

УДК 523.985.3

С. Н. Черногор, К. В. Аликаева

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

Поле лучевых скоростей в H_{α} -петлях в процессе развития яркой солнечной вспышки

Исследовано поле лучевых скоростей на хромосферном и фотосферном уровнях во вспышечных H_{α} -петлях в процессе развития вспышки 1b/M2.2 3 сентября 1990 г. Спектры и фильтрограммы получены на телескопе АЦУ-26 на пику Терскол. Проведено сопоставление изменений во времени лучевых скоростей в вершинах и основаниях петель с вариациями интенсивности рентгеновского и H_{α} -излучения. В ходе развития вспышки наблюдались квазипериодические вариации излучения и скоростей с периодом около 3 мин в верхних слоях атмосферы и 1-2 мин в фотосфере. Временные вариации интенсивности рентгеновского и H_{α} -изображения указывают на то, что отдельные рентгеновские всплески связаны с последовательным возмущением петель в аркаде. H_{α} -интенсивности и скорости в основаниях петель значительно больше, чем в вершинах (аналогичная картина наблюдалась на КА «Уолков» в SXR-петлях). В основаниях вспышечных петель подъем фотосферного вещества зарегистрирован в моменты, соответствующие минимумам H_{α} - и рентгеновской интенсивности. Максимумы яркости сопровождаются нисходящими движениями фотосферной плазмы. На ранней стадии элементарного рентгеновского всплеска и в максимуме могут действовать различные механизмы, приводящие к наблюдаемым особенностям поля скоростей в хромосфере и фотосфере.

ПОЛЕ ПРОМЕНЕВИХ ШВИДКОСТЕЙ В H_{α} -ПЕТЛЯХ У ПРОЦЕСІ РОЗВИТКУ ЯСКРАВОГО СОНЯЧНОГО СПАЛАХУ, Черногор С. М., Аликаева К. В. — Досліджено поле променевих швидкостей на хромосферному та фотосферному рівнях в спалахових H_{α} -петлях в процесі розвитку спалаху 1b/M2.2 3 вересня 1990 р. Спектри та фільтрограми отримано на телескопі АЦУ-26 на піку Терскол. Проведено зіставлення змін в часі променевих швидкостей у вершинах та основах петель з варіаціями інтенсивності рентгенівського та H_{α} -випромінювання. В ході розвитку спалаху спостерігалися квазіперіодичні варіації випромінювання та швидкостей з періодом близько 3 хв у верхніх шарах атмосфери та 1-2 хв у фотосфері. Варіації з часом інтенсивності рентгенівського та H_{α} -зображення вказують на те, що окремі рентгенівські сплески пов'язані з послідовним збуренням петель в аркаді. H_{α} -інтенсивності та швидкості

в основах петель значно більші, ніж у вершинах (аналогічна картина спостерігалася на КА «Yohkoh» в SXR-петлях). В основах спалахових петель підйом фотосферної речовини зареєстровано в моменти, що відповідають мінімумам H_{α} - та рентгенівської інтенсивності. Максимуми яскравості супроводжуються низхідними рухами фотосферної плазми. На ранній стадії елементарного рентгенівського сплеску та у максимумі можуть діяти різні механізми, що призводять до спостережуваних особливостей поля швидкостей у хромосфері та фотосфері.

LINE-OF-SIGHT VELOCITY FIELD IN H_{α} -LOOPS IN A COURSE OF THE BRIGHT SOLAR FLARE, by Chornogor S. N., Alikaeva K. V. — Line-of-sight (LOS) velocities on chromospheric and photospheric levels in the H_{α} -loops are studied in the course of the flare 1b/M2.2 development on 3 September 1990. The spectra and filtergrams were derived with the solar telescope ATsU-26 at the Terskol Peak Observatory. Temporal variations of LOS velocities at loop tops and bases were compared with H_{α} - and HXR-fluctuations. Quasiperiodic variations of H_{α} - and HXR-intensities and velocity with periods of about 3 min at upper levels and of about 1-2 min in the photosphere took place. XR time-profile and H_{α} -filtergrams show that elementary XR spikes are connected with consecutive disturbances of the H_{α} -loops in arcade. H_{α} -intensity and velocity at the flare bases are much greater than at their tops (the analogous picture was observed by Yohkoh in SXR-loops). At the photospheric levels, material lifting in loop bases was recorded only when the H_{α} - and HXR-intensities were at minima. The intensity maxima were accompanied by descending motions of photospheric plasma. Different mechanisms may be efficient at early stages of elementary XR spikes and at their maxima. This is a reason of observed peculiarities of velocity field in the chromosphere and photosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Детальный анализ движений вещества во вспышечной области на Солнце, в частности в низкотемпературных слоях атмосферы, является важным фактором для понимания процессов распространения возмущения из области первичного освобождения энергии в результате магнитных пересоединений во вспышках разных типов.

Согласно современным представлениям солнечные вспышки делятся на два класса [20, 23, 26, 43, 45]. Общим свойством всех вспышек является то, что все они возникают в результате освобождения энергии вследствие пересоединения противоположно направленных магнитных полей. Однако этот процесс может различаться во вспышках разных классов.

Мощные продолжительные вспышки (long-duration events — LDE) — это медленно развивающиеся аркады больших петель, основания которых расположены по обе стороны линии инверсии фотосферного магнитного поля. К этому классу относятся и двухленточные вспышки. Характерные признаки LDE — S-образная конфигурация структуры магнитного поля активной области [9, 18, 19, 29, 45] и наличие большого скрученного протуберанца над аркадой. Подъем протуберанца еще на предвспышечной стадии с последующим ускорением до 200 км/с в начале импульсной фазы (извержение протуберанца) сопровождается подъемом лежащих под ним петель аркады [20, 29, 45]. Наблюдения на КА «Yohkoh» в рентгеновском и микроволновом диапазонах показали, что в короне происходят крупномасштабные пересоединения с петельными структурами, вершины которых имеют форму лучей (cusp-type) [37, 39, 45, 50]. Как показано в работе

[37], образующийся в результате магнитных пересоединений токовый слой имеет дискретную структуру. Из данных [54] следует, что отдельные всплески жесткого рентгена могут относиться к разным местам в короне. Неоднородность токового слоя объясняет наблюдаемое распространение возбуждения вспышечных петель вдоль аркады [28, 45]. В результате пересоединения генерируются медленные МГД-волны, распространяющиеся вниз к основаниям петель [20, 45, 51].

