

УДК 523.985.355.3

К. В. Аликаева, Н. Н. Кондрашова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27**Возмущение фотосферы в процессе развития
солнечной двухленточной вспышки**

Исследована двухленточная солнечная вспышка 7 октября 1979 г. Согласно данным GOES импульсной фазе вспышки предшествовала фаза предварительного нагрева. На основе наблюдений фраунгоферова спектра рассчитаны полуэмпирические фотосферные модели для разных стадий развития вспышки. Результаты моделирования показали наличие в фотосфере изменяющихся со временем неоднородностей температуры, газового давления и других параметров. На стадии предварительного нагрева преобладало возмущение вещества, лежащего ниже основания невозмущенной фотосферы. Оно проявилось в виде узких охлажденных слоев, смещающихся вверх в интервале времени 0.5 мин. В импульсной фазе и в максимуме вспышки возмущению подверглись преимущественно верхние и средние фотосферные слои. Для этого периода характерно смещение вниз нижней границы широкой области пониженной температуры в верхней фотосфере. Возмущения фотосферного вещества сохранялись и спустя 25—30 мин после максимума вспышки. Полученные модели свидетельствуют о подавлении турбулентных движений в среде на протяжении всей вспышки.

ЗБУРЕННЯ ФОТОСФЕРИ В ПРОЦЕСІ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОГО ДВОСТРІЧКОВОГО СПАЛАХУ, Алікаєва К. В., Кондрашова Н. М. — Досліджено двострічковий сонячний спалах 7 жовтня 1979 р. Згідно з даними GOES імпульсній фазі спалаху передувала фаза попереднього нагрівання. На основі спостережень фраунгоферового спектру розраховані напівемпіричні фотосферні моделі для різних стадій розвитку спалаху. Результати моделювання показали наявність у фотосфері неоднорідностей температури, газового тиску та інших параметрів, що змінювалися з часом. На стадії попереднього нагрівання переважало збурення речовини, що лежить нижче рівня основи незбуреної фотосфери. Воно проявилось у вигляді вузьких охолоджених шарів, що зміщувалися вгору в інтервалі часу 0.5 хвилин. В імпульсній фазі та у максимумі спалаху збурення переважало у верхніх та середніх фотосферних шарах. Для цього періоду характерним є зміщення вниз нижньої межі широкої області зниженої температури у верхній фотосфері. Збурення фотосферної речо-

вини зберігалися і через 25—30 хвилин після максимуму спалаху. Отримані моделі свідчать про пригнічення турбулентних рухів у середовищі впродовж усього спалаху.

DISTURBANCE OF THE PHOTOSPHERE DURING SOLAR TWO-RIBBON FLARE, by Alikaeva K. V., Kondrashova N. N. — We study the two-ribbon solar flare on 7 October 1979. As may be seen from the GOES soft X-ray data, the preheating phase preceded the flare impulsive phase. The semiempirical photospheric models for different stages of flare development are calculated on the basis of observed Fraunhofer spectra. The modelling results reveal inhomogeneities of temperature, gas pressure, and other parameters. Disturbances of the matter below undisturbed photosphere base prevailed during the preheating phase. Narrow and cool layers were displaced upwards in the 0.5 min time interval. During the impulsive phase and at the flare maximum the upper and middle photospheric layers were mainly disturbed. This period is characterized by the downward displacement of the lower boundary of wide low-temperature region in the upper photosphere. The photosphere perturbations were still preserved during 25—30 minutes after the flare maximum. The turbulent motions were inhibited throughout the flare.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие космических исследований привело к тому, что наблюдениям низкотемпературных слоев вспышек уделялось меньше внимания. Однако изучение именно этих слоев позволяет выявить процессы, происходящие в активной области на всех стадиях развития вспышек, включая предвспышечную стадию. В работе [18] приводятся веские аргументы в пользу интенсификации исследований фотосферной и хромосферной составляющих вспышек. Наблюдения и теоретические работы последних лет указывают на то, что солнечную вспышку следует рассматривать как глобальный процесс, в котором задействованы все слои Солнца от подфотосферных до короны. Важная роль отводится процессам в нижних слоях атмосферы на ранней стадии возникновения вспышки или до ее начала [8, 9, 12, 19, 20, 25, 34, 38]. Эти процессы могут быть обусловлены выходом новых скрученных магнитных жгутов, распространением вверх волн из подфотосферных слоев и др. Именно на этой стадии формируются предпосылки для взрывного освобождения энергии в импульсной фазе.

