

УДК 523.985.3

Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой солнечной вспышки. I. Лучевые скорости

К. В. Аликаева, С. Н. Черногор

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

Исследование поля скоростей на фотосферном и хромосферном уровнях в процессе развития вспышки может служить экспериментальной основой для построения и тестирования теоретических моделей. Такие исследования сделаны на основе спектральных наблюдений хромосферной линии H_{α} и фраунгоферовых линий в области вспышки 2 августа 1990 г. Определены скорости в различных частях вспышечной H_{α} -петли. Подъем вещества в хромосфере со скоростями до 10 км/с зафиксирован только в импульсной фазе и только в вершине петли. В течение одной минуты скорость уменьшается и в максимуме H_{α} изменяет направление. В основании вспышечной петли наблюдались только движения вещества вниз на уровнях как хромосферы, так и фотосферы на всех стадиях развития вспышки. Скорости уменьшаются от 23 км/с в хромосфере до 0.7 км/с в средней фотосфере. Максимальная скорость в фотосфере наблюдалась на внешней границе основания вспышечной петли. Полученные свойства поля лучевых скоростей свидетельствуют в пользу магнитного пересоединения в верхних слоях солнечной атмосферы.

СТАН ХРОМОСФЕРНОЇ ТА ФОТОСФЕРНОЇ РЕЧОВИНИ СЛАБКОГО СОНЯЧНОГО СПАЛАХУ. I. ПРОМЕНЕВІ ШВИДКОСТІ, Алікаєва К. В., Черногор С. М. — Дослідження поля швидкостей на фотосферному та хромосферному рівнях в процесі розвитку спалаху може служити експериментальною основою для побудови і тестування теоретичних моделей. Такі дослідження зроблено на основі спектральних спостережень хромосферної лінії H_{α} та фраунгоферових ліній в області спалаху 2 серпня 1990 р. Визначено швидкості в різних частинах спалахової H_{α} -петлі. Підйом речовини в хромосфері зі швидкостями до 10 км/с зафіксовано лише в імпульсній фазі і лише у вершині петлі. Протягом однієї хвилини швидкість зменшується і в максимумі H_{α} змінює напрям. У підніжжі спалахової петлі спостерігалися лише рухи речовини вниз на рівнях як хромосфери, так і фотосфери на всіх стадіях розвитку спалаху. Швидкості зменшуються від 23 км/с в хромосфері до 0.7 км/с в середній фотосфері. Максимальна швидкість в фотосфері спостерігалася на зовнішній межі підніжжя спалахової петлі. Отримані властивості поля променевих швидкостей свідчать на користь магнітного перез'єднання у верхніх шарах сонячної атмосфери.

STATE OF THE CHROMOSPHERIC AND PHOTOSPHERIC MATERIAL OF A SOLAR SUBFLARE. I. LINE-OF-SIGHT VELOCITIES, by Alikaeva K. V., Chornogor S. N. — The investigation of the velocities field at the chromospheric and photospheric levels in the course of flare development may be an experimental test of the existing theoretical flare models. To study the velocity field in a flare, we used the chromospheric H_{α} line and some Fraunhofer lines formed at different levels in the photosphere. The spectra were obtained at Terskol Peak. The observations allowed us determine the velocities in different parts of the H_{α} flare loop. The blue shift of the H_{α} line was recorded only at the impulsive phase and only at the top of the loop. The velocities decrease during one minute and their sign changes at the H_{α} maximum. Positive line-of-sight velocities were found both in the photosphere and the chromosphere at the footpoints of a flaring loop. The velocities drop from 23 km/s in the chromosphere to 0.7 km/s in the middle photosphere. The maximum velocities refer to the outer edge of the footpoints of the flaring loop.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поля скоростей вспышечной области по наблюдениям в широком спектральном диапазоне дает возможность проверить реальность механизмов переноса вспышечной энергии. Исследования последних двух десятилетий свидетельствуют, что спектральные свойства хромосферного излучения вспышек в значительной мере зависят от свойств потоков нетепловых электронов. Форма профилей линий, образующихся в низкотемпературной части атмосферы, доплеровские сдвиги, асимметрия и другие характеристики дают информацию: а) о свойствах потоков нетепловых электронов, б) о механизме переноса энергии вспышки от места первичного ее освобождения в нижние слои атмосферы, в) о динамических процессах в нижних слоях вспышечной атмосферы [9, 13, 14, 22 и др.].

Согласно результатам численного моделирования гидродинамического отклика вспышечной хромосферы на вторжение нетепловых электронов [15] направление и величина скорости движения хромосферного вещества существенно зависят от характеристики потоков электронов с энергией больше 20 кэВ. Если энергия потока F_{20} не превосходит $10^3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, то хромосфера нагревается до умеренных температур, в результате чего имеет место баланс между нагревом и радиационными потерями. Устанавливается режим умеренного (gentle) испарения хромосферного вещества. В этом случае в импульсной фазе должны наблюдаться восходящие движения со скоростями до 30 км/с. В линии H_{α} для этого типа испарения характерно отсутствие широких штарковских крыльев, наличие самопоглощения в ядре линии. Форма профилей H_{α} свидетельствует об увеличении скорости вглубь хромосферы [9, 45]. По оценке [45] во вспышке такого типа доминирует нагрев хромосферы потоками тепла. Время запаздывания H_{α} -максимума относительно максимума в жестком рентгене составляет 2 мин, что соответствует скорости распространения фронта теплопроводности.