Данные многоволновых наблюдений показали совпадение (в картинной плоскости) мест свечения H_{α} , мягкого и жесткого рентгена, отождествляемых с основаниями вспышечных петель [17, 32, 52]. В начальной фазе вспышек хорошее согласие наблюдается между световыми кривыми в H_{α} и временными профилями жесткого рентгена (в пределах нескольких секунд) [26, 32, 53]. Это свидетельство воздействия потоков ускоренных частиц, проникающих из области пересоединения. При этом в основаниях петель в хромосфере наблюдаются нисходящие движения вещества, а в короне — восходящие [17, 52]. Согласно оценкам [52] моменты для восходящих и нисходящих потоков практически равны. Данные о скоростях в основаниях петель свидетельствуют в пользу модели хромосферного испарения.

Компактные импульсные вспышки — быстротечные события. Вспышки этого класса представляют собой одиночные петли (или несколько петель). Несмотря на то, что импульсные вспышки составляют большинство, процесс магнитного пересоединения в них изучен недостаточно.

Богатый наблюдательный материал, полученный на КА «Yohkoh» в рентгеновском и микроволновом диапазонах, позволил выявить некоторые особенности этого класса вспышек [21, 22, 24, 34—36, 46, 48, 54]. Для них характерны более низкие, чем у LDE-вспышек, значения скорости подъема SXR-петель (12—17 км/с). Установлено, что есть три разновидности источников жесткого рентгеновского излучения:

1) компактный импульсный источник, расположенный над вершиной SXR-петли (loop-top impulsive source). Предполагается, что этот источник является местом, откуда исходят потоки ускоренных электронов. Время жизни LTIS — несколько десятков секунд.

2) парные HXR-источники, расположенные в основаниях SXR-петель по обе стороны нейтральной линии магнитного поля. Вспышки с множественными источниками HXR представляют ансамбль двойных источников. Эмиссия HXR возникает одновременно (в пределах 1 с) в обоих основаниях и вызвана потоками энергичных электронов вдоль ветвей петли. Интенсивности источников в основаниях могут различаться и зависят от напряженности магнитного поля в основаниях. Более яркие источники проявляют тенденцию располагаться в области более слабого магнитного поля и имеют более жесткий спектр.

3) Горячий ($T \approx 20$ — 30 МК) диффузный HXR-источник в вершине SXR-петли в главной фазе вспышки (loop-top graduate source).

Однако в работах [21, 22, 48] убедительно показано, что оба класса вспышек имеют ряд общих свойств. Так, физическим механизмом образования источников жесткого излучения является магнитное пересоединение. Обнаружены отрицавшиеся ранее лучеподобные образования в вершинах SXR-петель. В некоторых компактных вспышках отмечены слабые извержения масс. В работе [22] получен вывод, что особенности вспышек этих двух классов определяются высотой, на которой происходит магнитное пересоединение: у двухленточных вспышек точка пересоединения находится высоко в короне, а у компактных вспышек — в нижней короне, в области более сильного магнитного поля. Вследствие этого компактные вспышки более интенсивны в жестком рентгене.

Важную роль в диагностике вспышек на разных стадиях их развития играют процессы на всех уровнях атмосферы активной области, включая фотосферу (в частности, подъем плазмы и преимущественный нагрев оснований петель). Это отмечают авторы ряда работ [1, 33]. В работах [8, 31] показано, что учет неоднородностей плазмы и изменений амплитуды квазистатического электрического поля в контуре петли объясняет наличие в петлях плазменных неустойчивостей. Вследствие этого в предвспышечных петлях при некоторых условиях могут возникать плазменные волны нового типа, которые участвуют в ряде физических процессов в активной области. Подробный критический обзор [13] имеющихся моделей нагрева корональных петель привел к выводу, что новые наблюдательные данные, полученные на космических аппаратах, могут найти объяснение при решении проблемы коронального нагрева с учетом вклада нижележащих слоев атмосферы. В связи с этим представляется важным изучение процессов во вспышках на уровне фотосферы и хромосферы и их связь с процессами в короне. Поле скоростей является составляющей частью таких исследований.

Предыдущая работа [4] была посвящена исследованию поля лучевых скоростей на фотосферном и хромосферном уровнях во вспышечной H_{α} -петле в процессе развития слабой вспышки. Описанные в работе свойства поля лучевых скоростей указывают на то, что характер движения зависит от фазы развития вспышки. Кроме того, для разных деталей вспышечной петли (вершина или основание) он может существенно различаться. В настоящей работе мы продолжаем исследование поля скоростей, но в более мощной вспышке.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Объектом исследования является яркая вспышка (1b/M2.2) 3 сентября 1990 г. ($\cos\theta = 0.545$). Общие сведения о развитии вспышки во времени в различных диапазонах спектра приведены в табл. 1. В работе были использованы следующие наблюдательные данные:

- спектры, полученные на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-26 ВНБ «Терскол» Главной астрономической обсерватории НАН Украины [3] (наблюдатель — Т. И. Редюк). Наблюдения охватывают период от максимума до окончания вспышки. Интервалы между экспозициями составляли около 0.5 мин;
- телевизионные H_{α} -изображения активной области, полученные с помощью комплекса аппаратуры (наблюдатели — В. А. Данилевский и А. А. Рожило). Установка дает возможность записывать H_{α} -фильм-граммы и точное время экспозиции на видеоманитофон [6];

Таблица 1. Общие сведения о развитии вспышки во времени в различных диапазонах спектра

Вид наблюдений	Начало	Максимум	Конец	Литературный источник
0.05—0.4 нм	09 ^h 40 ^m	09 ^h 41 ^m , 09 ^h 44 ^m , 09 ^h 50 ^m , 09 ^h 53 ^m и др.	10 ^h 18 ^m	[GOES]
0.1—0.8 нм	09 ^h 40 ^m	—	10 ^h 00 ^m	[GOES]
3.1 ГГц	09 ^h 42.5 ^m	09 ^h 44.1 ^m	09 ^h 52.3 ^m	[16]
5.2 ГГц	09 ^h 42.7 ^m	09 ^h 44.3 ^m	09 ^h 46.4 ^m	[16]
H_{α}	09 ^h 43 ^m	09 ^h 44 ^m , 09 ^h 47 ^m	10 ^h 04 ^m	[SGD]
H_{α}	09 ^h 42 ^m	09 ^h 44.6 ^m , 09 ^h 47.2 ^m , 09 ^h 50.5 ^m , 09 ^h 53.3 ^m	10 ^h 40 ^m	[Настоящая работа]

