

УДК 523.985.3

Н. Н. Кондрашова, М. Н. Пасечник

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

Лучевые скорости фотосферного вещества в солнечной вспышке с выбросом

Изучены фотосферные горизонтальные движения в начальной и главной фазах солнечной вспышки 4 сентября 1990 г., возникшей вблизи края диска Солнца. Вспышка сопровождалась выбросом. Спектрограммы вспышки получены на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-26 ГАО НАН Украины (п. Терскол). Выявлены изменения скорости движения вещества как по величине, так и по направлению на разных уровнях фотосферы в процессе развития вспышки. Скорость изменялась в пределах от -4 до 2 км/с. Сопоставление полученных данных с изменениями хромосферных лучевых скоростей показало, что горизонтальные движения вещества в фотосфере и хромосфере вспышки преимущественно направлены к наблюдателю, но в отдельные моменты их направление изменялось. В двух узлах вспышки временной ход фотосферных скоростей различен. Наибольшие скорости наблюдались в главной фазе вспышки. В начальной фазе вспышки в месте выброса отмечено увеличение фотосферной скорости по сравнению с ее величиной перед вспышкой и во вспышечных узлах.

ПРОМЕНЕВІ ШВИДКОСТІ ФОТОСФЕРНОЇ РЕЧОВИНИ В СОНЯЧНОМУ СПАЛАХУ З ВИКИДОМ, Кондрашова Н. М., Пасечник М. М.

Вивчено фотосферні горизонтальні рухи в початковій та головній фазах сонячного спалаху 4 вересня 1990 р., який виник біля краю диска Сонця. Спалах супроводжувався викидом. Спектрограми спалаху отримано на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-26 ГАО НАН України (п. Терскол). Виявлено зміни руху речовини як за величиною, так і за напрямком на різних рівнях фотосфери під час спалаху. Швидкість змінювалась від -4 до 2 км/с. Зіставлення отриманих даних зі змінами хромосферних променевих швидкостей показало, що фотосферна і хромосферна речовина спалаху рухалась переважно у напрямку до спостерігача, але в окремі моменти напрямок руху зм-

інювався. У двох вузлах спалаху часові зміни фотосферних швидкостей руху різні. Найбільші швидкості руху спостерігались у головній фазі спалаху. У початковій фазі спалаху в місці викиду відзначено підвищення фотосферної швидкості у порівнянні з її величиною перед спалахом та у спалахових вузлах.

LINE-OF-SIGHT VELOCITIES OF PHOTOSPHERIC MATTER MOTION IN A SOLAR FLARE WITH EJECTION, by Kondrashova N. N., Pasechnik M. N. The photospheric horizontal velocities at the onset and the main phases of the solar flare on 4 September 1990 taking place near the solar limb are studied. The ejection was observed during the flare. The spectra were derived with the solar horizontal telescope ATsU-26 at the Terskol Peak Observatory. The line-of-sight velocity variations are revealed during the flare as in the value as in the direction in different photospheric levels. The photospheric matter motions with the velocity $-4...2$ km/s are observed in two flare kernels. The comparison of the data received with the chromospheric line-of-sight velocity variations indicated, that the direction of the photospheric and chromospheric matter motion was the same, to observer. The direction of the matter motion rapidly changed at some moments. The velocities reached its maximum at the main phase of the flare. There is the increasing of the photospheric velocity in the place of the surge in comparison with its value before the flare and in the flare kernels.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что энергия, реализуемая в солнечных вспышках, высвобождается в результате магнитных пересоединений. Согласно современным представлениям ее накопление происходит в токовых слоях, которые возникают в результате фотосферных движений источников поля: всплывания нового магнитного потока из-под фотосферы или неоднородных горизонтальных течений в области линии раздела полярностей фотосферного магнитного поля, так называемых, шировых движений [12, 24, 26]. Они вызывают импульсные изменения магнитной спиральности перед и во время вспышек [19—21]. Обнаружено, что эти изменения коррелируют с ростом потока рентгеновского излучения.

Изучению шировых горизонтальных движений перед вспышками посвящено много работ. Однако горизонтальные движения на фотосферном уровне во время вспышек очень мало исследованы. Большинство работ относится к вертикальной составляющей скоростей. Авторы работы [13] одними из первых исследовали изменения поля горизонтальных скоростей в активных областях во время вспышек. В восьми из четырнадцати изученных ими вспышек они выявили увеличение скорости движения фотосферного вещества. Скорость изменя-

лась от 0.3 до 1 км/с и имела наибольшую величину примерно в максимуме вспышек, а затем уменьшалась. Изучение средних скоростей горизонтальных потоков в двух вспышечно-активных областях показало, что вспышечные узлы располагались в местах конвергенции горизонтальных фотосферных потоков [14].