При больших потоках ускоренных электронов ($F_{20} > 5 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) дисбаланс между поступлением энергии в хромосферу и радиационными потерями приводит к быстрому нагреву хромосферы до корональных температур и резкому подъему горячего газа, наблюдаемому по синему смещению линий в мягком рентгене («взрывное» испарение). Этот процесс сопровождается образованием относительно холодной и плотной конденсации, движущейся вниз со скоростями, достигающими 100 км/с. Следствием этого является наблюдаемая красная асимметрия и сдвиг в длинноволновую сторону спектра линий, образующихся в хромосфере. Согласно с выводами

работы [14] время жизни хромосферной конденсации зависит не от механизма нагрева хромосферы (потоками ускоренных электронов или тепла), а от предвспышечного давления в хромосфере. Время жизни такой конденсации — около 1 мин. Во вспышках этого типа нагрев хромосферы осуществляется проникающими в нее высокоэнергетичными частицами. Запаздывание максимума H_{α} -излучения относительно максимумов всплесков жесткого рентгена и микроволнового излучения мало. В [45] для такой вспышки оно составило 20 с, а в работе [27] — 1 с. Профили H_{α} — одновершинные, без видимого самопоглощения в ядре, с широкими (шире 25 нм) крыльями [8, 9, 40, 45]. Эмпирическая зависимость ширины линии H_{α} от параметров жесткого рентгеновского и микроволнового излучения установлена Нейдигом [32].

Наименее изученным остается вопрос о синих сдвигах и асимметрии хромосферных линий и фотосферном поле скоростей во время вспышек, а имеющиеся сведения о них часто противоречивы. Характер сдвигов и асимметрии спектральных линий может изменяться в процессе развития вспышки и отличаться для различных деталей вспышечных структур (основания или вершины арок, ленты, яркие точки).

Статистика свидетельствует, что в хромосфере в импульсной фазе вспышек преобладает красная асимметрия [40, 41, 43], которая исчезает после максимума H_{α} -излучения вспышек. Вспышечные ядра с синей и красной асимметрией не совпадают по положению [9, 40—43]. Относительно редкие случаи обнаружения синего смещения и асимметрии линии H_{α} относятся к самому началу импульсной фазы вспышки [19]. Так, в работе [37] на стадии, непосредственно предшествующей импульсной фазе трех вспышек, зарегистрировано смещение H_{α} в коротковолновую сторону, соответствующее поднимающимся потокам хромосферного вещества во вспышечных лентах со скоростями 0.5—10 км/с. Значительно большая скорость подъема хромосферного вещества (до 50 км/с) отмечена по сдвигу ядра линии H_{α} в обеих вспышечных лентах мощной вспышки [6] в начале импульсной фазы. Примечательно, что подъем с небольшой скоростью наблюдался уже за 25 мин до начала вспышки. В начальной стадии в обеих вспышечных лентах наблюдалось усиление синего крыла и синего пика двухвершинных профилей H_{α} . Таким образом, восходящие движения преобладали на хромосферном и фотосферном уровнях.

Трансформация профилей в импульсной фазе проявилась в постепенном усилении красного крыла при более интенсивном синем пике, после чего произошла быстрая (менее 1 мин) смена знака асимметрии. Смена знака асимметрии линии H_{α} произошла вблизи локальных максимумов H_{α} интенсивности. Аналогичный вывод о подъеме вещества в начале импульсной фазы и быстром изменении знака скорости вблизи H_{α} -максимума вспышек сделан в работах [26, 30] по наблюдениям с H_{α} -фильтром со смещением полосы пропускания. О синей асимметрии линии на ранней стадии импульсной фазы и резком переходе от синей асимметрии к красной перед максимумом в жестком рентгене сообщается в [40] по наблюдениям вспышки с высоким временным разрешением.

Красную асимметрию и сдвиг хромосферных линий в ряде работ [9, 14, 15, 17, 35, 45] однозначно связывают с движущейся вниз «холодной» хромосферной конденсацией. В указанных работах, кроме [35], предполагается постоянство скорости внутри зоны конденсации. Более подробно вопрос о красной асимметрии в максимуме H_{α} -излучения исследовался в работе [12] с привлечением набора хромосферных линий. Установлено, что

сильная красная асимметрия нескольких линий бальмеровской серии водорода и линии Ca II K наблюдается в основаниях петельных структур. Соответствующие скорости опускания вещества уменьшаются по мере уменьшения высоты образования линий. На этом основании сделан вывод о наличии градиента скоростей в зоне конденсации, что должно учитываться при создании гидродинамических моделей вспышек. В узле вспышки, отождествляемом с вершиной петли, красная асимметрия в линиях водорода и ионизованного кальция незначительна.