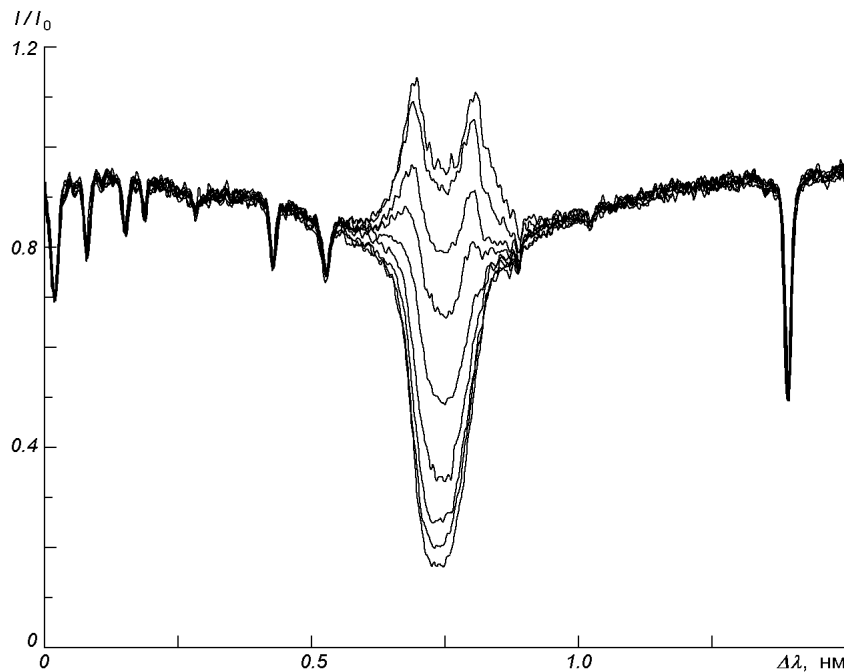


Рис. 1. Профили H_{α} (09:44:39 UT) для различных фотометрических сечений вдоль щели спектрографа: расстояние между сечениями соответствует 845 км на солнечной поверхности

- данные GOES о рентгеновском излучении [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/>];
- карта фотосферного магнитного поля исследуемой активной области за несколько часов до вспышки из NSO Digital Library, созданной при поддержке National Science Foundation и NASA в рамках National Space Weather Program и Upper Atmosphere Research Program.

На щель спектрографа проектировались две петли, наиболее яркие в первичном очаге вспышки, которые отслеживались на протяжении всей вспышки с некоторыми перерывами. Фотометрия спектрограмм была выполнена на двухкоординатном микрофотометре [10] с шагом вдоль щели спектрографа, который соответствует $1.15''$ (845 км на солнечной поверхности). Линия H_{α} фотометрировалась с шагом вдоль дисперсии 1 пм, а фраунгоферовы линии — с шагом 0.5 пм.

Как и в слабой вспышке [4], форма профилей линии H_{α} в обеих петлях изменяется от одновершинных профилей до двухвершинных в зависимости от того, соответствуют ли фотометрические сечения верхней части вспывшечной петли или ее основанию. В качестве примера на рис. 1 представлены профили для различных фотометрических сечений вдоль щели спектрографа. Спектр получен в максимуме поярчания одной из петель. Однако в минимумах поярчаний характер H_{α} -эмиссии изменяется: вместо эмиссии в ядре линии + эмиссия типа усов видны наклонные эмиссионные H_{α} -образования. Это может свидетельствовать о наличии дисперсии лучевых скоростей вдоль петли [40].

Лучевые скорости находились по доплеровскому смещению исследуемых линий относительно нескольких близлежащих теллурических линий. Лучевые скорости были определены для различных моментов развития вспышки и различных фотометрических сечений с учетом поправки за вращение Земли вокруг своей оси и обращения вокруг Солнца, за вращение

Таблица 2. Характеристики фраунгоферовых линий

N	λ , нм	Элемент	EPL, эВ	$\xi_{\text{эф}}$	h_d , км
1	655.16821	Fe I	0.99	0.75	247
2	655.42321	Ti I	1.44	1.08	234
3	655.54680	Si I	5.94	1.00	210
4	655.60706	Ti I	1.45	1.25	237
5	655.67940	Fe I	4.77	0.50	194
6	656.92242	Fe I	4.71	1.38	347
7	657.27849	Ca I	0.00	1.50	263
8	657.42334	Fe I	0.99	1.25	268

Солнца и гравитационный сдвиг. Средняя квадратичная ошибка σ определения скорости движения хромосферного вещества по линии H_{α} не превышает 200 м/с. При определении скоростей в фотосфере по фраунгоферовым линиям $\sigma \leq 50$ м/с.

Для определения лучевых скоростей в фотосфере были использованы некоторые фраунгоферовы линии, свободные от влияния далеких крыльев H_{α} . Характеристики исследуемых линий указаны в табл. 2: длины волн (использованы более точные значения из [12]), элемент из [44], потенциал возбуждения нижнего уровня [38], эффективный фактор Ланде [15] и высоты образования линий в невозмущенной фотосфере, рассчитанные по программе SPANSAT [5] для модели HOLMU [27] и $\cos\theta = 0.545$. Следует отметить, что полученные высоты условны, так как реальные фотосферные вспышечные модели [2, 11] существенно отличаются от модели HOLMU.

КАРТИНА РАЗВИТИЯ ВСПЫШКИ НА ХРОМОСФЕРНОМ УРОВНЕ

Вспышка возникла вблизи сложного пятна с несколькими ядрами S-полярности с вкраплениями N-полярности. На рис. 2, а приведена карта фотосферного магнитного поля активной области перед вспышкой и положения наиболее ярких очагов в процессе развития вспышки, полученные путем совмещения магнитограммы активной области и H_{α} -изображений вспышки (на рис. 2, б—д они отмечены контурами). Установлено, что первичный очаг в H_{α} возник в виде нескольких петель, основания которых располагались по обе стороны от линии раздела полярностей (рис. 2, б). Развитие вспышки происходило по такому сценарию: а) места наибольшего свечения H_{α} -петель смещались вдоль аркады над нейтральной линией, огибая отдельные супергрануляционные ячейки (рис. 2, б—д). Аналогичная картина описана в работе [45] для рентгеновских вспышечных петель и в [25] на основании магнитограмм; б) более ранние вспышечные очаги постепенно затухали; в) на конечной стадии распространение вспышечного процесса прекратилось на границе крупной супергранулы, отмеченной на рис. 2, а стрелочкой, частично заполняя ее; г) в конце вспышки отдельные петли были видны вблизи границы сетки (рис. 2, д); д) увеличение площади и яркости вспышки свидетельствует о том, что происходит нагрев не только в самих петлях, но и окружающего их вещества.

