ДВИЖЕНИЯ ХРОМОСФЕРНОГО И ФОТОСФЕРНОГО ВЕЩЕСТВА В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ

Н. Н. Кондрашова

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
e-mail: `kondr@aoku.freenet.kiev.ua`

Проанализирована лучевая скорость движений фотосферного и хромосферного вещества во время солнечной вспышки 7 сентября 1990 г. Спектрограммы были получены на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-26 обсерватории Терскол. Для измерений использованы хромосферная линия H_α и образующиеся в верхних и средних шарах фотосферы фраунгоферовы линии. В течение вспышки в фотосфере и хромосфере наблюдались нисходящие потоки вещества, лучевые скорости которых изменялись с высотой. Наибольшие скорости были в хромосферных слоях.

MOTIONS OF CHROMOSPHERIC AND PHOTOSPHERIC MATERIAL IN A SOLAR FLARE, by Kondrashova N. N. – The line-of-sight velocity of the motions of chromospheric and photospheric matter during the solar flare of September 7, 1990 is analyzed. The spectrograms were obtained using the horizontal solar telescope ATsU-26 of the Terskol Observatory. The chromospheric line H_α and the Fraunhofer lines formed in the upper and middle photospheric layers are used for measurements. A downflow motions with height-dependent velocities were observed in the chromosphere and photosphere during the flare. The largest velocity were measured in the chromospheric layers.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка – мощное событие, в процессе которого выделяется огромное количество энергии. Согласно современным представлениям выделение энергии происходит в области корональных петель активных образований, где температура достигает десятков миллионов градусов. В большинстве моделей вспышек основная роль отводится процессам пересоединения, инициированным разного рода неустойчивостями. При этом магнитная энергия превращается в тепловую и энергию ускоренных частиц. Вспышечное возмущение охватывает всю солнечную атмосферу и проявляется во всем диапазоне спектра. Наблюдается усиление яркости и в хромосферной линии H_α. Предполагается, что это усиление является реакцией на события, происходящие в более высоких слоях. Яркость возрастает в течение нескольких минут (флэш-фаза), а затем интенсивность излучения медленно уменьшается (главная фаза). Вспышки в основном делятся на два типа: простые компактные и двухленточные. На H_α-фильтрограммах двухленточные вспышки имеют вид протяженных лент, представляющих собой основания аркад корональных петель. Между лентами часто лежит волокно, расположенное над нейтральной линией магнитного поля. Ленты существуют в течение нескольких часов после начала вспышек. В отличие от слабых компактных вспышек двухленточные характеризуются многократно повторяющимися всплесками жесткого рентгеновского излучения. Для понимания энергетики вспышек важное значение имеет изучение динамики вспышечно-активных областей. Изменения скоростей движения вещества на разных уровнях атмосферы Солнца могут свидетельствовать о разнообразных процессах: выходе новых магнитных потоков, хромосферном испарении, прохождении хромосферных конденсаций.

В настоящей работе поставлена цель на основе имеющегося спектрального наблюдательного материала изучить движения вещества на хромосферном и фотосферном уровнях двухленточной вспышки 7 сентября 1990 г.

Движение вещества в двухленточных вспышках, особенно на фотосферном уровне, мало исследовано. В хромосферных слоях мощной вспышки 16 мая 1981 г. в течение ее главной фазы наблюдалось опускание вещества [1]. Нисходящие потоки хромосферного вещества, соответствующие холодным послевспышечным H_α-петлям, найдены в узкой области и между вспышечными лентами [6, 12]. Одновременные измерения лучевой скорости движения хромосферного и фотосферного вещества во вспышке 3 июня 1979 г. показали, что в ней происходил подъем хромосферного и фотосферного вещества, по-видимому, вызванный выходом нового магнитного потока [4]. Постоянный подъем фотосферного вещества как перед, так и в течение вспышек с максимальным увеличением скорости вблизи максимума интенсивности обнаружен и в работе [7]. В [11] были найдены восходящие движения фотосферного вещества перед белой вспышкой 7 августа 1972 г. и нисходящие движения со скоростью порядка нескольких км/с в ее главной фазе. Таким образом, результаты определения лучевых скоростей неоднозначны и требуется дальнейшее их исследование.