Что касается вспышечной фотосферной составляющей, то ее роль изменяется в зависимости от стадии развития вспышки. В начальной фазе и в преддверии вспышек фотосфера играет роль транзитной среды, через которую происходит вынос магнитных жгутов, берущих свое начало в конвективной зоне [21, 22, 34, 37]. Исследования, основанные на комплексных наблюдениях, свидетельствуют о том, что крупномасштабному магнитному пересоединению в короне предшествует серия медленных мелко-масштабных пересоединений магнитных силовых линий в нижних слоях атмосферы [10, 13, 17, 20, 23, 25, 26, 29, 38]. Условия выхода магнитного потока определяют характер последующих пересоединений и всего развития вспышки [25]. В работе [8] обнаружена последовательность появления низкочастотных плазменных волн в хромосфере по мере нарастания степени взаимодействия поднимающегося магнитного потока и локального магнитного поля: сначала возникают медленные магнито-звуковые или кинетические альвеновские волны, а затем ионно-звуковые волны. Согласно [1] с началом вспышки поперечное фотосферное магнитное поле претерпевает существенные изменения, которые проявляются в усилении диссипации магнитной энергии.

Описанные выше процессы приводят к изменениям состояния фотосферной плазмы. Так, результаты анализа фраунгоферова спектра свидетельствуют, что непосредственно перед вспышками (менее 10 мин) [4, 5] происходят резкие изменения параметров профилей фраунгоферовых линий, особенно тех, которые образуются у основания фотосферы. Они могут быть следствием развития неустойчивости температуры, давления, турбулентности в нижних слоях вспышечной фотосферы в результате выхода магнитных потоков. Как показано в работе [11], по мере приближения начала вспышек увеличивается скорость восходящих движений хромосферного и фотосферного вещества.

В *максимуме вспышек и их главной фазе* возмущение распространяется из области магнитного пересоединения и освобождения энергии в верхних ярусах солнечной атмосферы. Результаты численного моделирования хромосферного отклика показали, что вторжение потоков тепла и ускоренных электронов приводит к нагреву хромосферы и образованию движущейся вниз конденсации и ударной волны [27, 32, 33]. Согласно [27] возмущение охватывает и верхнюю фотосферу. Более того, из полуэмпирических моделей, основанных на анализе вспышечного фраунгоферова спектра, следует, что оно может проникать и в глубь фотосферы вплоть до ее основания [2, 15]. Особенность этих моделей — чередование прогретых и охлажденных слоев вдоль луча зрения. Механизм возбуждения фотосферы на этой стадии еще не вполне ясен.

Настоящая работа продолжает серию работ по моделированию вспышечной фотосферы. В ней внимание обращено и на мало изученную начальную и импульсную фазы вспышки с целью выяснения динамики фотосферных процессов во вспышке на стадии ее возникновения.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛА

Основой для исследования послужили спектры двухленточной вспышки балла 1В/С4 7 октября 1979 г., полученные на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории НАН Украины (Киев). Согласно Solar Geophysical Data [31] момент начала H_{α} -вспышки — $07^{\text{h}}55^{\text{m}}$ UT, максимума — $08^{\text{h}}10^{\text{m}}$ UT, конца — $08^{\text{h}}15^{\text{m}}$ UT (вспышка продолжалась). На полученных нами H_{α} -фильтрограммах видно, что вспышка возникла в арочной системе. Щель спектрографа пересекала одну из вспышечных лент в наиболее ярком месте.

На рис. 1 приведены данные GOES о мягком рентгеновском излучении (SXR) в диапазонах $0.05\text{--}0.4$ нм и $0.1\text{--}0.8$ нм, полученные с шагом 3.06 с (<http://goes.ngdc.noaa.gov>). Временной ход интенсивности мягкого рентгеновского излучения показывает наличие трех всплесков: небольшое повышение в предимпульсной и основной всплеск в импульсной фазах, а также