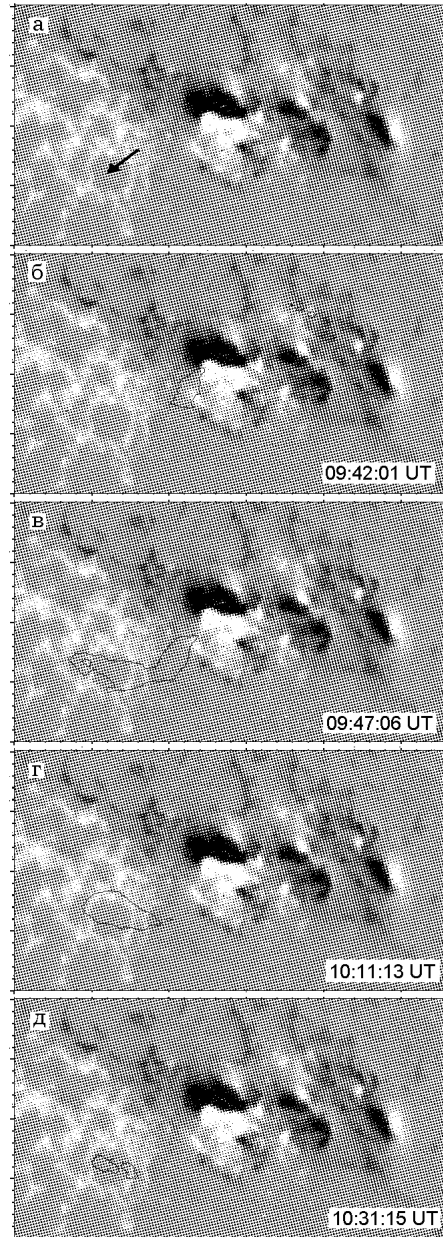
Изменения рентгеновского потока в двух диапазонах показаны на рис. 3, а и 4, а. Изменения центральной интенсивности в линии H_{α} со временем для вершин и оснований вспышечных петель А и Б показаны на рис. 3, б и 4, б. Первые H_{α} - и HXR-максимумы вспышки (09:44 UT) совпадают с первым максимумом поярчания петли А, а второй максимум вспышки (09:47 UT) — с максимумом в петле Б. Это позволяет предполо-

Рис. 2. Карта фотосферного магнитного поля активной области перед вспышкой и положения наиболее ярких очагов в процессе развития вспышки

жить, что всплески H_{α} -излучения в петлях связаны с двумя следующими друг за другом пересоединениями над этими петлями. Из рассмотрения H_{α} -изображений следует, что при каждом акте освобождения энергии возбуждаются и соседние с А и Б петли, хотя и в меньшей степени. Расстояние между петлями А и Б составляет 20000 км, что соответствует размерам супергранул. Приблизительные оценки показывают, что в максимуме 09:47 UT возмущение распространялось горизонтально от одной петли к другой со скоростью 300 км/с. Это может быть следствием распространения поперечных быстрых мод волн [14, 45]. На протяжении вспышки в каждой петле происходили колебания яркости с периодом около 3 мин. В обеих петлях изменения интенсивности линии H_{α} происходят синхронно в вершине и основании, причем интенсивность в основании больше. Аналогичная картина наблюдалась в рентгеновских петлях в импульсных вспышках [24, 34, 54].

Таким образом, на основании анализа H_{α} -фильтрограмм и данных о рентгеновском излучении можно констатировать, что характер развития данной вспышки свидетельствует о последовательном возбуждении петель в аркаде, что может быть следствием многократных пересоединений в короне [37] или слабых пересоединений в нижних слоях атмосферы. Согласно [1, 33] слабые пересоединения в фотосфере предшествуют быстрым пересоединениям взрывного характера в переходном слое или короне, где достигается критическое состояние. Экспериментальной проверкой роли фотосферы во вспышках может служить исследование характера движений на всех уровнях во вспышечных петлях и на всех стадиях развития вспышечного процесса.

Исследуемую вспышку нельзя однозначно отнести к классу импульсных вспышек или LDE: с одной стороны, вспышка продолжительна по времени и представляет собой аркаду петель, а с другой стороны, она не сопровождалась извержением вещества, характерным для LDE. Сопоставление характера временного хода жесткого рентгеновского излучения и развития