Горизонтальную составляющую лучевой скорости можно получить, исследуя спектры вспышек, возникших на краю солнечного диска. Мы поставили своей целью изучить особенности изменений горизонтальных фотосферных скоростей в процессе развития вспышки 4 сентября 1990 г., возникшей вблизи края диска Солнца. Вспышка сопровождалась выбросом, и мы можем изучить также, изменяется ли скорость на уровне фотосферы во время выброса. В работе [6] проанализированы движения хромосферного вещества в этой вспышке и в выбросе, что позволяет нам сравнить изменения движений на фотосферном и хромосферном уровнях.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБРАБОТКА

Для изучения движений на уровне фотосферы в двухленточной вспышке 4 сентября 1990 г. были использованы спектры, полученные Т. И. Редюк на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-26 ГАО НАН Украины (Кавказ, пик Терскол, 3100 м) [1]. Дисперсия спектрографа в четвертом порядке 31 мм/нм для длины волны 650 нм. Диаметр изображения Солнца 16 см. Спектры фотографировались на фотопластинки ORWO WP-3 с мелкозернистой эмульсией. Одновременно с фотографированием спектров велась магнитофонная запись H-изображения активной области, полученного с помощью интерференционно-поляризационного H-фильтра Halle [4].

На рис. 1 дано изображение вспышки для одного из моментов наблюдений. Вертикальной линией отмечено положение щели спектрографа. Следует отметить, что во все моменты наблюдений щель спектрографа пересекала одно и то же место активной области.

Согласно обобщенным данным Solar Geophysical Data [25] рассматриваемая вспышка балла 2N началась в 07^h41^m UT и закончилась в 08^h59^m , ее максимум в линии H зафиксирован в 08^h06^m . Следует отметить, что разные станции дают сильно отличающиеся моменты времени начала и максимума вспышки в линии H, а также ее балл и яркость. Она возникла в активной области на западном краю солнечного диска, ее координаты N12W67, $\cos \theta = 0.3$. Как уже отмечалось, вспышка сопровождалась выбросом. Согласно [6] скорость движения хромосферного вещества в выбросе в $08^h10^m16^s$ достигала 160 км/с.

Данные наблюдений на спутнике GOES в рентгеновских диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм, полученные с шагом 3.06 с (<http://goes.ngdc.noaa.gov>), приведены на рис. 2, б. Согласно этим данным перед основным пиком наблюдался предвестник вспышки, небольшое по-

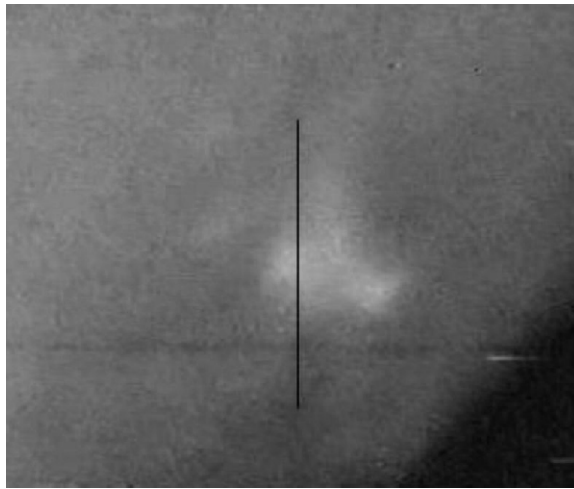


Рис. 1. N-фильтрограмма вспышки 4 сентября 1990 г. Вертикальной линией отмечено положение щели спектрографа