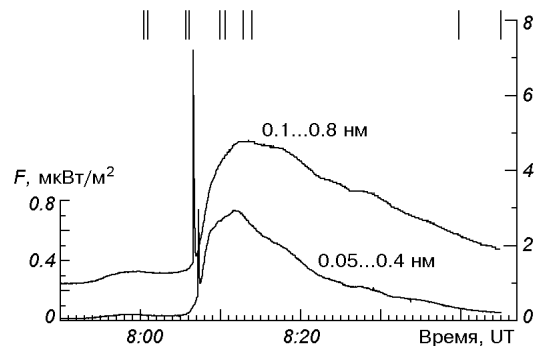


Рис. 1. Изменение интенсивности рентгеновского излучения в диапазонах длин волн $0.05\text{--}0.4$ нм (шкала слева) и $0.1\text{--}0.8$ нм (шкала справа); вертикальные линии — моменты наблюдений

кратковременный (продолжительностью около 20 с) еще более мощный всплеск в обоих диапазонах на фоне роста SXR в импульсной фазе.

Характер изменений потока рентгеновского излучения в процессе вспышки 7 октября 1979 г. соответствует описанному в работе [25] сценарию для третьего типа магнитного пересоединения: на ранней стадии всплеск медленный подъем достаточно сильного магнитного потока, его взаимодействие с локальным магнитным полем и образование токового слоя на низких высотах атмосферы. На этой стадии постепенное освобождение энергии приводит к медленному нагреву плазмы, который в нашем случае вызвал усиление мягкого рентгеновского излучения. По статистике [36] стадия предварительного нагрева наблюдается в более чем 90 % вспышек. Согласно этой же работе тепловая стадия связана с выходом магнитного потока и перестройкой магнитных полей и определяет последующую импульсную фазу.

В дальнейшем в рассматриваемой нами вспышке процесс развивался в импульсном режиме. Возникает вопрос о достоверности мощного кратковременного всплеска в начале импульсной фазы. Если это не артефакт, то на подобные факты в будущем следует обратить внимание.

В таблице приведены моменты начала, максимума и окончания каждого всплеска вспышки. Общая черта всех всплесков — начало повышения интенсивности более «мягкого» излучения (0.1—0.8 нм) опережает примерно на 30 с начало более «жесткого» излучения (0.05—0.4 нм). Это качественно согласуется с результатами наблюдений всплесков в разных рентгеновских диапазонах [14, 24, 25, 36]. В частности, согласно статистике [36] всплеск мягкого рентгеновского излучения начинается раньше жесткого. Отметим также, что в рассматриваемой нами вспышке максимум импульсной фазы в линии H_{α} (по данным SGD) наступил примерно на 2 мин раньше, чем в SXR.

Для фотометрической обработки и последующего анализа отобраны фотосферные линии в интервалах длин волн: $\lambda\lambda = 653...658, 612...618, 538...544, 523...529, 490...492$ нм. Линии удовлетворяют двум требованиям: а) малая чувствительность к магнитному полю (фактор Ланде не превышает 1) и б) они образуются на разных высотах в фотосфере в диапазоне от 12 до 500 км. Методика обработки позволила получить профили линий с точностью 1 % для центра линий, 1 пм для полуширины и 2—3 % для эквивалентной ширины.

Вариации профилей линий анализировались в работе [3]. Было установлено, что характер этих вариаций зависит от глубины образования линий. Фраунгоферовы линии, образующиеся в верхних и средних слоях фотосферы ($h > 200$ км), на всех стадиях вспышки ослаблены. Имело место постепенное их уширение со временем. Вариации профилей линий, образующихся в основании фотосферы, не так однозначны. Их центральные глубины подвержены резким изменениям в пределах ± 30 %, но тенденция

Временные характеристики вспышечного процесса в рентгеновском диапазоне

Фазы	Начало, УТ		Максимум, УТ		Конец, УТ	
	0.1—0.8 нм	0.05—0.4 нм	0.1—0.8 нм	0.05—0.4 нм	0.1—0.8 нм	0.05—0.4 нм
Предварительный нагрев	07:52:24	07:52:57	07:59:42	07:58:07, 07:59:14	08:01:53	08:02:21
Импульсная фаза	08:05:40	08:05:49	08:12:15	08:11:42		
Главная фаза	08:12:15	08:11:42			08:45 и позже	08:45
Кратковременный всплеск	08:06:35	08:07:12	08:06:38	08:07:15	08:06:57	08:07:27

к уширению линий сохраняется. Кроме того, у этих линий происходила смена синей асимметрии в начальной стадии на красную в максимуме вспышки [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ранее было выполнено моделирование хромосферного компонента вспышки 7 октября 1979 г. [3]. Расчеты выполнялись с учетом отклонений от ЛТР. Они показали, что в импульсной фазе имел место постепенный прогрев области вблизи переходного слоя ($-6 < \lg \tau_5 < -5$), что проявилось в продвижении этого слоя в глубь атмосферы.