Детальное исследование хромосферно-фотосферного поля скоростей во время малой вспышки с высоким пространственным и временным разрешением выполнено в [10]. Синие сдвиги и асимметрия в хромосферных линиях (H Ca I, H δ) и линий, формирующихся в верхней фотосфере и области температурного минимума, наблюдались за 40 с до начала всплеска в жестком рентгене, а затем и в его начальной стадии. Это свидетельствует о подъеме вещества в широком интервале высот. Через 5 с после HXR-максимума видны красная асимметрия хромосферных линий и небольшие красные сдвиги в фотосферных линиях. По мнению авторов, движения вверх могут быть связаны с выбросами вещества или подъемом петли.

К сожалению, сведения о поле скоростей в фотосфере в связи со вспышками малочисленны. Основные выводы относительно фотосферного поля скоростей можно сформулировать так.

1. Вспышки локализуются вблизи границ крупномасштабных (порядка 10^4 км) структурных элементов с противоположно направленными движениями или в области восходящих движений [5, 18, 46].

2. Увеличение скорости восходящих движений вещества в средней и верхней фотосфере перед вспышками отмечены в работах [4, 5] (за 2-3 ч до вспышки), [36] (за 25 мин), [10] (за 40 с).

3. В импульсной фазе преобладает подъем вещества [4, 5, 10, 18].

4. Около максимума вспышки наблюдалось движение фотосферного вещества вниз [4, 5, 10, 23] со скоростями 1—3 км/с. Впоследствии скорость уменьшается и изменяется ее направление.

Можно сделать вывод, что явление вспышки сопровождается подъемом вещества в импульсной фазе на всех уровнях от фотосферы до короны. В фотосфере восходящие движения начинаются раньше, чем в более высоких слоях, еще на предвспышечной стадии. В низкотемпературной части вспышки направление движения меняется вблизи максимума импульсной фазы, тогда как в высокотемпературной части движение плазмы вверх может продолжаться и после максимума. Ко всем ли вспышкам и к каким элементам вспышечных структур относится это утверждение, пока однозначного ответа дать нельзя.

В работах по численному моделированию процессов в импульсной стадии вспышек не рассматривается участие фотосферных слоев в общем вспышечном процессе. Реальные модели вспышек должны основываться на комплексе наблюдений, которые охватывают: а) различные структурные элементы (вершины вспышечных петель, их основания, вспышечные ленты, межленточное пространство); б) все уровни вспышечной атмосферы от короны до основания фотосферы; в) все стадии развития вспышки, включая предвспышечную.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Настоящая работа посвящена изучению поля скоростей на фотосферном и хромосферном уровнях в различных частях вспышечной H α -петли слабой вспышки sf/c5 2 августа 1990 г. (начало — 05^h45^m UT, максимум — 05^h49^m

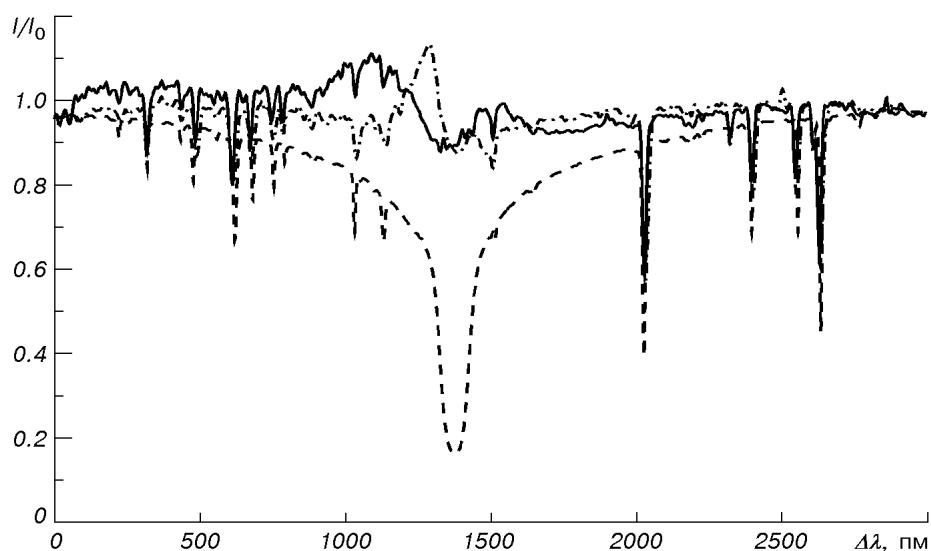


Рис. 1. Профили H_{α} ($05^{\text{h}}50^{\text{m}}13^{\text{s}}$ UT): сплошная линия соответствует двухвершинному профилю вблизи основания петли, штрих-пунктирная — верхней части вспышечной петли, штриховая — профиль для невозмущенной атмосферы

UT, конец — $06^{\text{h}}03^{\text{m}}$ UT). Спектральные наблюдения выполнены на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-26 ВНБ Терскол Главной астрономической обсерватории НАНУ [1] и охватывают период от H_{α} -максимума до окончания вспышки ($05^{\text{h}}50^{\text{m}}13^{\text{s}}$ UT— $06^{\text{h}}01^{\text{m}}02^{\text{s}}$ UT). Кроме того, получен спектр в области будущей вспышки за 14 мин до ее начала ($05^{\text{h}}31^{\text{m}}05^{\text{s}}$ UT). Одновременно H_{α} -изображения наблюдавшейся активной области регистрировались с помощью телевизионной аппаратуры. Вспышка была видна в виде нескольких небольших H_{α} -петель вблизи пятна-лидера. Эти петли развивались несинхронно. Расстояние между основаниями петель составляло 17500 км. На щель спектрографа попадали восточные ветви двух петель, включая области вблизи их вершин и одного из оснований.