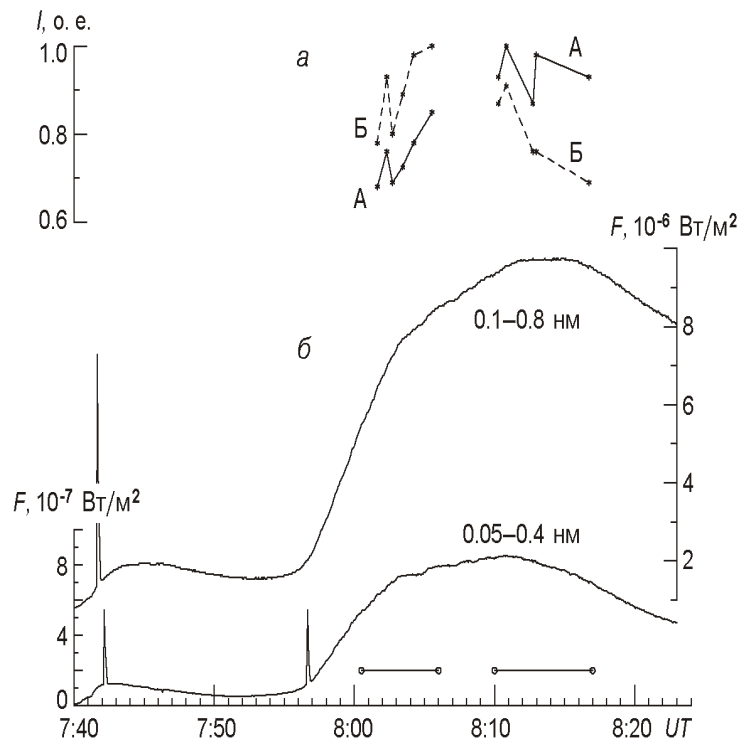


Рис. 2. Изменение потоков излучения во время вспышки: *а* — поток в линии N для узлов A (сплошная линия) и B (штриховая линия); *б* — поток рентгеновского излучения в диапазонах 0.05...0.4 и 0.1...0.8 нм. Горизонтальные линии показывают интервалы времени наблюдений вспышки

вышение потока рентгеновского излучения. Последующий рост потока рентгеновского излучения вспышки начался примерно в 07^h57^m . Максимум интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм наступил раньше (в $08^h10^m48^s$), чем в диапазоне 0.1–0.8 нм (в 08^h12^m). Рентгеновский балл вспышки — C9. В распределении интенсивности рентгеновского излучения можно выделить

три стадии развития вспышки: начальную, когда происходило довольно быстрое увеличение интенсивности, постепенную и стадию спада. Первая фаза продолжалась примерно до $08^h03.3^m$. На протяжении постепенной фазы рентгеновского излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм произошло несколько всплесков его интенсивности в $08^h03^m25^s$, $08^h06^m40^s$, $08^h08^m12^s$, $08^h09^m40^s$ и в $08^h10^m48^s$. Максимум вспышки в линии H α по данным Solar Geophysical Data приходится на постепенную фазу рентгеновского излучения, перед его максимумом. Горизонтальные линии на рисунке показывают интервалы времени спектральных наблюдений. Первый интервал относится к периоду роста интенсивности рентгеновского излучения, а второй — к ее максимуму и спаду.

В процессе наблюдений в щель спектрографа попадало излучение от двух ярких узлов одной из лент вспышки. На рис. 2, а приведены полученные нами по спектральным данным световые кривые для линии H α в относительных единицах для узлов вспышки А и Б. Видно, что до максимума вспышки в рентгеновском излучении (первая серия наблюдений) более ярким был узел Б, а после максимума (вторая серия наблюдений) — узел А. На первом этапе происходил быстрый рост интенсивности излучения в линии H α , причем световые кривые для обоих узлов имели идентичный ход с резкими изменениями. К сожалению, разрыв в наблюдениях не дает нам возможности установить точное время максимума излучения в линии H α в каждом из узлов, но по ходу кривых можно предположить, что максимум в узле Б наступил раньше, чем в узле А. На втором этапе наблюдений, в максимуме и на стадии спада потока рентгеновского излучения, более ярким стал узел А, в котором интенсивность медленно уменьшалась, в то время как в узле Б происходил ее резкий спад.

Спектры были получены перед вспышкой в $6^h25^m39^s$, на начальной стадии ее развития в моменты $08^h00^m48^s$, $08^h01^m38^s$, $08^h02^m20^s$, $08^h02^m43^s$ (фаза быстрого роста интенсивности рентгеновского излучения), $08^h03^m27^s$, $08^h04^m14^s$, $08^h05^m33^s$ (фаза постепенного роста интенсивности рентгеновского излучения) и в главной фазе вспышки $08^h10^m16^s$, $08^h10^m51^s$, $08^h12^m44^s$, $08^h12^m58^s$, $08^h16^m44^s$.

На всех спектрограммах в синем крыле линии H α виден темный выброс. В первом периоде наблюдений он прилегает к яркому вспышечному узлу Б с его внешней стороны (в $08^h03^m27^s$ частично накладывается на него). Во втором периоде наблюдений выброс частично или полностью накладывается на этот узел. Движение хромосферного вещества выброса в целом было направлено к наблюдателю. В первый момент наблюдения вспышки ($08^h00^m48^s$) скорость движения хромосферного вещества на уровне формирования центра линии H α в выбросе была равна –15 км/с, затем медленно увеличивалась [6]. В $08^h03^m27^s$ скорость резко увеличилась до –66 км/с, а в последующие моменты наблюдений — уменьшалась. Анализ направления этих движений в выбросе показал, что они были вихревыми.