НАБЛЮДЕНИЯ

В 1990 г. сотрудники ГАО НАНУ и АО КНУ с целью изучения изменений физического состояния хромосферного и фотосферного вещества, связанных со вспышками, провели спектральные наблюдения активных областей и вспышек на пике Терскол на ГСТ АЦУ-26. Наблюдения велись с помощью пятикамерного спектрографа в четырех участках спектра. Было получено около 200 фотопластинок со спектрограммами. Пространственное разрешение $2''$. Одновременно со спектрами на видеопленку были записаны H_α-фильтрограммы, полученные с помощью интерференционно-поляризационного фильтра Halle и телевизионной камеры “Интроскоп” [3]. Время наблюдений с точностью до секунд впечатывалось на видеопленку.

Таблица 1. Характеристики наблюдательного материала

Начало вспышки 7.09.1990 балла 1f	Максимумы	Конец	Моменты наблюдений вспышки
5^h24^m	5^h29^m	6^h39^m	узлы 1, 2: $5^h31^m08^s$; $5^h39^m09^s$; $5^h45^m32^s$
–	5^h49^m	–	узлы 3, 4: $5^h31^m48^s$; $5^h40^m09^s$; $5^h51^m43^s$

Одним из наиболее интересных объектов наблюдений явилась вспышка балла 1f, наблюдавшаяся 7 сентября 1990 г. Она возникла в юго-западной активной области, ее координаты S15, W42, сопровождалась всплеском мягкого рентгеновского излучения, балл C7.2. Эта область привлекла внимание наблюдателя Т. И. Редюк еще за 2 часа до вспышки тем, что в ней происходила активизация: поярчания, выбросы. H_α – фильтрограммы для двух моментов наблюдения вспышки приведены на рис. 1.

Вспышка была двухленточной, ее ленты возникли одновременно и были сильно фрагментированы. Выделяются несколько ярких узлов вспышки. Для изучения движений вещества были отобраны спектры, сфотографированные в двух сечениях. В каждом из спектров оказалось по два таких узла. Моменты начала, максимумов и конца вспышки даны в табл. 1. Вспышка имела кратковременную начальную фазу и продолжалась 1^h15^m.

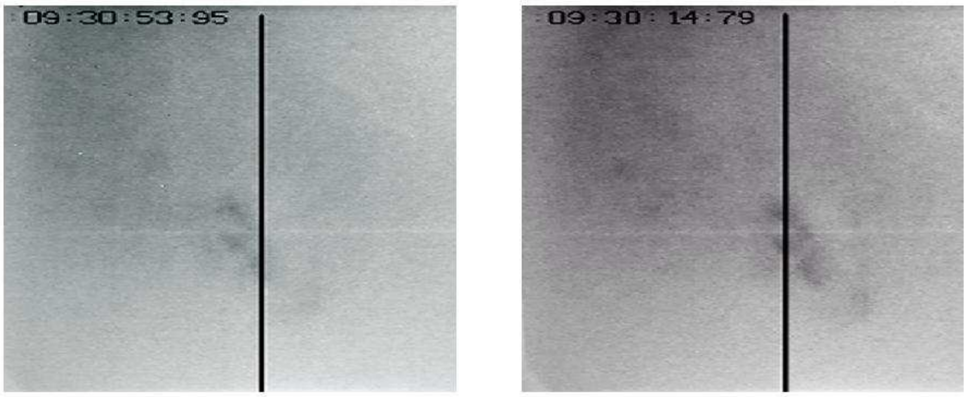

Рис. 1. H_α-фильтрограммы для двух моментов наблюдения вспышки 7 сентября 1990 г. Вертикальная линия показывает положение щели спектрографа