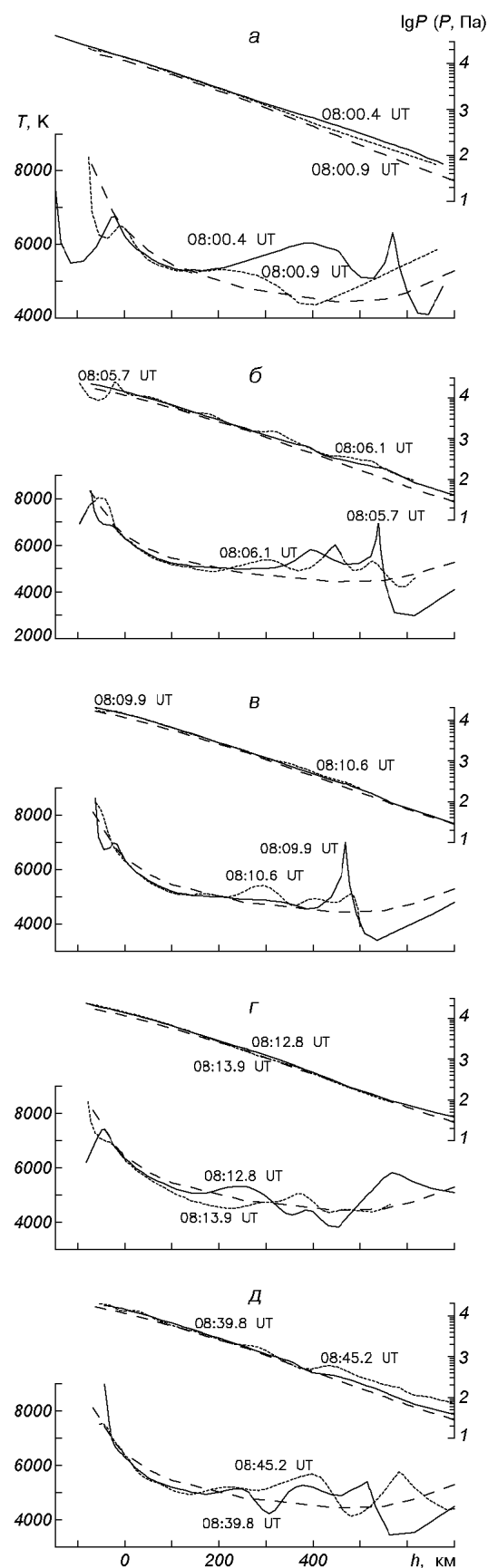
В рамках нашего моделирования фотосферной составляющей вспышки предусматривается объяснение вариаций профилей наблюдаемых фраунгоферовых линий. Выбор линий с малым фактором Ланде позволяет не учитывать при расчетах возможные изменения магнитного поля. Моделирование осуществлялось путем согласования наблюдаемых и вычисленных профилей линий. Использовалась программа SIR (Stokes Inversion based on Response functions) [30] для параметра профилей линий I . Исходной моделью служила модель флоккула VAL-F [35]. Определялись следующие параметры модели: температура, газовое и электронное давление, лучевые скорости, макро- и микротурбулентная скорости и геометрические высоты. При расчетах мы добивались согласования теоретических профилей линий с наблюдаемыми в пределах точности последних.

Из рис. 1 видно, что спектральные наблюдения относятся к разным стадиям развития вспышки. Мы рассматриваем результаты моделирования фотосферы для каждого из этих этапов развития вспышки. Общее свойство полученных моделей — наличие неоднородностей температуры, давления и других параметров на разных высотах.