Таблица 1. Горизонтальная хромосферная скорость во вспышечных узлах и в выбросе

Моменты наблюдений, UT	V , км/с		V_{\max} , км/с
	узел Б	узел А	выброс
08 ^h 00 ^m 48 ^s	-5	0.4	-15
08 ^h 01 ^m 38 ^s	-0.1	-1.2	-17
08 ^h 02 ^m 20 ^s	-2.2	-1.7	-22
08 ^h 02 ^m 43 ^s	-2.3	-0.9	-60
08 ^h 03 ^m 27 ^s	-14	-1.7	-65
08 ^h 04 ^m 14 ^s	-1.3	-1.1	-49
08 ^h 05 ^m 33 ^s	-4	-0.8	-47
08 ^h 10 ^m 16 ^s	-18	-1.3	-25
08 ^h 10 ^m 51 ^s	-26	0.4	-26
08 ^h 12 ^m 44 ^s	-24	-2.7	-32
08 ^h 12 ^m 58 ^s	-26	-2	-26

Таблица 2. Характеристики используемых фраунгоферовых линий

λ , нм	Элемент	EPL , эВ	d_0	h_d , км
655.9576	Ti II	2.05		252
658.0233	Ni I	4.42	0.083	213
658.1218	Fe I	1.48	0.178	280
658.3710	Si I	5.95	0.099	202
658.6319	Ni I	1.95	0.368	347
658.7622	C I	8.53	0.083	115
659.1326	Fe I	4.59	0.096	220
659.2522	Ni I	4.23	0.176	246
659.3884	Fe I	2.43	0.646	579

Табл. 1 содержит значения хромосферных скоростей V на уровне формирования центра линии Н во вспышечных узлах и в выбросе. Для выброса указана максимальная скорость V_{\max} по данным работы [6]. Видно, что в первом периоде наблюдений скорость во вспышечных узлах намного меньше, чем в выбросе. В узле А она равна в среднем -1 км/с, в узле Б примерно -2 км/с, за исключением момента 08^h03^m27^s, когда выброс частично накладывался на узел Б, и скорость выброса в этом месте была равна -14 км/с. Во втором периоде наблюдений, когда выброс частично или полностью перекрывал этот узел, скорости выброса в этом месте и максимальная скорость в выбросе равны или значительно ближе по величине.

Для фотометрической обработки и последующего анализа движений на уровне фотосферы отобраны девять фраунгоферовых линий Fe I, Si I, Ni I, C I и Ti II в интервале длин волн: $\lambda = 656...660$ нм. Их характеристики приведены в табл. 2. Значения длин волн линий и потенциалов возбуждения нижнего уровня EPL взяты из работы [22], их

центральные глубины из работы [3]. Линии образуются на разных высотах в фотосфере в широком диапазоне от 115 до 580 км. Высоты их формирования для невозмущенной фотосферы вычислены по программе SPANSAT [2].

Спектры профотометрированы с помощью измерительного комплекса АМФ2-ZX и автоматического двухкоординатного микрофотометра [5]. Лучевые скорости определялись по доплеровским смещениям центров линий в спектрах относительно их положений в лабораторном спектре [23] с использованием близлежащих теллурических линий. При этом учитывались поправки за вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, вращение Солнца и гравитационное смещение. Данные, полученные в работе [6] по линии H α , были дополнены.

Погрешность измерений скорости фотосферных движений составляет примерно 0.3 км/с, а хромосферных — 0.5 км/с.

Для исследования изменений скорости на участке Солнца вдоль щели спектрографа были сделаны фотометрические сечения на участке спектра, включающего хромосферную линию H α и фотосферную линию Ti II ($h = 252$ км). Шаг между сечениями составлял 0.5 мм, что соответствует расстоянию на поверхности Солнца 4250 км.

ДВИЖЕНИЯ ФОТОСФЕРНОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОЦЕССЕ ВСПЫШКИ

Поскольку изучаемая вспышка возникла вблизи края солнечного диска, основной вклад в величины измеренных лучевых скоростей вносит их горизонтальная составляющая. На рис. 3 приведены изменения со временем лучевых скоростей вещества на разных высотах фотосферы в течение вспышки в местах расположения двух ее узлов А и Б. Представлены также значения лучевых скоростей для момента 06^h25^m39^s перед вспышкой (звездочки). Отрицательные значения лучевой скорости соответствуют смещениям линий в коротковолновую часть спектра, движениям по направлению к наблюдателю. Для сравнения в верхней части рисунка даны хромосферные лучевые скорости, полученные по смещениям центра линии H α в спектрах относительно ее положения в лабораторном спектре. В узле А они не превышают -3 км/с, а большие скорости в месте расположения узла Б относятся к выбросу, который частично, а в некоторые моменты полностью перекрывал на спектрограммах узел Б.