Фотометрия выполнена на двухкоординатном микрофотометре [3] с шагом вдоль щели спектрографа, соответствующем $2.3''$ на Солнце. Линия H_{α} фотометрировалась с шагом 1 пм, а фраунгоферовы линии — с шагом 0.5 пм. Полученные серии профилей H_{α} для отдельных моментов времени свидетельствуют о различии формы профилей вдоль петли (рис. 1). На спектрограммах отчетливо видно, что вспышечные узлы с эмиссией в ядре линии H_{α} соседствуют с узлами с эмиссией типа «усов». Эмиссия в ядре H_{α} , геометрически соответствующая верхней части вспышечной петли, трансформируется в профили с центральным поглощением у основания петли.

О сосуществовании профилей двух типов во вспышечных областях сообщается в работах [39, 40]. В работе [25] отмечено пространственное совпадение усов с факельными деталями, т. е. с магнитными элементами, а геометрическая форма усов позволяет отождествить их с элементарными магнитными трубками. Установлено, что H_{α} -эмиссия усов формируется в более глубоких слоях атмосферы, чем вспышечные узлы, а именно, в нижней хромосфере [20, 24] или в фотосфере [11, 38].

Наблюдения вспышки 2 августа 1990 г. дают основания считать, что «усы» и вспышечные узлы, дающие одновершинные эмиссионные профили

H_{α} , есть проявления петельной структуры вспышки. Форма H_{α} -профилей зависит от того, пересекает щель спектрографа верхушку петли, ее подножье или вспышечные ленты.

В процессе развития вспышки профили H_{α} претерпевают изменения. И у одновершинных, и у двухвершинных профилей уменьшается протяженность крыльев. Через 5 мин после максимума двухвершинные профили видны в поглощении. А перед концом вспышки наблюдаются наклонные спектры, что согласно [33] свидетельствует о вращательных движениях вещества.

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ В H_{α} -ПЕТЛЕ

Спектральными проявлениями движений вещества в хромосфере и фотосфере являются сдвиги и асимметрия эмиссионных (H_{α} и других) линий, ядра которых формируются в хромосфере и области температурного минимума, и фраунгоферовых линий, образующихся на разных высотах в фотосфере. Сдвиги линий однозначно свидетельствуют о направлении и величине лучевой скорости на уровне образования центральной интенсивности линии. Возможная интерпретация асимметрии линий не столь определена.

В работе [17] убедительно показано, что на основе полуэмпирического моделирования движущейся вниз вспышечной конденсации можно воспроизвести как синюю, так и красную асимметрию линии H_{α} . Поэтому мы ограничимся определением лучевых скоростей только по смещению линий. Лучевые скорости находились по отношению к нескольким близлежащим теллурическим линиям, и бралось их среднее значение. Средняя квадратичная ошибка определения скорости по линии H_{α} составила 300 м/с, а по фраунгоферовым линиям в фотосфере — 100 м/с. Лучевые скорости были определены для различных моментов развития вспышки и различных

фотометрических сечений с учетом поправки за вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

Хромосферная часть. В хромосфере лучевые скорости определялись по смещению линии H_{α} и приведены на рис. 2 (*a* — импульсная фаза, *б* — стадия затухания). Для сравнения штрих-пунктирной линией показаны скорости на предвспышечной стадии (за 14 мин до начала вспышки). В отличие от работы [10] подъем вещества перед вспыш-

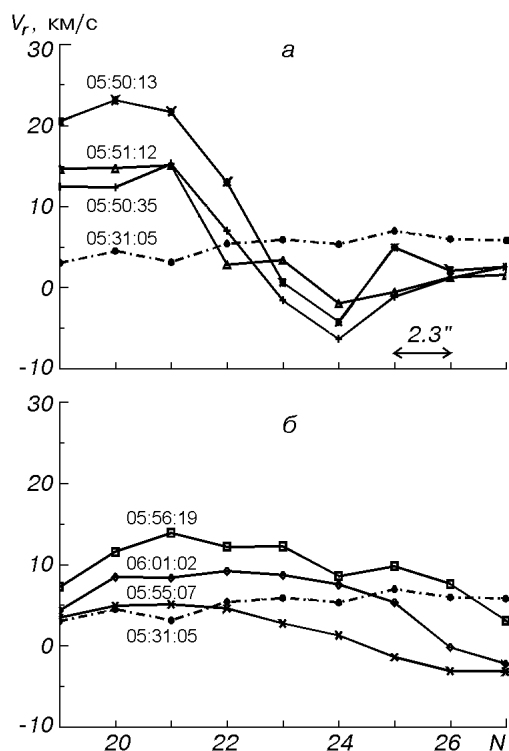


Рис. 2. Лучевые скорости V_r в хромосфере в области вспышки для разных моментов времени и фотометрических сечений N : *a* — импульсная фаза, *б* — стадия затухания. Штрих-пунктирная линия соответствует предвспышечному моменту