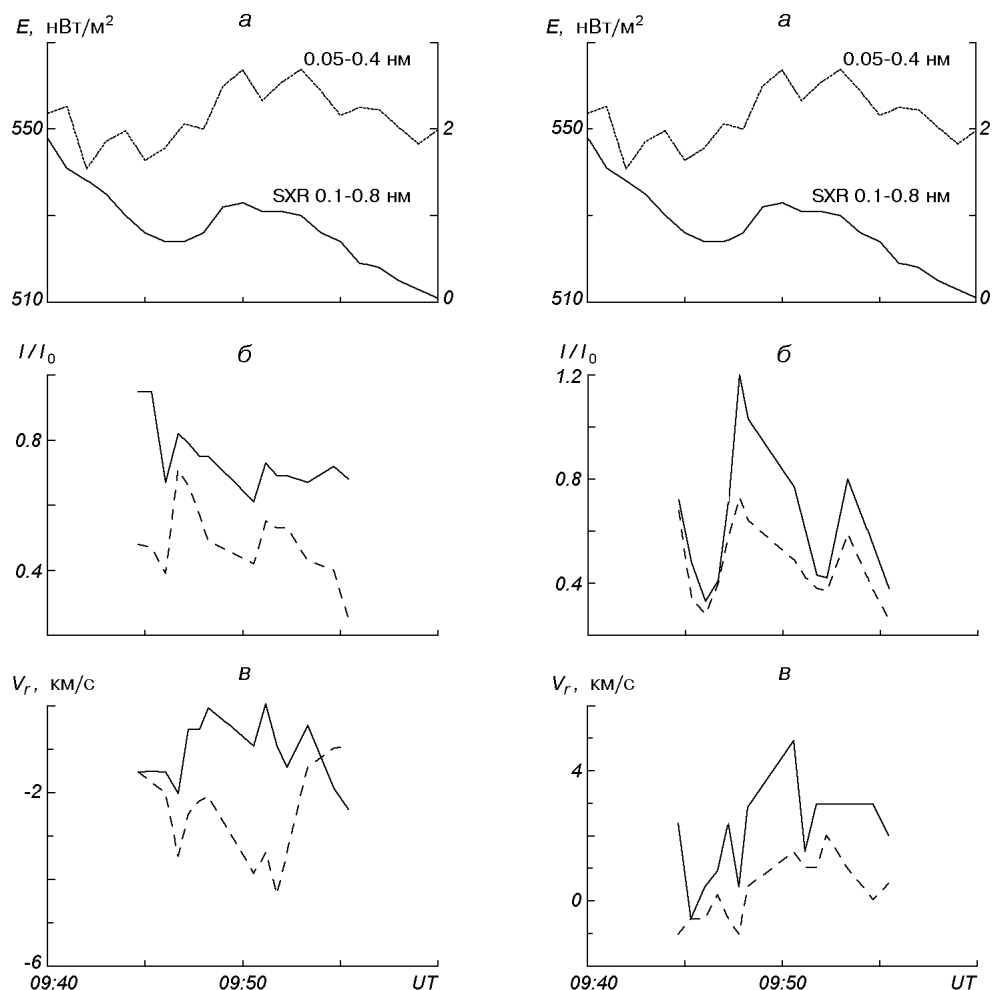


Рис. 3. Изменение со временем некоторых характеристик вспышечной петли А: а — потока рентгеновского излучения в двух диапазонах, б — центральной интенсивности в линии H_{α} , в — лучевых скоростей; штриховые линии — для вершины петли, сплошные — для ее основания

Рис. 4. То же, для петли Б

вспышки в H_{α} позволяет рассматривать эту вспышку как последовательность элементарных вспышек в аркаде, как это следует и из [1].

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ

Рассмотрим временной ход лучевых скоростей в хромосфере и фотосфере в петлях А и Б.

Лучевые скорости в хромосфере. Как видно из рис. 3 и 4, в хромосфере изменения скорости в вершине и основании каждой из петель происходят синхронно. Однако в петле А (рис. 3, в), связанной непосредственно с первичным источником энерговыделения, на протяжении всей вспышки наблюдался подъем хромосферного вещества, при этом скорости в основании были меньше по значению, чем в вершине. В петле Б (рис. 4, в) преобладало опускание, и только в верхней части петли происходил подъем

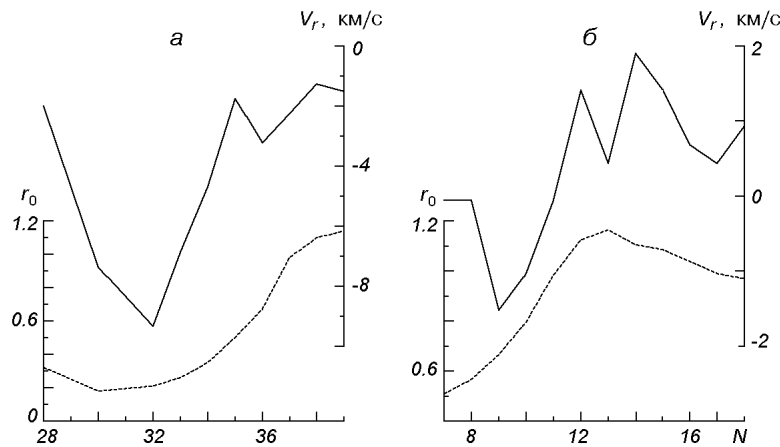


Рис. 5. Интенсивности в центре линии H_{α} (штриховая линия) и лучевые скорости в хромосфере (сплошная линия) для разных фотометрических сечений N : *а* — в петле А в 09:44 UT; *б* — в петле Б в 09:47 UT

вещества со скоростью до 1 км/с перед и во время максимума вспышки в 09:47 UT. Прослеживается некоторая тенденция: в обеих петлях абсолютные значения скорости больше на стадии, предшествующей максимумам всплесков SXR и интенсивности H_{α} .

Рис. 5 демонстрирует изменения интенсивности в центре линии H_{α} и лучевой скорости в петлях А и Б поперек дисперсии (это соответствует различным фотометрическим сечениям вдоль петель) в моменты максимумов рентгеновских всплесков в 09:44 UT (рис. 5, *а*, петля А) и в 09:47 UT (рис. 5, *б*, петля Б). Сечения 31—33 (рис. 5, *а*) и 8—10 (рис. 5, *б*) относятся к высоким частям петель (H_{α} -профили без центрального обращения). Остальные сечения относятся к ниже расположенным слоям, для которых характерны H_{α} -профили с поглощением в центре. Как видно, имеет место обратная корреляция между интенсивностью и скоростью. Максимальные скорости подъема вещества наблюдаются ближе к вершинам или в средней части петель.

Лучевые скорости в фотосфере. На фотосферном уровне картина лучевых скоростей более сложная. Из рис. 6 следует, что изменения скорости по величине и знаку происходят синхронно (в пределах временного разрешения) на трех фотосферных уровнях и с меньшим периодом, чем в хромосфере (1—2 мин). В основании обеих вспышечных петель в начальной фазе и на спаде каждого элементарного рентгеновского всплеска и H_{α} -интенсивности преобладают восходящие движения фотосферного вещества со скоростями до 1 км/с. Исключением является слой 230—270 км, скорости в котором близки к нулю. Аномальное поведение слоя в средней фотосфере отмечено и в работе [7]. Наблюдаемая картина неплохо согласуется с высотной зависимостью вертикальной скорости продольно-поперечной волны в фотосфере, рассчитанной в [42].