Из рис. 3 видно, что в целом в обоих узлах вспышки в фотосфере и хромосфере, как и за 1^h16^m перед вспышкой, вещество преимущественно двигалось по направлению к наблюдателю. В работе [15] изучены изменения во времени движений фотосферного вещества в неактивном флоккуле, находившемся на таком же расстоянии от центра диска Солнца, как и рассматриваемая вспышка. На рис. 3 слева вертикальными линиями нанесены интервалы изменений лучевых скорос-

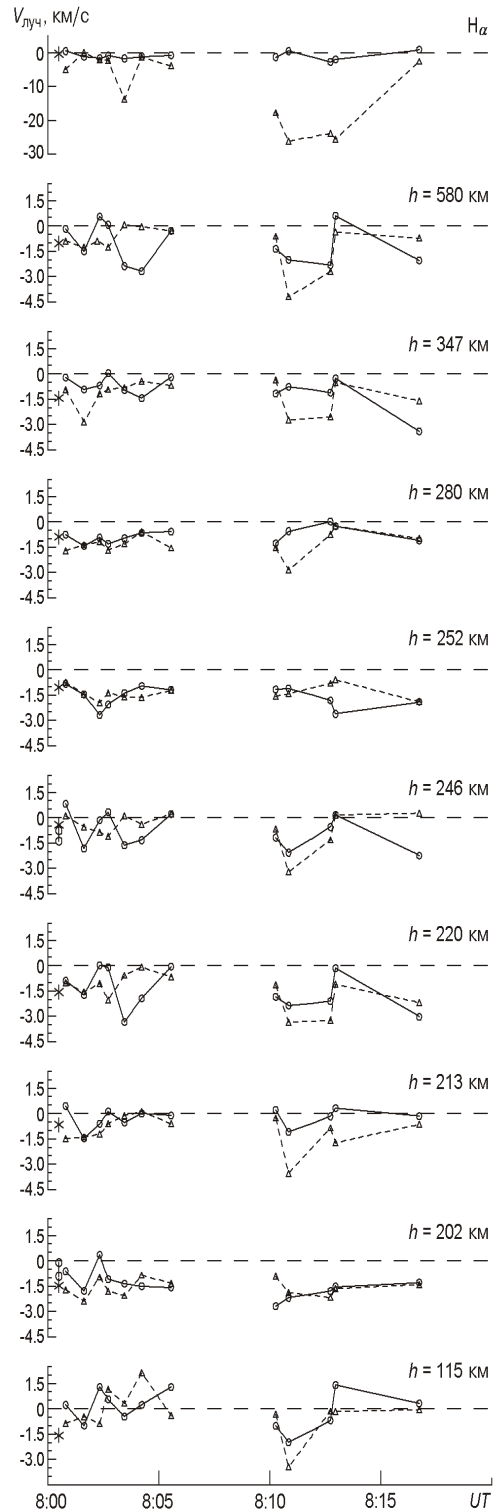


Рис. 3. Изменения лучевой скорости хромосферного и фотосферного вещества в узлах А (сплошные линии) и Б (штриховые линии) со временем в процессе вспышки. Звездочки — значения лучевой скорости перед вспышкой. Вертикальными линиями отмечены интервалы изменений скорости в спокойном флоккуле. Отрицательные значения скорости соответствуют направлению движения вещества к наблюдателю

тей для высот 202 и 246 км, взятые из этой работы. Эти данные получены в течение 3.5 мин с шагом 30 с. Видно, что направление движений во вспышке и спокойном флоккуле совпадает, а амплитуда временных вариаций фотосферных лучевых скоростей во вспышке значительно больше, чем во флоккуле, и превышает ошибку измерений.

В первый момент наблюдений ($08^h00^m48^s$) скорость горизонтальных движений почти на всех исследуемых уровнях атмосферы изменена относительно ее значений перед вспышкой и для невозмущенного флоккула. В узле А она преимущественно уменьшена, а в более ярком близком к выбросу узле Б на некоторых высотах она увеличена, а на некоторых уменьшена. В последующие моменты начальной стадии вспышки скорости движения фотосферного вещества в узлах сильно изменялись: в некоторых слоях они уменьшались, а в других увеличивались. На некоторых уровнях фотосферы они достигали -3.5 км/с, а иногда изменяли свое направление. Можно заметить, что в узле А направление движения изменялось в $08^h02^m20^s$ и $08^h02^m43^s$, а в узле Б — в более поздние моменты $08^h03^m27^s$ и $08^h04^m14^s$. Это значит, что в это время фотосферное вещество в узлах двигалось в противоположных направлениях (рис. 3). К концу начальной фазы движение вещества в узлах было направлено к наблюдателю, за исключением самой нижней высоты 115 км.

В $08^h03^m27^s$, когда хромосферная скорость в выбросе была максимальной (табл. 1), в перекрытом им узле Б она стала равной -14 км/с, а в дальнем от выброса вспышечном узле А изменилась мало. В то же время фотосферная скорость почти во всех слоях узла Б уменьшилась на $0.5-2$ км/с, в некоторых движение изменило направление, а в дальнем узле А в верхних и средних слоях (220 — 580 км) скорость преимущественно увеличилась примерно на такую же величину (рис. 3).