кой не выявлен. Возможно, подъем вещества в хромосфере начинается непосредственно перед импульсной фазой (в [10] за 40 с до начала всплеска жесткого рентгеновского излучения).

Фотометрическое сечение 24 соответствует верхней части петли, а сечения 20 и 21 — ее основанию.

Как видно из рис. 2, *a*, в импульсной фазе восходящие движения со скоростями до 6.3 км/с наблюдаются только в вершине петли, и эти скорости убывают в течение одной минуты. Природа синего смещения H_{α} в импульсной фазе пока не получила своего объяснения. В работе [9] высказываются несколько предположений о механизме синего смещения. В нашем случае наиболее вероятным представляется объяснение, что синее смещение H_{α} -линии в импульсной фазе связано с подъемом петли. Это предположение находит подтверждение при рассмотрении H_{α} -изображений вспышки. На спектрограмме, полученной в максимуме импульсной фазы, зафиксирован выброс вещества со скоростью около 500 км/с.

В вершине петли на стадии спада интенсивности в H_{α} наблюдаются только положительные скорости, не превышающие 10 км/с. В основании петли за все время наблюдения вспышки скорости положительные. Максимального значения 23 км/с скорости достигают в максимуме H_{α} на внешней границе основания. Это согласуется с выводами работ [12, 13]. Кроме того, в [48] замечены кратковременные усиления яркости в непрерывном спектре в малых (около 1") элементах у границ основания петель. Интересные выводы получены в работе [9]. Авторы сопоставили данные о мягком рентгеновском излучении, полученном на КА «Yohkoh», с наблюдениями в крыле линии H_{α} . Показано, что места, где наблюдался красный избыток в крыле линии H_{α} , совпадают с основаниями петли, видимой в мягком рентгене, но не с вершиной петли. Такой характер нисходящих движений может служить косвенным свидетельством процесса магнитного пересоединения, как это следует из работ [13, 16]. Поскольку в наблюдавшейся нами слабой вспышке скорости не превосходят 30 км/с, можно предположить, что в данном случае энергия потока ускоренных частиц не превышала $10^3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [15].

Фотосферная часть. Для определения лучевых скоростей в фотосфере были выбраны фраунгоферовы линии, которые охватывают верхний и средний слои фотосферы и свободны от влияния далеких крыльев H_{α} . В таблице приведены характеристики исследуемых линий: длина волны и элемент из [34], потенциал возбуждения нижнего уровня [31], эффективный фактор Ланде [7] и высоты образования линий, рассчитанные по модели HOLMU [21] по программе SPANSAT [2] для $\cos\theta = 0.512$. В случае вспышки эти высоты должны быть меньше, так как согласно результатам моделирования [29] область температурного минимума смещается вглубь

Характеристики фраунгоферовых линий

λ , нм	Элемент	$h\nu_{\text{ниж}}$, эВ	$g_{\text{эф}}$	$h_{\text{д}}$, км
654.2479	Fe I	2.75	0.83	435
655.2315	Ti I	1.44	1.08 τ	238
655.4652	Si I	5.94	1.00	209
655.0707	Ti I	1.45	1.25 τ	246
655.7953	Fe I	4.77	0.50	203
657.7842	Ca I	0.00	1.50 τ	274
657.2325	Fe I	0.99	1.25	287