Таблица 2. Характеристики используемых линий

λ, нм	Элемент	N	EPl, эв	W, нм	h_d	h_w
654.6252	Fe I	268	2.76	10.3	390	280
655.4238	Ti II	102	1.44	1.4	218	197
655.5466	Si I	62	5.98	4.0	180	127
655.6077	Ti I	102	1.46	1.4	227	202
655.6806	Fe I	1255	4.79	1.6	164	142
655.9576	Ti II	91	2.05	1.4	200	170
656.2808	H_α	1	10.20	402		

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Фотометрическая обработка спектров производилась с помощью измерительного комплекса АМФ2-ZX, созданного в ГАО НАНУ под руководством А. В. Сергеева. Обработаны участки спектра, включающие линию H_α, несколько фотосферных и теллурических линий, для шести моментов главной фазы вспышки через 2, 3, 10, 11, 16 и 23 мин после первого максимума интенсивности вспышки в линии H_α. Характеристики используемых линий приведены в табл. 2: длина волны, элемент, номер мультиплета, потенциал возбуждения нижнего уровня, эквивалентные ширины профилей линий взяты из таблиц [8]. Высоты образования для центральных глубин и эквивалентных ширин профилей фотосферных линий вычислены по программе SPANSAT [2]. Первые охватывают верхние и средние слои фотосферы (от 164 до 390 км).

Линия H_α использовалась для изучения движений вещества в хромосфере. К сожалению, программа SPANSAT не позволяет рассчитать ее высоту образования. Лучевые скорости опре-

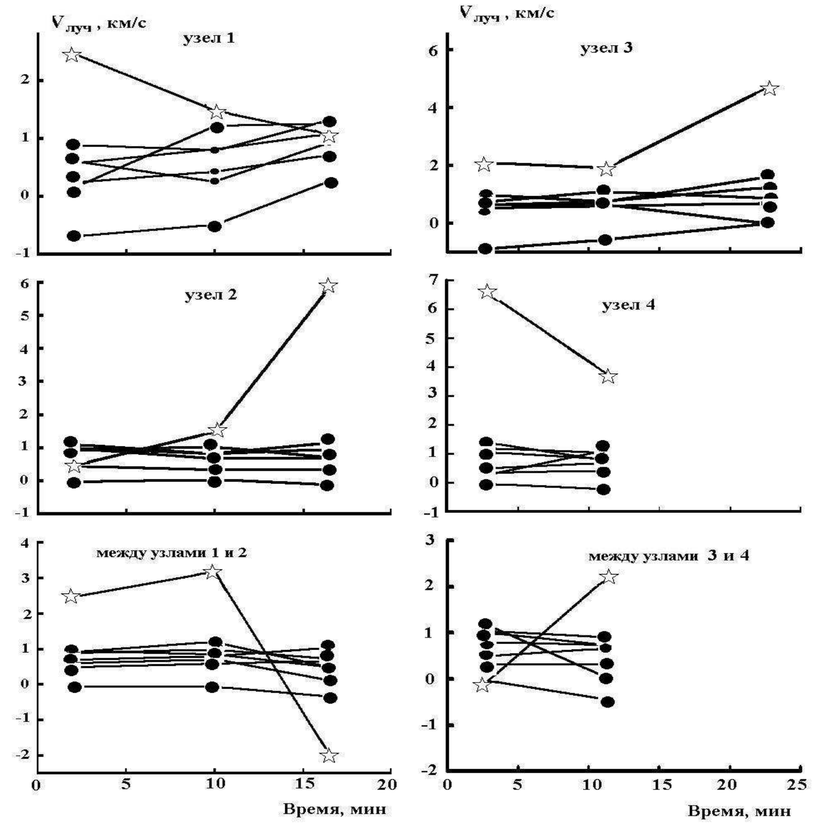

Рис. 2. Изменение лучевой скорости движения хромосферного (звездочки) и фотосферного вещества (кружочки) в течение вспышки в четырех ее узлах и между ними. Время отсчитано от первого H_α-максимума вспышки