Во втором периоде наблюдений, в главной фазе вспышки, выброс перекрывал узел Б, поэтому хромосферные скорости в нем были такими же или несколько меньше, чем максимальная скорость в самом выбросе, тогда как в дальнем от выброса узле А не превышали -2.7 км/с (табл. 1). На некоторых спектрограммах в синем крыле линии Н выброс виден до 0.32 нм от центра линии. Из этого следует, что в нижней хромосфере скорости в выбросе достигали сотен км/с. Фотосферные скорости в узле Б в целом больше, чем в начальной фазе вспышки (рис. 3). В $08^h10^m51^s$, примерно во время максимума рентгеновского излучения в длине волны $0.05-0.4$ нм, в нем заметен резкий рост скоростей. Скорости были значительно больше, чем перед вспышкой. В этот момент они были наибольшими в хромосфере (-26 км/с) и почти на всех уровнях фотосферы, где они достигали $-3...-4$ км/с. При этом скорости в узле А на некоторых высотах увеличились, на некоторых уменьшились, а в целом не превышали -2 км/с.

В главной фазе вспышки движение на уровне фотосферы в узле Б почти всегда было направлено к наблюдателю (рис. 3). В узле А в $8^h12^m58^s$ на некоторых высотах фотосферы наблюдалось изменение

направления движения на противоположное. В обоих узлах амплитуда скорости довольно сильно изменялась со временем, причем скорости были то больше, то меньше их предвспышечных значений. В узле А к концу наблюдений в средних и верхних слоях фотосферы отмечено увеличение скорости по направлению к наблюдателю. При этом в хромосфере этого узла изменилось направление движения. В $08^h16^m44^s$, когда происходил резкий спад яркости узла Б, в верхних фотосферных слоях узла А скорости были большими, чем в узле Б. В узле Б в $08^h10^m51^s$ скорость значительно увеличилась по сравнению с предыдущим моментом наблюдений, после чего она уменьшалась и достигла почти предвспышечных значений. Временные изменения фотосферной скорости коррелировали с изменениями интенсивности излучения в рентгеновском диапазоне 0.05—0.4 нм (рис. 2).

На рис. 4 сравниваются распределения лучевой скорости движения фотосферного вещества по высоте для двух узлов в каждый из моментов наблюдений. Напомним, что высоты, приведенные на рисунках, вычислены с использованием модели невозмущенной фотосферы, поэтому здесь можно говорить лишь об усредненном разделении фотосферы на нижние, средние и верхние слои. Видно, что перед вспышкой скорость изменяется с высотой мало, в пределах $-0.5... -1.6$ км/с, движение на всех высотах направлено к наблюдателю. Амплитуда скорости во вспышке гораздо больше. Значительные отклонения величины скорости от предвспышечной отмечены на всех высотах как в начальной фазе, так и на главной стадии развития вспышки. Скорости изменяются с высотой не плавно, их значения то увеличиваются, то уменьшаются, иногда изменяется направление движения. Это свидетельствует о вихревом движении вещества на уровне фотосферы, связанном, возможно, с закрученностью магнитного поля.

Из рис. 4 также видно, что распределения скорости по высоте в узлах различались для всех моментов наблюдений. Уже в первый момент наблюдений вспышки в $08^h00^m48^s$ лучевые скорости в узле Б значительно больше, чем в узле А; их значения на разных высотах фотосферы в основном составляют $-1...0.8$ км/с в узле А и $-1.8... 0.1$ км/с в узле Б. В следующий момент наблюдений в обоих узлах движение направлено к наблюдателю. В $08^h02^m20^s$ и $08^h02^m43^s$ на некоторых высотах узла А снова отмечается движение вещества от наблюдателя. В $08^h03^m27^s$ и в $08^h04^m14^s$ в верхней фотосфере скорость движения вещества в узле Б стала меньше, чем в узле А.

В главной фазе скорости движения в узле Б на всех высотах были то больше, то меньше, чем в узле А.

Наибольшие скорости, направленные к наблюдателю, зарегистрированы в главной фазе: в нижних слоях узла А и на всех уровнях фотосферы узла Б в $08^h10^m51^s$, во время максимума рентгеновского излучения, и в верхних слоях фотосферы узла А в $08^h16^m44^s$ (рис. 4). В $08^h16^m44^s$ в узле Б распределение скорости по высоте уже практически