Фаза предварительного нагрева. Первые спектры получены в $08^{\text{h}}00.4^{\text{m}}$ UT и $08^{\text{h}}00.9^{\text{m}}$ UT вскоре после максимума тепловой фазы, предшествовавшей импульсной фазе вспышки. В этот период сильной деформации подверглись профили линии H_{α} и фотосферных линий. Они ослабились, появилась синяя асимметрия и сдвиг в коротковолновую сторону спектра [7]. Доплеровские смещения линий указывают на восходящие движения во вспышечной хромосфере со скоростью до 0.5 км/с и в средней фотосфере со скоростью 1.2 км/с.

Модельные профили температуры и газового давления для этих моментов представлены на рис. 2, а. Они свидетельствуют об увеличении температуры и газового давления в верхней фотосфере по сравнению с моделью VAL-F, несмотря на то, что поток рентгеновского излучения усилился незначительно. В первый момент наблюдений избыток температуры в температурных неоднородностях достигал 1500—1700 К. В последующий момент усилился прогрев в верхних слоях ($h > 600$ км), тогда как в первоначально прогретых слоях температура значительно понизилась. Одновременно уменьшилось и газовое давление.

Области инверсии температуры во вспышке и в модели VAL-F относительно модели невозмущенной фотосферы VAL-C [35] совпадают (~ 150 км). Значительные изменения температуры модели показали в наиболее глубоких слоях, что было для нас неожиданным. Дефицит температуры в узком слое превышал 2000 К. Кроме того, этот слой за 30 с, прошедших между наблюдениями, сместился вверх на несколько десятков километров. Изменения давления в этих слоях невелики. Более того, вся область формирования линий сместилась в более высокие фотосферные слои.



Начало импульсной фазы вспышки. На этой стадии в верхней фотосфере более прогретые и плотные слои на луче зрения стали уже (рис. 2, б). Однако область дефицита температуры на уровне 600 км и выше, которая просматривалась в начальный момент наблюдений, значительно расширилась, и температура в ней уменьшилась. Верхняя граница области пониженной температуры в нижних слоях продвинулась вверх до 200 км.

Неоднородности видны и в распределении газового давления с глубиной, причем в верхней части фотосферы давление больше, чем в исходной модели. Отметим также появление в 08^h06.1^m UT узкого слоя пониженного давления глубже основания фотосферы.

Вблизи H_α-максимума импульсной фазы. Спектрограммы получены в 08^h09.9^m UT и 08^h10.6^m UT. Как уже отмечалось выше, максимум вспышки в линии H_α (08^h10^m UT по SGD) наступил, когда поток SXR еще не достиг своего максимума (таблица). Вспышки с такой же последовательностью событий составляют 55 % [36]. Авторы этой работы объясняют характер развития вспышек тем, что хромосферная плазма охлаждается быстрее, чем корональная.

Рис. 2. Модели фотосферы вспышки (высотные профили температуры и давления газа): а — начало наблюдений (фаза предварительного нагрева) в 08^h00.4^m и 08^h00.9^m UT, б — начало импульсной фазы вспышки в 08^h05.7^m и 08^h06.1^m UT, в — вблизи H_α-максимума импульсной фазы в 08^h09.9^m и 08^h10.6^m UT, г — начало главной фазы вскоре после максимума потока SXR в 08^h12.8^m и 08^h13.9^m UT, д — фаза затухания вспышки в 08^h39.8^m и 08^h45.2^m UT. Штриховая линия — модель флоккула VAL-F

Из работы [3] следует, что на этом этапе рассматриваемой нами вспышки произошла смена знака асимметрии и доплеровского сдвига линии H_{α} . Вместо подъема вещества в хромосфере, зарегистрированного на предыдущих стадиях, имело место его опускание со скоростью 22 км/с. Скорее всего, это связано с прохождением из верхних слоев конденсации [27, 32, 33 и др.]. В то же время в верхней и средней фотосфере продолжался подъем вещества со скоростями, близкими к 1.3 км/с.

Качественно фотосферные модели в этот период (рис. 2, в) подобны моделям, относящимся к предыдущему периоду, однако распределения температуры по высоте более сглаженные, особенно в нижних слоях. Сохраняется небольшое понижение температуры в глубоких слоях и избыток температуры и давления в узких слоях в верхней фотосфере до уровня 500 км. Широкая область пониженной температуры ($\Delta T \sim 1000$ К) в верхней фотосфере оказалась сдвинутой на 100 км в глубь атмосферы относительно ее положения в предыдущем периоде. Дефицит температуры в ней стал меньше.