В моменты, близкие к максимумам H_{α} -яркости, наблюдаются нисходящие движения фотосферной плазмы глубже 300 км. В то же время на уровне 345 км в отдельных случаях зафиксирован подъем вещества со скоростями менее 0,5 км/с. Отметим также, что в петле Б пик скорости в фотосфере (09:47:47 UT) запаздывает на полминуты относительно пика скорости в хромосфере (09:47:13 UT). Это может свидетельствовать, что на

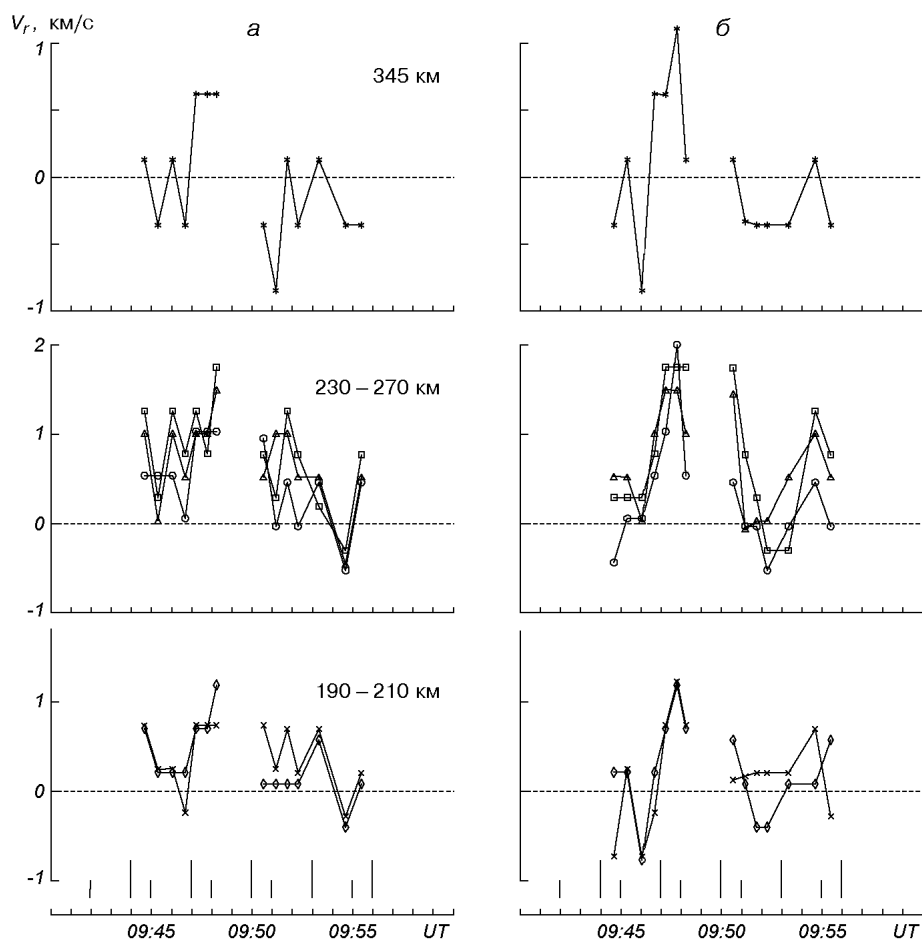


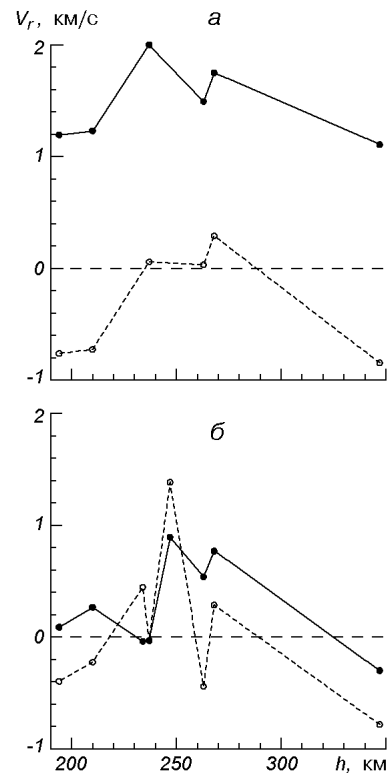
Рис. 6. Изменение фотосферных лучевых скоростей со временем в основаниях петель А (а) и Б (б) в разных высотных интервалах: ромбики — линия λ 655.68 нм, крестики — линия λ 655.55 нм, кружки — линия λ 655.61 нм, треугольники — линия λ 657.28 нм, квадратики — линия λ 657.42 нм, звездочки — линия λ 656.92 нм. Вертикальными штрихами в нижней части рисунка отмечены моменты, соответствующие началам (короткие штрихи) и максимумам (длинные штрихи) всплесков рентгеновского излучения

данном этапе доминирующими являются процессы в более высоких слоях солнечной атмосферы.

Рассмотрим пространственное распределение лучевых скоростей в зависимости от высот образования линий в петле Б для двух моментов на стадии усиления интенсивности в H_{α} : начала и максимума (рис. 7). Наибольшей яркости петля достигла в момент 09:47 UT, начало поярчания в 09:45 UT (рис. 7, а). Из этого рисунка можно сделать вывод о неоднородности фотосферного поля лучевых скоростей с размерами в несколько десятков км, сохраняющих свою структуру в период от минимума до максимума всплесков. В начале цикла преобладает подъем фотосферного вещества. Только на уровне порядка 200 км отмечены близкие к нулю положительные скорости. В максимуме этого цикла наблюдаются нисходящие движения на всех уровнях.

Лучевые скорости в период поярчания в рентгене и H_{α} (09:51—09:53 UT) представлены на рис. 7, б. В момент 09:53 UT рентгеновское

Рис. 7. Распределение с высотой лучевых скоростей в фотосфере в петле Б. Штриховые линии — ход v_r в моменты, соответствующие минимумам интенсивности рентгеновского излучения в 09:45 UT (а) и 09:51 UT (б). Сплошные линии — ход v_r в моменты, соответствующие максимумам интенсивности рентгеновского излучения в 09:47 UT (а) и 09:53 UT (б)



излучение достигло наибольшего значения, а N_{α} -интенсивность петли была вдвое меньше, чем в 09:47 UT. Это может указывать на то, что источник возмущения к этому моменту сместился вдоль аркады. Вспышечная область в начале этого периода представляет собой чередование поднимающихся и опускающихся потоков. В максимуме поярчания доминируют нисходящие потоки. Исключением являются более высокие слои, где небольшой подъем наблюдался и в максимуме. Таким образом, ход лучевых скоростей с высотой свидетельствует о наличии неоднородностей. Вертикальная структура при этом сохраняется от начала до максимума поярчания петли. Возможно, это является проявлением спиральной структуры магнитной трубки. В обеих петлях в фотосферных слоях на ранней стадии поярчания преобладают восходящие движения, что может быть следствием волн, распространяющихся из подфотосферных слоев вдоль магнитной трубки. В работе [42] теоретически рассмотрено распространение продольно-поперечных волн в элементарной магнитной трубке в результате возмущения на уровне основания фотосферы. Показано, что продольная составляющая скорости в фотосфере увеличивается по мере перехода от основания фотосферы к области температурного минимума и меняет знак. Получены отрицательные скорости в нижних слоях и в области температурного минимума, а в средней части имеет место опускание вещества со скоростью порядка 1 км/с. Это согласуется с нашими результатами на начальной стадии всплеска и свидетельствует, что первичное возмущение может идти из основания фотосферы. Нисходящие потоки в максимумах циклов можно объяснить продвижением образовавшейся в процессе пересоединения в верхней атмосфере конденсации вглубь фотосферы.