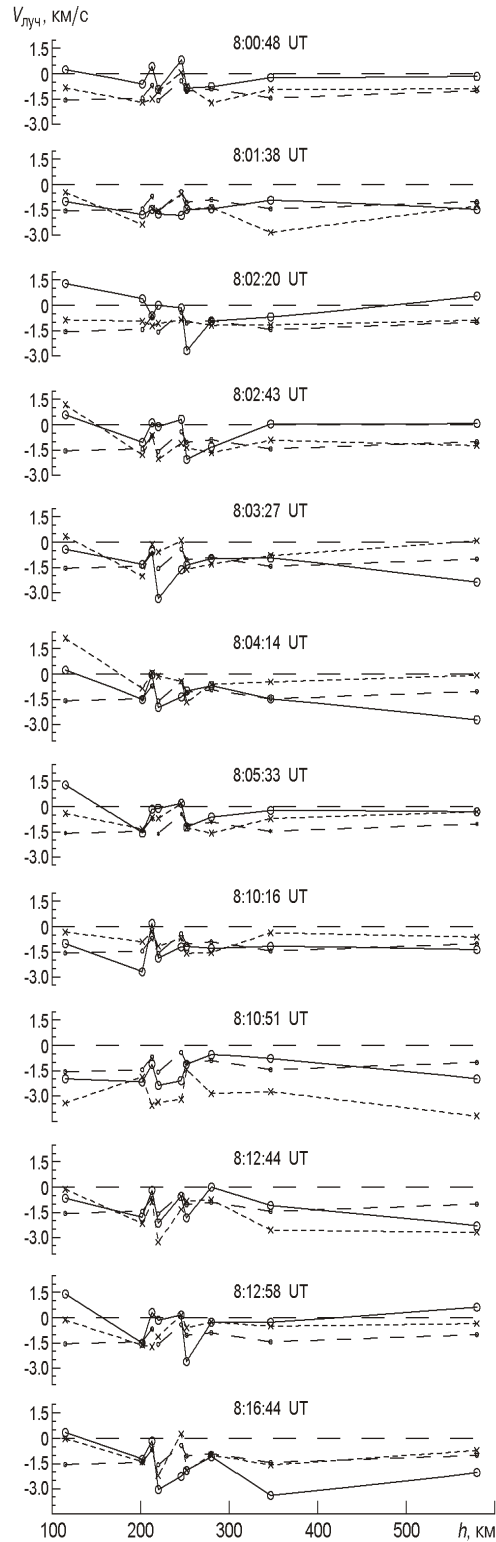


Рис. 4. Сравнение распределений лучевой скорости фотосферного вещества по высоте в узлах вспышки А (сплошные линии, кружочки) и Б (пунктирные линии, крестики) для каждого из моментов наблюдений. Штриховые линии — распределение скорости перед вспышкой

такое же, как перед вспышкой, что соответствует резкому спаду световой кривой для этого узла (рис. 2, *a*). Таким образом, максимальные скорости в узле Б наблюдались раньше, чем в узле А.

СРАВНЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ФОТОСФЕРНОГО И ХРОМОСФЕРНОГО ВЕЩЕСТВА ВО ВСПЫШКЕ И В ВЫБРОСЕ

На рис. 5 сравниваются изменения лучевых скоростей вдоль разреза спектра на фотосферном (252 км) и хромосферном уровнях (в слое образования центра линии Н) для двух моментов наблюдений вспышки $08^h01^m38^s$ и $08^h12^m58^s$. По оси абсцисс отложены номера k фотометрических разрезов спектров. Как отмечалось выше, шаг между разрезами соответствует расстоянию на Солнце 4250 км. Подобные рисунки получены также и для других моментов времени, и все они показывают аналогичные особенности изменения лучевых скоростей. Сравнение движений в местах расположения узлов и в их окрестностях показало, что фотосферные скорости в них различаются не более чем на 1 км/с. Скорости движений в окрестностях не превышают $-2...-3$ км/с, движение направлено преимущественно к наблюдателю. В узле А фотосферные лучевые скорости отличаются от хромосферных не больше чем на 1.5 км/с. В узле Б на первом этапе наблюдений они различаются не более чем на 4 км/с, а в момент $08^h03^m27^s$ и во второй серии наблюдений различия достигают 10 км/с и более.

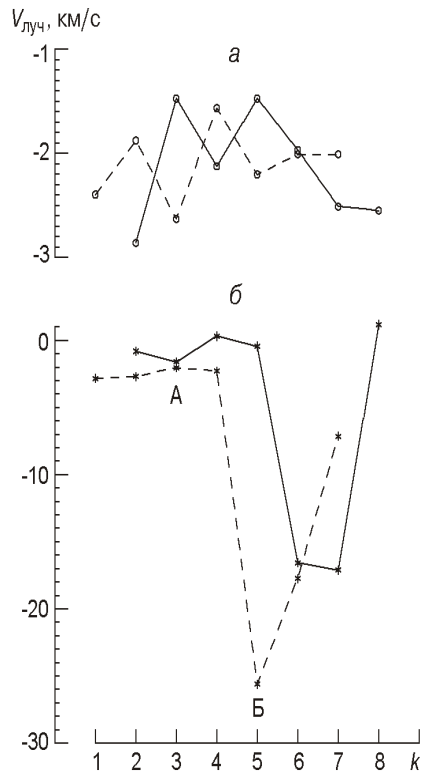
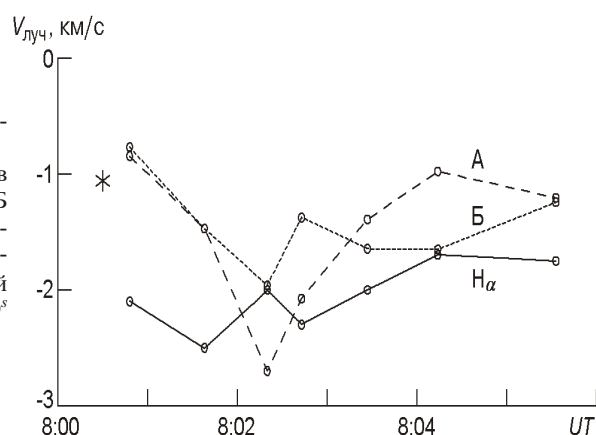