Начало главной фазы вспышки. Фотосферные модели рассчитаны для двух моментов ($08^{\text{h}}12.8^{\text{m}}$ UT и $08^{\text{h}}13.9^{\text{m}}$ UT) спустя 0.5–1 мин после максимумов в SXR (рис. 2, г). Отметим отсутствие широкой области пониженной температуры на высотах более 500 км. Небольшая область пониженной температуры видна только в $08^{\text{h}}12.8^{\text{m}}$ UT на более низких высотах ($300 \text{ км} < h < 500 \text{ км}$), и дефицит температуры не превышает 500 К. Спустя 1 мин области пониженной температуры в верхней фотосфере вообще нет, а область дефицита температуры ($\Delta T \approx 500$ К) в средней и нижней фотосфере расширилась. Изменения давления невелики.

Окончание вспышки. Согласно SGD хромосферная вспышка продолжалась и после $08^{\text{h}}15^{\text{m}}$ UT. Из наших спектральных наблюдений следует, что интенсивность линии H_{α} в месте вспышки была близка к ее интенсивности в невозмущенной атмосфере лишь спустя 25–30 мин. Как показывают модели (рис. 2, д), и в $08^{\text{h}}39.8^{\text{m}}$, и $08^{\text{h}}45.2^{\text{m}}$ UT фотосфера все еще была в возбужденном состоянии. В верхней фотосфере сохранялись температурные неоднородности, а в нижних — дефицит температуры около 200 К. Отклонения газового давления от его величины в стандартной модели даже увеличились. В средних слоях фотосферы продолжался подъем фотосферного вещества примерно с той же скоростью, что и в предыдущих фазах.

Вариации макро- и микротурбулентной скорости в процессе вспышки. Одним из показателей крупномасштабных движений в атмосфере Солнца является скорость макротурбулентности, которая включает движения в гранулах, супергранулах, осцилляции и пр. В случае вспышек вопрос о природе макротурбулентности усложняется из-за движений в поднимающихся спиральных магнитных структурах и волн разных типов. Поэтому интересно проследить изменения макротурбулентной скорости в ходе вспышки. На рис. 3 приведены значения $V_{\text{макро}}$, полученные при моделировании. Для сопоставления со значениями скорости в невозмущенной фотосфере вертикальной линией указаны пределы ее изменения для высот, на которых

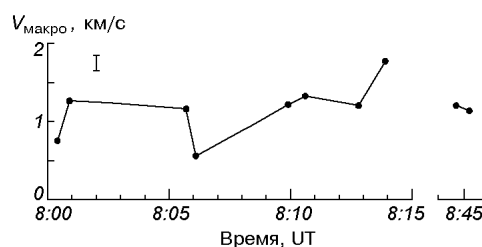


Рис. 3. Вариации макротурбулентной скорости в процессе вспышки. Вертикальной линией указаны пределы изменения макротурбулентной скорости в невозмущенной фотосфере

образуются рассматриваемые в работе фраунгоферовы линии [6]. На протяжении всей вспышки макротурбулентные скорости меньше, чем в невозмущенной фотосфере, что свидетельствует о частичном подавлении турбулентности. Как видно из рис. 3, изменения $V_{\text{макро}}$ со временем имеют нерегулярный характер. Скорость, после падения в начале импульсной фазы более чем в два раза, в последующий период увеличилась. Результаты моделирования показывают, что крупномасштабные движения в фотосфере были подавлены и в конце вспышки.

Что касается скорости микротурбулентности, то в большом интервале высот фотосферы ее значения в процессе вспышки не превосходят 200 м/с. Это существенно меньше, чем в стандартной модели VAL-F. Наши результаты, свидетельствующие о частичном или полном подавлении микротурбулентности, перекликаются с выводом [1] о том, что во время вспышки подавляются мелкомасштабные флуктуации фотосферного поперечного магнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании анализа временных профилей SXR-излучения двухленточной вспышки 7 октября 1979 г. установлено: а) импульсной фазе предшествовала стадия предварительного нагрева; б) все три всплеска в более «мягком» диапазоне 0.1—0.8 нм начинались примерно на 30 с раньше, чем в более «жестком» диапазоне 0.05—0.4 нм; в) максимум эмиссии в линии H_{α} наступил почти на 2 мин раньше, чем максимум в SXR. Это может быть следствием того, что магнитному пересоединению взрывного типа в верхней атмосфере предшествуют изменения состояния вещества на более низких уровнях атмосферы. Характер развития вспышки соответствует сценарию для третьего типа магнитных пересоединений [25]. Этот сценарий предусматривает образование токового слоя на низких высотах в атмосфере Солнца. В нашем случае продолжительность стадии предварительного нагрева близка к оценке [25].