делялись по доплеровским смещениям ядер линий в спектрах вспышки относительно лабораторных линий, длины волн которых брались из [10]. В качестве вспомогательных использовались теллурические линии. Их длины волн взяты из [9]. Учтены поправки за красное гравитационное смещение, обращение Земли вокруг Солнца и суточное вращение Земли. Точность измерения лучевой скорости составляет 170 м/с для фотосферных линий и 0.5 км/с для линии H_α. Возможна систематическая ошибка, вызванная неточностями лабораторных длин волн.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения лучевой скорости движения хромосферного и фотосферного вещества в процессе развития вспышки для ее четырех узлов приведены на рис. 2. По оси абсцисс отложено время, прошедшее после первого H_α-максимума вспышки. Как в хромосферных (звездочки), так и в фотосферных слоях во всех узлах происходило преимущественное опускание вещества. Наибольшие скорости были в слоях образования ядра хромосферной линии H_α, где они иногда достигали 7 км/с. В некоторые моменты ($5^h31^m48^s$, $5^h40^m9^s$ UT) в линии появлялись эмиссионные компоненты. Сильно прогретое вещество хромосферы двигалось в противоположных направлениях со скоростью 25 км/с, что могло быть следствием хромосферного испарения. Опускание хромосферного вещества в таких случаях связывается с хромосферной конденсацией (например [5]).

Скорости хромосферного вещества в узлах вспышки изменялись во времени по-разному: в первом и четвертом узлах уменьшались, а во втором и третьем увеличились на несколько км/с. На уровне фотосферы лучевые скорости изменялись со временем значительно меньше и их величина для разных высот была в основном 0–1 км/с. Не прослеживается явной зависимости изменения фотосферной лучевой скорости от хромосферной.

В нижней части рисунка приведены скорости движения вещества в пространстве между узлами вспышки на расстоянии 8500–17000 км от них. Зависимости скорости от времени для соседних