Примечание: τ — нормальный зеemanовский триплет

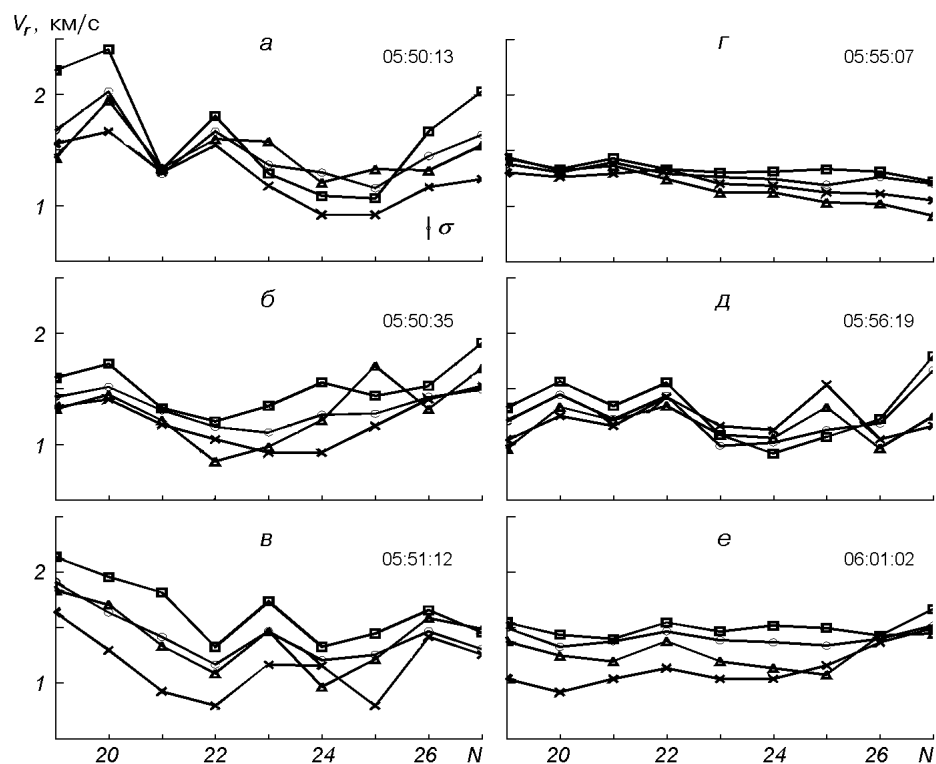


Рис. 3. Лучевые скорости на разных высотах в фотосфере для разных моментов времени и фотометрических сечений; σ — средняя квадратичная ошибка. Квадратики — высота 435 км, кружки — 280 км, треугольники — 240 км, крестики — 205 км

атмосферы на несколько сотен километров относительно невозмущенной атмосферы.

На рис. 3 для различных моментов времени представлены лучевые скорости на разных высотах в фотосфере. Значения скорости для линий, формирующихся на близких высотах, мало различались (в пределах ошибки определения). Поэтому на рис. 3 приведены их средние значения. Все скорости оказались положительными, что свидетельствует о нисходящих движениях вещества в фотосфере. В основании петли отчетливо видна высотная зависимость лучевой скорости: с уменьшением высоты слоя, где формируются ядра линий, скорости уменьшаются. Максимальные скорости, как и в хромосфере, получены на внешней границе основания петли. В той части фотосферы, на которую проектируется вершина вспышечной петли, значения и высотный градиент скорости меньше, чем в основании. На всех высотах пространственные вариации скорости носят одинаковый характер. Через 5 мин после максимума скорости становятся однородными и близкими по значению для всех высот.

На рис. 4 представлены временные зависимости хромосферных и фотосферных скоростей соответственно для основания петли и вершины. Наиболее резкие изменения скорости как в хромосфере, так и в фотосфере произошли в импульсной фазе синхронно на всех уровнях. Уменьшение скорости в основании петли вглубь вспышечной атмосферы от 23 км/с в хромосфере до 0.7 км/с в средней фотосфере может указывать на то, что возбуждающий агент распространяется сверху. Это свидетельствует в пользу магнитного пересоединения в верхних слоях вспышечной атмосферы.

Рис. 4. Временные вариации лучевой скорости: *a* — в хромосфере (сплошная линия — в основании петли, штриховая — на вершине петли); *b* — на разных высотах в фотосфере (квадратики — 435 км, кружки — 280 км, треугольники — 240 км, крестики — 205 км)

ВЫВОДЫ

В работе исследовано поле лучевых скоростей во вспышечной H_{α} -петле, возникшей в малой вспышке 2 августа 1990 г. Получены следующие выводы.

1. Форма профилей линии H_{α} зависит от того, какую деталь пересекает щель спектрографа: вершину вспышечной петли (одновершинные профили), или ее основание (профили с поглощением в ядре линии).

2. За 14 мин перед вспышкой во всех частях вспышечной петли обнаружено опускание вещества.

3. Восходящие движения хромосферного вещества со скоростью -6.3 км/с обнаружены только в максимуме импульсной фазы и только в вершине петли. Эти движения связаны с подъемом петли.

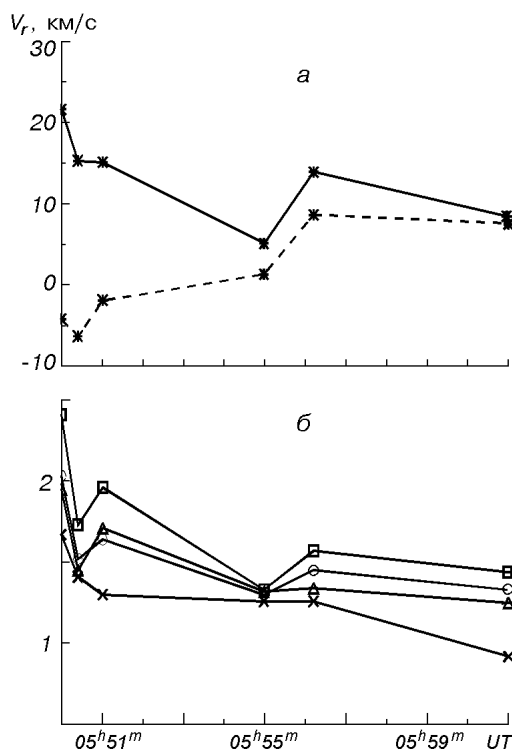
4. Сразу же после максимума происходит смена знака лучевой скорости в вершине петли, что свидетельствует о прекращении подъема петли.