Полученные полуэмпирические модели позволили проследить в динамике состояние вещества фотосферы на разных стадиях развития вспышки.

Особенностью всех моделей является наличие неоднородностей температуры, давления и других параметров на разных высотах. По характеру изменений, происходящих в фотосфере, можно выделить два периода.

Первый период совпадает со стадией предварительного нагрева. На этой стадии возмущению подверглась вся фотосфера, а также слои, расположенные ниже ее основания. Это проявилось в прогреве средних и верхних и охлаждении глубоких слоев. Смещение области дефицита температуры у основания фотосферы вверх, подъем вещества и существенные изменения температуры и давления в фотосфере при незначительных изменениях потока рентгеновского излучения могут свидетельствовать о преобладании возмущения, распространяющегося из глубоких, возможно подфотосферных слоев.

Второй период включает импульсную фазу и максимумы вспышки в линии H_{α} и в рентгеновском излучении. Изменения температуры относительно модели флоккула VAL-F вблизи основания фотосферы стали меньше. Постепенное смещение вниз границы области пониженной температуры в верхней фотосфере и ее прогрев свидетельствуют о том, что возмущение на этом этапе вспышки распространялось из более высоких ярусов атмосферы. Это подтверждается и измерениями лучевых скоростей по смещениям линии H_{α} , которые указывают на опускание вещества в хромосфере. Выявленные динамические особенности вспышечной фотосферы могут быть следствием

прохождения холодной хромосферной конденсации, сопровождающейся волнами, из области основного пересоединения в верхней атмосфере.

Из полученных нами моделей следует, что фотосфера и в конце вспышки все еще находилась в возбужденном состоянии. В течение всей вспышки крупно- и мелкомасштабные движения фотосферного вещества были подавлены.

Таким образом, различные процессы могут быть эффективными в фотосфере на начальной стадии вспышки и в импульсной, и постимпульсной фазах. Аналогичный вывод получен в работе [16].

1. Абраменко В. И., Юрчишин В. Б., Карбоне В. Отклик фотосферного магнитного поля на солнечную вспышку // *Кинематика и физика небес.* тел.—1998.—14, № 3.—С. 210—218.
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., 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.
4. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н., Редюк Т. И., Рудникова Е. Г. Нижняя фотосфера активных областей Солнца перед вспышками и без вспышек I. Фраунгоферов спектр // *Кинематика и физика небес.* тел.—1993.—9, № 1.—С. 24—36.
5. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н., Редюк Т. И., Рудникова Е. Г. Нижняя фотосфера активных областей Солнца перед вспышками и без вспышек. II. Физические условия // *Кинематика и физика небес.* тел.—1993.—9, № 2.—С. 57—70.
6. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
7. 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.
8. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Особенности генерации ионно-звуковых волн в предвспышечной плазме // *Кинематика и физика небес.* тел.—2004.—20, № 6.—С. 467—476.
9. Могилевский Э. И. Структуризация вспышечно-активной области и солитонная модель первичного источника энергии и вещества в солнечных вспышках // *Кинематика и физика небес.* тел.—1986.—2, № 2.—С. 75—82.
10. Abramenko V. I., Jurchishin V. B., Carbone V. Does the photospheric current take part in the flaring process? // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334, N 2.—P. L57—L60.
11. Alikeeva K. V., Chornogor S. N. Preflare chromospheric and photospheric line-of-sight velocities // *Multi-wavelength investigations of solar activity: Proc. IAU Symp. N 223 / Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev.* — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 227—228.
12. Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., et al. Coordinated observations of solar activity phenomena I. Multispectral study of an elementary flare // *Astron. and Astrophys.*—1995.—299, N 1.—P. 611—620.
13. Chae J., Moon Y.-J., Park S.-Y. Observational tests of chromospheric magnetic reconnection // *J. Korean Astron. Soc.*—2003.—36.—P. 13—20.
14. Cheng C., Pallavicini R., Acton L. W., Tandberg-Hanssen E. Energy release topology in a multiple-loop solar flare // *Astrophys. J.*—1985.—298, N 1.—P. 887—897.
15. Chornogor S. N., Alikeeva K. V. The investigation of the physical conditions in the flare H α loop by the semiempirical simulation // *II Nuovo Cimento.*—2002.—25.—P. 747—752.
16. Chornogor S. N., Alikeeva K. V. Line-of-sight velocity variations in the low-temperature layers of the H α flare loops // *Multi-wavelength investigations of solar activity: Proc. IAU Symp. N 223 / Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev.* — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 235—236.
17. Falchi A., Qiu J., Cauzzi G. Chromospheric evidence for magnetic reconnection // *Astron. and Astrophys.*—1997.—328, N 1.—P. 371—380.
18. Falciani R. Future optical observations of solar flares // *Adv. Space Res.*—1988.—8, N 11.—P. 11—20.
19. Forbes T. G., Priest E. R. Photospheric magnetic field evolution and eruptive flares // *Astrophys. J.*—1995.—446, N 1.—P. 377—389.
20. 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.
21. Ishii T. T., Kurokawa H., Takeuchi T. T. Emergence of twisted magnetic-field bundle as a