ВЫВОДЫ

На основании анализа данных о магнитном поле и рентгеновском излучении, спектральных и фильтровых N_{α} -наблюдений можно сделать вывод, что вспышку 3 сентября 1990 г. следует рассматривать как последовательность элементарных вспышек вдоль аркады петель [1].

Ряд свойств N_{α} -петель, выявленных в настоящей работе, тождественны характеристикам SXR-петель, известным по многочисленным публикациям [24, 28, 32, 36, 45, 53, 54]. К ним, в частности, относятся: а) расположение системы N_{α} -петель вдоль границ супергранул; б) последовательное возбуждение петель в аркаде; в) практически одновременное усиление интенсив-

ности в рентгене, в вершине и основании H_{α} -петель; г) основания H_{α} -петель всегда ярче, чем вершины.

При исследовании поля скоростей на хромосферном и фотосферном уровнях в этой вспышке получены следующие выводы.

1. Поле скоростей во вспышечных петлях имеет сложную структуру. Характер поля скоростей в петлях А и Б существенно отличается. На хромосферном уровне в петле А на всем протяжении вспышки происходит подъем вещества, при этом скорости в основании были меньше по значению, чем в вершине. В петле Б преобладает опускание вещества, и только перед и во время максимума вспышки в 09:47 UT наблюдается подъем в верхней части петли со скоростью до 1 км/с. Максимальные скорости подъема вещества наблюдаются ближе к вершинам или в средней части петель.

2. В обеих петлях абсолютные значения скорости больше на стадии, предшествующей максимумам всплесков SXR- и H_{α} -интенсивности.

3. На трех фотосферных уровнях (190—210 км, 230—270 км и 345 км) изменения скорости по величине и знаку происходят синхронно и с меньшим периодом (1-2 мин), чем в хромосфере (3 мин).

4. Характер фотосферного поля скоростей соответствует теоретическим расчетам вертикальной составляющей скорости продольно-поперечной волны вдоль магнитной трубки [42].

5. В начале фазы рентгеновских всплесков восходящие движения отмечены в петлях как на хромосферном, так и фотосферном уровнях. Вблизи максимумов всплесков на всех уровнях преобладают нисходящие движения вещества.

6. Из распределения скоростей с высотой следует наличие в фотосфере неоднородностей с размерами в несколько десятков километров, сохраняющих свою структуру в период от минимума до максимума всплесков.

Расположение аркады вспышечных H_{α} -петель вдоль границ супергранул над нейтральной линией магнитного поля активной области указывает на связь процессов в хромосфере и фотосфере. В то же время синхронность поярчаний в рентгене и H_{α} -петлях есть следствие магнитных пересоединений в верхних слоях атмосферы АО. В начальной фазе рентгеновского всплеска и в максимуме могут действовать различные механизмы, приводящие к наблюдаемой картине движений на фотосферном и хромосферном уровнях.

Авторы выражают благодарность А. А. Рожило, предоставившему телевизионные H_{α} -изображения активной области, В. Г. Курт за помощь в получении данных GOES о рентгеновском излучении, В. Б. Юрчишину за возможность использования магнитографической карты исследуемой активной области из NSO Digital Library, В. Г. Парусимову за фотометрию спектрального материала, Е. В. Хоменко за помощь в оформлении работы.

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., Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э. и др. Горизонтальный солнечный телескоп АСУ-26 на Кавказе // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 6.—С. 65—74.
4. Аликаева К. В., Черногор С. Н. Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой солнечной вспышки. I. Лучевые скорости // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 6.—С. 541—551.

5. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: программа расчета спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛГР приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН Украина; Ин-т теор. физики; № 87Р).
6. Данилевський В. О., Єрьомін С. С., Рожило О. О. Інструментальне забезпечення спектральних спостережень активних областей на Сонці // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки.—1992.—Вип. 6.—С. 96—100.
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—318.
8. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Дисперсия волн в магнитоактивной плазме арочных структур с учетом субдрейсеровских электрических полей и сильной неоднородности плотности // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 3.—С. 258—272.
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. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
11. Чорногор С. Н., Аликаева К. В. Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой солнечной вспышки. II. Полуэмпирические фотосферные модели // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 2.—С. 113—120.
12. Allende Prieto C., Garcia Lopez R. J. A catalog of accurate wavelengths in the optical spectrum of the Sun // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1998.—131, N 2.—P. 431—433.
13. Aschwanden M. J. An evaluation of coronal heating models for active regions based on Yohkoh, SOHO, and TRACE observations // Astrophys. J.—2001.—560, N 3.—P. 1035—1044.
14. Aschwanden M. J., De Pontieu B., Schrijver C. J., Title A.M. Transverse oscillations in coronal loops observed with TRACE — II. Measurements of geometric and physical parameters // Solar Phys.—2002.—206, N 1.—P. 99—132.
15. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
16. Berne Solar Observations. — Switzerland, University of Berne, 1990.—Report № 58.
17. Canfield R. C., Hudson H. S., Leka K. D., et al. The X flare of 1991 November 15: Coordinated Mees / Yohkoh Observations // Publs Astron. Soc. Jap.—1992.—44, N 5.—P. L111—L115.
18. Canfield R. C., Hudson H. S., McKenzie D. E. Sigmoidal morphology and eruptive solar activity // Geophys. Res. Lett.—1999.—26, N 6.—P. 627—630.
19. Canfield R. C., Pevtsov A. H. Helicity of solar active-region magnetic fields // Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.—1998.—140.—P. 131—143.
20. Cargill P. G., Priest E. R. Heating of postflare loops // Astrophys. J.—1983.—266, N 1.—P. 383—389.
21. Chen P. F., Fang C., Ding M. D., Tang Y. H. Flaring loop motions and unified model for solar flares // Astrophys. J.—1999.—520, N 2.—P. 853—858.
22. Chen P. F., Fang C., Tang Y. H., Ding M. D. Simulation of magnetic reconnection with heat conduction // Astrophys. J.—1999.—513, N 1.—P. 516—523.
23. Cliver E. W. Solar flare nomenclature // Solar Phys.—1995.—157, N 1-2.—P. 285—293.
24. Culhane J. L., Phillips A. T., Kosugi T., et al. Energy transport mechanisms and the event of 16th December 1991 // Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroshima. — Nagano, Japan, 1994.—P. 117—121.
25. Golovko A. A., Kuklin G. V., Mordvinov A. V., Tomozov V. M. The role of large-scale velocity fields in producing a preflare situation // Solar Maximum Analysis. Add. Issue / Eds V. E. Stepanov, V. N. Obridko, G. Ya. Smolkov. — 1988.—P. 278—290.
26. Heyvaerts J., Priest E. R., Rust D. M. An emerging flux model for the solar flare phenomena // Astrophys. J.—1977.—216, N 1.—P. 123—137.
27. Holweger H., Müller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys.—1974.—39, N 1.—P. 19—30.
28. Inada-Koide M., Makishima T., Kosugi T., Kaneda H. Quantative evolution of the solar flare morphology in hard X-rays using the Yohkoh HXT // Publs Astron. Soc. Jap.—1995.—47, N 5.—P. 661—676.
29. Kitai R., Kurokawa H., Funakoshi Y., et al. Flares on September 6, 1992 // Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroshima. — Nagano, Japan, 1994.—P. 147—150.
30. Korobova Z. B., Mogilevsky E. I. Spiral patterns in flare-active regions on the Sun // Solar Maximum Analysis. Add. Issue. — Novosibirsk: Nauka, 1988.—P. 124—132.
31. Kryshchal A. N., Kucherenko V. P. Ion-acoustic instability caused by large-scale electric field in solar active regions // Solar Phys.—1996.—165, N 1.—P. 139—153.
32. Kurokawa H., Takakura T., Ohki K. Close relationship between H_{α} and hard X-ray emissions at the impulsive phase of a solar flare // Publs Astron. Soc. Jap.—1988.—40, N 3.—P. 357—367.

