя 53 мин после максимума вспышки фотосфера не достигла спокойного состояния. Ее нижележащие слои были охвачены прогревом, т. е. возмущение распространялось вглубь из более высоких ярусов атмосферы. При этом верхние слои были холоднее, чем через 9 мин после максимума вспышки.

Распределения температуры с высотой фотосферы в главной фазе двухленточных вспышек 3 июня и 7 октября 1979 г. сильно различались. В отличие от вспышки 7 октября, в моделях которой видны неоднородности температуры на разных высотах, температурные распределения, полученные для вспышки 3 июня 1979 г. — сглаженные. Причиной различий могут быть разные динамические особенности хромосферы вспышек, вызванные разными механизмами переноса энергии из верхней атмосферы.

Автор благодарит В. Ruiz Cobo и J. C. del Toro Iniesta за любезное предоставление программы SIR, Е. В. Хоменко за программу трансформации моделей.

1. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. Временные изменения состояния хромосферного и фотосферного вещества во вспышечной петельной структуре // Тр. VII симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ, Троицк, 1999 г. — Троицк: ИЗМИРАН, 1999.—С. 28—34.
2. 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.
3. 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.
4. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР-приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № 87Р).

5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
6. Кондрашова Н. Н. Изменение асимметрии линий в процессе солнечной вспышки 7 октября 1979 г. // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—**4**, № 4.—С. 23—28.
7. Кондрашова Н. Н., Рудникова Е. Г. Спектральное исследование двухленточной солнечной вспышки. I. Профили и асимметрия линий // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 2.—С. 97—106.
8. Кондрашова Н. Н., Рудникова Е. Г., Пасечник М. Н. Движения хромосферного и фотосферного вещества в двухленточной солнечной вспышке // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 6.—С. 485—495.
9. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
10. Berlicki A., Heinzel P., Schmieder B., et al. Non-LTE diagnostics of velocity fields during the gradual phase of a solar flare // Astron. and Astrophys.—2005.—**430**.—P. 679—689.
11. Cargill P. J., Priest E. R. The heating of postflare loops // Astrophys. J.—1983.—**266**, N 1.—P. 383—389.
12. Czaykowska A., Alexander D., De Pontieu B. Chromospheric heating in the late phase of two-ribbon flares // Astrophys. J.—2001.—**552**, N 2.—P. 849—857.
13. Doschek G. A., Boris J. P., Cheng C.-C., et al. A numerical simulation of cooling coronal flare plasma // Astrophys. J.—1982.—**258**, N 1.—P. 373—383.
14. Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A. Analysis of the optical spectra of the solar flare. VI. Velocity field in the 13 June 1980 flare area // Astron. and Astrophys.—1992.—**256**, N 1.—P. 255—263.
15. Falchi A., Qiu J., Cauzzi G. Chromospheric evidence for magnetic reconnection // Astron. and Astrophys.—1997.—**328**, N 1.—P. 371—380.
16. 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.
17. 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.
18. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y. The Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere // Solar Phys.—1971.—**18**, N 3.—P. 347—365.
19. Kopp R. A., Pneuman G. W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // Solar Phys.—1976.—**50**, N 1.—P. 85—98.
20. Kurochka E. V., Lozitsky V. G., Osyka O. B. Temporal changes of physical conditions in the photospheric layers of a solar flare // Kinematic Phys. Celest. Bodies.—2008.—**24**, N 4.—P. 215—222.
21. 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.
22. Machado M. E., Linsky J. L. Flare model chromospheres and photospheres // Solar Phys.—1975.—**42**, N 2.—P. 395—420.
23. Moore C. E., Minnaert M.G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
24. Nagai F. A model of hot loops associated with solar flares. I. Gasdynamics in the loops // Solar Phys.—1980.—**68**, N 2.—P. 351—379.
25. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles // Astrophys. J.—1992.—**398**, N 1.—P. 375—385.
26. Schmieder B., Forbes T. G., Malherbe J. M., Machado M. E. Evidence for gentle chromospheric evaporation during the gradual phase of large solar flare // Astrophys. J.—1987.—**317**, N 2.—P. 956—963.

27. *Solar Geophys. Data.*—1980.—**431**, p. II.—P. 37.
28. *Svestka Z.* Cooling of a coronal flare loop through radiation and conduction // *Solar Phys.*—1987.—**108**, N 2.—P. 411—414.
29. *Svestka Z.* Solar flares — The gradual phase // *Solar Phys.*—1989.—**121**, N 1/2.—P. 399—417.
30. *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.

Поступила в редакцию 19.10.09