- source of strong flare activity // *Astrophys. J.*—1998.—499, N 2.—P. 898—904.
22. Ishii T. T., Kurokawa H., Takeuchi T. T. Emergence of twisted magnetic-field bundles and flare activity in a large active region, NOAA 4201 // *Publ. Astron. Soc. Japan.*—2000.—52.—P. 337—354.
 23. Kim J., Jun H. S., Lee S., et al. A rapid change in magnetic connectivity observed before filament eruption and its associated flare // *Astrophys. J.*—2001.—547, N 1.—P. L85—L88.
 24. Kitai R., Kurokawa H., Funakoshi Y., et al. Flares on September 6, 1992 // *Proc. Kofu Symp.*—1994.—NRO Report N 360.—P. 147—150.
 25. Li H.-W., Pallavicini R., Cheng C.-C. The gradual and impulsive reconnection and the preheating of solar flares // *Solar Phys.*—1987.—107, N 2.—P. 271—282.
 26. Moon Y.-J., Chae J., Choe G. S., et al. Low atmosphere reconnections associated with an eruptive solar flare // *Korean Astron. Soc.*—2004.—37.—P. 41—53.
 27. Nagai F., Emslie A. G. Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares // *Astrophys. J.*—1984.—279, N 2.—P. 896—908.
 28. Pevtsov A. A., Canfield R. C., Zirin H. Reconnection and helicity in a solar flare // *Astrophys. J.*—1996.—473, N 1.—P. 533—538.
 29. Roumeliotis G., Moore R. L. A linear solution for magnetic reconnection driven by converging or diverging footpoint motions // *Astrophys. J.*—1993.—416, N 1.—P. 386—391.
 30. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—398, N 1.—P. 375—385.
 31. *Solar Geophys. Data.*—1981.—439.—P. 81—83.
 32. Somov B. V., Sermulina B. J., Spector A. R. Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. II. Thermal model // *Solar Phys.*—1982.—81, N 2.—P. 281—292.
 33. Somov B. V., Syrovatskii S. I., Spector A. R. Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. II. Heating by accelerated electrons // *Solar Phys.*—1981.—73, N 1.—P. 145—155.
 34. Titov V. S., Demoulin P. Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares // *Astron. and Astrophys.*—1999.—351, N 2.—P. 707—720.
 35. 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.
 36. Veronig A., Vrsnak B., Temmer M., Hanslmeier A. Relative timing of solar flares observed at different wavelengths // *Solar Phys.*—2002.—208, N 2.—P. 297—315.
 37. Wang H., Qiu J., Jing J., et al. Evidence of rapid flux emergence associated with the M8.7 flare on 2002 July 26 // *Astrophys. J.*—2004.—605, N 2.—P. 931—937.
 38. Zhang H. Q., Sakurai T., Shibata K., et al. Soft X-ray flares and magnetic configuration in a solar active region in February 1992 // *Astron. and Astrophys.*—2000.—357, N 2.—P. 725—734.

Поступила в редакцию 15.12.05