5. В основании петли наблюдалось только нисходящее движение вещества в хромосфере и фотосфере на всех стадиях развития вспышки.

6. Скорость опускания вещества в импульсной фазе изменялась с высотой от 23 км/с в хромосфере до 0.7 км/с в средней фотосфере.

7. Изменения скорости в хромосфере и фотосфере происходят синхронно.

Описанные в статье свойства поля лучевых скоростей свидетельствуют в пользу моделей магнитного пересоединения. Наиболее реальными для нашего случая представляются модели, предполагающие слабые пересоединения мелкомасштабных магнитных структур на фотосферном уровне. Они рассматриваются как фактор, приводящий к быстрым взрывным пересоединениям на корональном уровне [28, 47]. В частности, в работе [47] на основании анализа магнитограмм показано, что первичное пересоединение могло иметь место в нижней атмосфере вблизи нейтральной магнитной линии при условии большого шира. Это привело к резкому подъему части силовых линий, их вторжению в область крупномасштабного поля в короне и пересоединению, приводящему к вспышке. Об аналогичном процессе сообщается в работе [44] по наблюдениям лимбовой вспышки на КА «Yohkoh» в мягком рентгене. За несколько часов до вспышки существовала большая шлемообразная петля. Затем вблизи одного из ее оснований появилась небольшая яркая петля. Обе петли поднимались со скоростями 30 и 10 км/с. За несколько минут до начала вспышки малая петля резко ускорилась подъем, в результате чего петли пришли в соприкосновение. Это



послужило триггером для мощной вспышки. Наблюдаемый нами подъем верхушки H_{α} -петли в импульсной фазе вспышки, возможно, связан с первичными процессами в фотосфере, а нисходящие потоки в главной фазе — следствие движущейся вниз конденсации или волн, образующихся в результате магнитного пересоединения в верхней атмосфере.

Авторы признательны В. Г. Парусимову и Т. Б. Дудник за выполненную фотометрию пластинок.

1. Аликаева К. В., Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э. и др. Горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-26 на Кавказе // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 6.—С. 65—74.
2. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: программа расчета спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН Украины, Ин-т теор. физики; № 87Р).
3. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
4. Редюк Т. И. Движение вещества в фотосфере в связи со вспышкой // Солнеч. данные.—1985.—№ 11.—С. 87—94.
5. Редюк Т. И. Движение вещества на уровне фотосферы во вспышечно-активных областях // Вестн. Киев. ун-та. Сер. Астрономия.—1990.—32.—С. 28—35.
6. Alikaeva K. V., Baranovsky E. A., Polupan P. N. Variation in physical conditions of the material in the course of the flare of May 16, 1981 // Solar Maximum Analysis: Additional Issue: Proc. Intern. Workshop, Irkutsk. — Novosibirsk: Nauka, 1988.—P. 84—87.
7. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
8. Canfield R. C., Hudson H. S., Leka K. D., et al. The X flare of 1991 November 15: coordinated Mees/Yohkoh observations // Publ. Astron. Soc. Japan.—1992.—44, N 5.—P. 111—115.
9. Canfield R. C., Kiplinger A. L., Penn M. J., Wulser J. P. H_{α} -spectra of dynamic chromospheric processes in five well-observed X-ray flares // Astrophys. J.—1990.—363, N 1.—P. 318—325.
10. Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A. Coordinated observations of solar activity phenomena. II. The velocity field pattern in an elementary flare // Astron. and Astrophys.—1996.—306.—P. 625—637.
11. Engvold O., Maltby P. A spectroscopic study of the H_{α} profile of moustaches // Mass motions in solar flares and related phenomena / Ed. by Y. Ohman. — Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1968.—P. 109—116.
12. Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A. Analysis of the optical spectra of the solar flares. VI. Velocity field in the 13 June 1980 flare area // Astron. and Astrophys.—1992.—256, N 1.—P. 255—263.
13. Falchi A., Qiu J., Cauzzi G. Chromospheric evidence for magnetic reconnection // Astron. and Astrophys.—1997.—328.—P. 371—380.
14. Fisher G. H. Dynamics of flare-driven chromospheric condensation // Astrophys. J.—1989.—346, N 2.—P. 1019—1029.
15. Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N. Flare loop radiative hydrodynamics // Astrophys. J.—1985.—289.—P. 414—441.
16. Forbes T. G., Acton L. W. Reconnection and field line strinkage in solar flares // Astrophys. J.—1996.—459, N 1.—P. 330—341.
17. Gan W. Q., Rieger E., Fang C. Semiempirical flare models with chromospheric condensation // Astrophys. J.—1993.—416, N 2.—P. 886—892.
18. Harvey K. L., Harvey J. W. A study of the magnetic and velocity fields in an active region // Solar Phys.—1976.—47, N 1.—P. 233—244.
19. Heinzel P., Karlicky M., Švestka Z. On the occurrence of blue asymmetry in chromospheric flare spectra // Solar Phys.—1994.—152, N 2.—P. 393—408.
20. Henoux J.-C., Fang C., Duing M. D. A possible mechanism for the H_{α} broad wings emission of Ellerman bombs // Astron. and Astrophys.—1998.—337, N 1.—P. 294—298.
21. Holweger H., Muller 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.
22. Ichimoto K., Kurokawa H. H_{α} red asymmetry of solar flares // Solar Phys.—1984.—93, N 1.—P. 105—121.
23. Janssen T. J., White K. P. Description of mass motions and brightness in a class 2b flare, August 8, 1968 // Solar Phys.—1970.—11, N 2.—P. 299—309.
24. Kitai R. On the mass motions and the atmospheric states of moustaches // Solar Phys.—1983.—87, N 1.—P. 135—154.