33. *Litvinenko Yu. E.* Photospheric magnetic reconnection and cancelling magnetic features on the Sun // *Astrophys. J.*—1999.—**515**, N 1.—P. 435—440.
34. *Masuda S.* Vertical structure of hard X-ray sources in solar flares // *Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroyama.* — Nagano, Japan, 1994.—P. 209—212.
35. *Masuda S., Kosugi T., Hara H., et al.* A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // *Nature.*—1994.—**371**, N 6497.—P. 495—497.
36. *Masuda S., Kosugi T., Hara H., et al.* Hard X-ray sources and the primary energy-release site // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1995.—**47**, N 5.—P. 677—689.
37. *McKenzie D. E., Hudson H. S.* X-ray observations of motions and structure above a solar arcade. // *Astrophys. J.*—1999.—**519**, N 1.—P. L93—L96.
38. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards., 1966.—349 p.
39. *Nakajima H., Enome S. E., K. Shibasaki, et al.* Morphological development of gradual nonthermal microwave flares // *Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroyama.* — Nagano, Japan, 1994.—P. 185—189.
40. *Ohman Y.* On some spectrographic observations related to the structure with height of active regions and particularly solar flares // *Structure and development of solar active regions. Symp. N 35. / Ed. K. O. Kiepenheuer.* —Dordrecht-Holland, 1968.—P. 240—246.
41. *Ohyama M., Shibata K.* Preflare heating and mass motion in a solar flare associated with hot plasma ejection: 1993 November 11 C9.7 flare // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1997.—**49**, N 2.—P. 249—261.
42. *Osin A., Volin S., Ulmschneider P.* Propagation of nonlinear longitudinal-transverse waves along magnetic flux tubes in the solar atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**, N 1.—P. 359—367.
43. *Pallavicini R., Serio S., Vaiana G. S.* A survey of soft X-ray limb flare images: the relation between their structure in the corona and other physical parameters // *Astrophys. J.*—1977.—**216**, N 1.—P. 108—122.
44. *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak Contrib.*—1972.—N 559.
45. *Priest E. R.* Solar flare theory and the status of flare understanding // *High Energy Solar Physics Workshop: Anticipating HESSI ASP Conference Series / Eds R. Ramaty, N. Mandzhavidze.* — 2000.—**206**. —P. 13—26.
46. *Sakao T., Kosugi T., Masuda S., et al.* Hard X-ray imaging observations of footpoint sources in impulsive solar flares // *Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroyama.* — Nagano, Japan, 1994.—P. 169—172.
47. *Schrijver C. J., Aschwanden M. J., Title A. M.* Transverse oscillations in coronal loops observed with TRACE—I. An Overview of Events, Movies, and a Discussion of Common Properties and Required Conditions // *Solar Phys.*—2002.—**206**, N 1.—P. 69—98.
48. *Shibata K., Masuda S., Shinojo M., et al.* Hot-plasma ejections associated with compact-loop solar flares // *Astrophys. J.*—1995.—**451**, N 2.—P. L83—L85.
49. *Tomczak M.* The analysis of hard X-ray radiation of flares with occulted footpoints // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**366**, N 1.—P. 294—305.
50. *Tsuneta S., Hara H., Shimizu T., et al.* Observation of a solar flare at the limb with the Yohkoh soft X-ray telescope // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1992.—**44**, N 5.—L63—69.
51. *Wentzel D. G.* On the role of hydromagnetic waves in the corona and the base of the solar wind. // *Solar Phys.*—1977.—**52**, N 1.—P. 163—177.
52. *Wülser J.-P., Canfield R. C., Acton L., et al.* Multispectral observations of chromospheric evaporation in the 1991 November 15 x-class solar flare // *Astrophys. J.*—1994.—**424**, N 1.—P. 459—465.
53. *Wülser J.-P., Canfield R. C., Sakao T., et al.* H α and X-ray signatures of chromospheric heating observed in solar flares // *Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroyama.* —Nagano, Japan, 1994.—P. 195—198.
54. *Yaji K., Kosugi T., Sakao T., et al.* A comparison of hard X-ray, soft X-ray, and microwave sources in solar flares // *Proc. of Kofu Symp., NRO Report N 360 / Eds E. Enome, T. Hiroyama.* — Nagano, Japan, 1994.—P. 143—146.

Поступила в редакцию 01.07.03