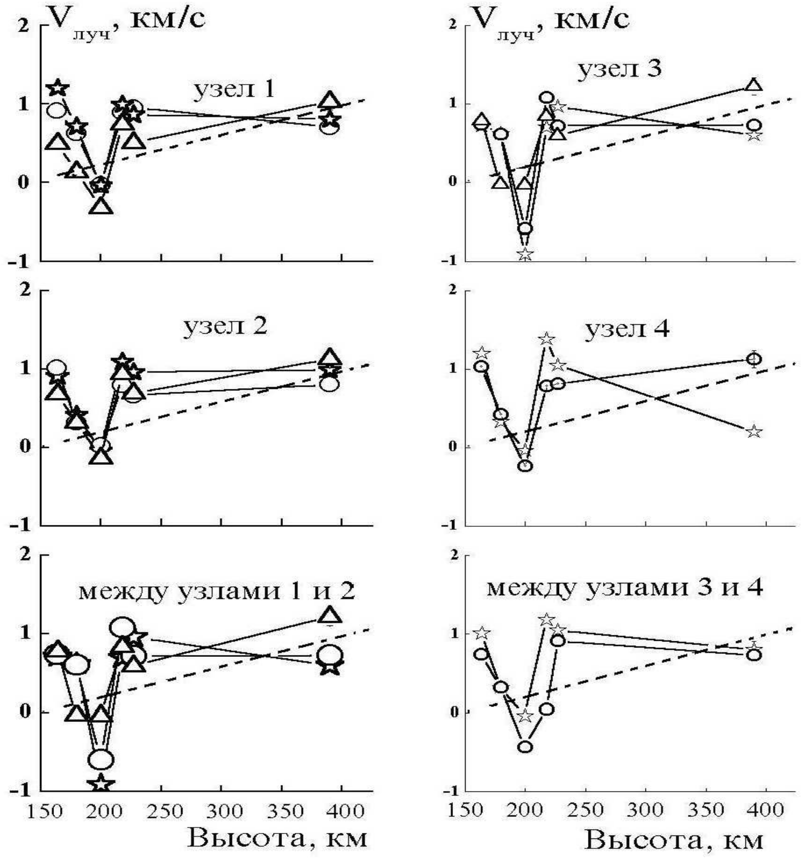

Рис. 3. Зависимости лучевой скорости движения фотосферного вещества от высоты для трех моментов наблюдений вспышки (соответственно звездочки, кружки и треугольники) и для невозмущенной фотосферы (штриховая линия)

хромосферных слоев не похожи на такие зависимости для узлов, а в фотосферных слоях скорости мало отличались по величине от скоростей в узлах.

На рис. 3 приведены зависимости лучевой скорости движения фотосферного вещества от высоты для узлов и пространства между узлами вспышки. Штриховой линией дано распределение скорости по высоте для невозмущенной фотосферы. В невозмущенной фотосфере вещество также двигается от наблюдателя, его скорость уменьшается с глубиной. В верхних слоях фотосферы лучевая скорость близка или меньше ее величины для невозмущенной фотосферы, а в средних, за исключением полученной по линии Ti II λ 655.96 нм для высоты 200 км, больше ее на 0.5–1 км/с. В целом зависимости скорости для разных узлов и мест между узлами похожи. Значительное отличие значений скорости для высоты 200 км, скорее всего, фиктивно. По-видимому, неточна лабораторная длина волны линии Ti II λ 655.9588 нм, т. к. если по ней рассчитать скорость в невозмущенной фотосфере в центре диска, то ее величина сильно отличается от полученных по другим линиям, образующимся на близких высотах.

ВЫВОДЫ

В главной фазе вспышки в хромосферных и фотосферных слоях ее узлов и между ними происходило опускание вещества. Скорость в процессе вспышки заметным образом изменялась только в хромосферном слое образования ядра линии H_α. В двух узлах она увеличивалась со временем до 5–7 км/с, а в двух других уменьшалась. В фотосферных слоях ее величина находилась в пределах 0–1 км/с. В верхних слоях фотосферы лучевая скорость близка или меньше ее величины для невозмущенной фотосферы, а в средних больше ее на 0.5–1 км/с. Не выявлено корреляции временных изменений скорости в хромосферных и фотосферных слоях.

[1] *Аликаева К. В., Барановский Э. А., Полупан П. Н.* Изменение состояния низкотемпературной плазмы в процессе мощной солнечной вспышки // Кинематика и физика небес. тел.–1986.–**2**, № 4.–С. 27–33.

[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; ИТФ-88-87Р).

[3] *Данилевський В. О., Еръомін С. С., Рожило О. О.* Інструментальне забезпечення спектральних спостережень активних областей на Сонці // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.–1992.–Вип. 6.–С. 96–100.

[4] *Кондрашова Н. Н., Рудникова Е. Г., Пасечник М. Н.* Движения хромосферного и фотосферного вещества в двухленточной солнечной вспышке // Кинематика и физика небес. тел.–2001.-**17**, № 6.–С. 485–495.

[5] *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // Astrophys. J.–1989.-**346**, N 2.–P. 1019–1029.

[6] *Gu X., Lin J., Luan T., Schmieder B.* Time evolution of a two-ribbon flare: characteristics of post-flare loops // Astron. and Astrophys.–1992.–**259**, N 2.–P. 649–662.

[7] *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. 233–246.

[8] *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å.–Washington: National Bureau of Standards, 1966.–349 p.

[9] *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // Kitt Peak Contribution.–1972.–N 559.–43 p.

[10] *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al.* // Astrophys. J. Suppl. Ser.–1995.–**112**, N 2.–P. 525–535.

[11] *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.

[12] *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.