25. *Kitai R., Muller R.* On the relation between chromospheric and photospheric fine structure in an active region // *Solar Phys.*—1984.—**90**, N 2.—P. 303—314.
26. *Krivsky L., Merkulev V. E., Palamarchuk L. E., Polyakov V. I.* Some characteristics of the development and emissions of May 13, 1981 flare // *Bull. Astron. Inst. Czech.*—1989.—**40**, N 3.—P. 165—170.
27. *Kurokawa H., Takakura T., Ohki K.* Close relationship between H_{α} and hard X-ray emissions at the impulsive phase of solar flare // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1988.—**40**, N 3.—P. 357—367.
28. *Litvinenko Yu. E.* Photospheric magnetic reconnection and cancelling magnetic features on the Sun // *Astrophys. J.*—1999.—**515**.—P. 435—440.
29. *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.
30. *Merkulev V. E., Palamarchuk L. B., Polyakov V. I.* Phase-coherence of chromospheric oscillations within an activity complex and dynamic processes in a filament during the flares on 6 October 1979 // *Publ. Debr. Heliophys. Obs.*—1983.—N 5.—P. 293—315.
31. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards., 1966.—349 p.
32. *Neidig D. F. Jr.* H_{α} , hard X-ray and microwave emissions in the impulsive phase of solar flares // *Solar Phys.*—1978.—**57**, N 2.—P. 385—398.
33. *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* / Ed. by K. O. Kiepenheuer. — 1968.—P. 240—246.
34. *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak Contribution.*—1972.—N 559.
35. *Qiu J., Falchi A., Falciani R., et al.* Multispectral observations of an eruptive flare // *Solar Phys.*—1997.—**172**.—P. 171—178.
36. *Rust D. M.* Analysis of the August 7, 1972 white light flare: changes in the magnetic and velocity fields // *Solar Phys.*—1973.—**33**, N 1.—P. 205—212.
37. *Schmieder B., Forbes T. G., Malherbe J. M., Machado M. E.* Evidence for gentle chromospheric evaporation during the gradual phase of large solar flares // *Astrophys. J.*—1987.—**317**, N 2.—P. 956—963.
38. *Severny A. B.* Solar flares // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*—1964.—**2**.—P. 363—400.
39. *Severny A. B.* Mass motions in flares and moustaches indicated by special spectral features // *Mass motions in solar flares and related phenomena* / Ed. by Y. Ohman. — Stockholm: Almqvist&Wiksell, 1968.—P. 71—88.
40. *Shoolman S. A., Ganz E. D.* H_{α} flare spectra // *Solar Phys.*—1981.—**70**, N 2.—P. 363—374.
41. *Švestka Z., Kopecký M., Blaha M.* Qualitative discussion of 244 flare spectra. II. Line asymmetry and helium lines // *Bull. Astron. Inst. Czech.*—1962.—**13**.—P. 37—41.
42. *Švestka Z., Martin S. F., Copp R. A.* Solar and interplanetary dynamics / Eds M. Dryer, T. Tanberg-Hanssen. — 1980.
43. *Tang F.* Flare asymmetry as seen in offband H_{α} -filtergrams // *Solar Phys.*—1981.—**83**, N 1.—P. 15—25.
44. *Tsuneta S., Hara H., Shimizu T., et al.* Observation of a solar flare at the limb with the Yohkoh soft X-ray telescope // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1992.—**44**, N 5.—P. 63—69.
45. *Wülser J. P.* H_{α} line profile observations of solar flares with high temporal resolution // *Solar Phys.*—1987.—**114**, N 1.—P. 115—126.
46. *Yoshimura H., Tanaka K., Shimizu M., Hiei E.* Photospheric mass motions associated with a flare // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1971.—**23**, N 3.—P. 443—448.
47. *Zhang H. Q., Sakurai T., Shibata K., et al.* Soft X-ray and magnetic configuration in a solar active region in February 1992 // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**357**.—P. 725—734.
48. *Zirin H., Tanaka K.* The flares of August 1972 // *Word Data Cent. A. Upper Atmos. Geophys. Rept.*—1973.—N 28.—P. 121—133.

Поступила в редакцию 30.11.00