Рис. 5. Изменения лучевой скорости фотосферного (*a*) и хромосферного (*б*) вещества вдоль щели спектрографа в $08^h01^m38^s$ (сплошные линии) и $08^h12^m58^s$ UT (штриховые линии). А и Б — места узлов. По оси абсцисс номер k фотометрического сечения спектра. Расстояние между сечениями — 4250 км

Таблица. 3. Горизонтальная хромосферная и фотосферная скорости в месте выброса

Моменты наблюдений, UT	V , км/с	
	хромосфера	фотосфера
08 ^h 00 ^m 48 ^s	-16	-2.1
08 ^h 01 ^m 38 ^s	-17	-2.5
08 ^h 02 ^m 20 ^s	-15	-2.0
08 ^h 02 ^m 43 ^s	-22	-2.3
08 ^h 03 ^m 27 ^s	-65	-2.0
08 ^h 04 ^m 14 ^s	-18	-1.7
08 ^h 05 ^m 33 ^s	-46	-1.8
08 ^h 10 ^m 16 ^s	-25	-1.2
08 ^h 10 ^m 51 ^s	-26	-1.4
08 ^h 12 ^m 44 ^s	-32	-1.5
08 ^h 12 ^m 58 ^s	-26	-2.2

Рис. 6. Изменения лучевой скорости на фотосферном уровне Н выброса (сплошная линия), в узлах А (штриховая линия) и Б (пунктирная линия) в течение начальной фазы вспышки. Звездочка отмечено значение лучевой скорости для момента 06^h25^m39^s (перед вспышкой)



В табл. 3 приведены хромосферные и фотосферные (на высоте 252 км) скорости, полученные для одного и того же места выброса на спектрограмме. И в хромосфере, и в фотосфере движение направлено к наблюдателю. В хромосфере скорость изменялась от -65 до -15 км/с. На уровне фотосферы в начальной фазе ее величина изменялась от -2.5 до -1.7 км/с, а в главной фазе она уменьшилась до -1.2 км/с. Интересно, что в начальной фазе вспышки фотосферная скорость в месте выброса в целом больше, чем перед вспышкой и в узлах вспышки (рис. 6). Разница скоростей не превышает 1 — 1.5 км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ изученных нами вариаций горизонтальных скоростей движения фотосферного вещества в процессе вспышки 4 сентября 1990 г. показал, что скорость изменялась в пределах -4 ... 2 км/с. Иногда, осо-

бенно на начальной стадии развития вспышки, в одном из узлов на отдельных высотах происходило изменение направления движения. Возможно, это связано со спиральной структурой магнитного поля.

Как следует из теоретических работ (например [7, 11]), вид профилей линии Н в спектрах вспышек может дать информацию о тепловом или нетепловом характере возбуждения хромосферы. Согласно работе [6] профили линии Н сильно изменялись на протяжении развития исследуемой нами вспышки. Изменялась их центральная интенсивность, асимметрия, протяженность крыльев. В начальной фазе вспышки профили ровные, без обращения, по ширине мало отличаются от профиля в спектре невозмущенной фотосферы. Линия Н в спектрах выброса асимметрична, сильно уширена и сдвинута в коротковолновую часть.

В $08^h10^m51^s$, $08^h12^m44^s$ и $08^h12^m58^s$ профили линии Н в спектрах узла А двухвершинные, с обращением (рис. 7), что соответствует форме теоретических профилей, полученных с помощью численного моделирования с учетом влияния на хромосферу нетепловых электронов [7, 11]. Это может быть свидетельством высыпания электронов в хромосферу в этом узле. Однако в эти моменты большого изменения скорости горизонтального движения в фотосферных, как и в хромосферных слоях узла А, не отмечено. Значительное увеличение скорости в верхних и средних слоях фотосферы произошло спустя несколько минут, в $08^h16^m44^s$.

В работе [16] изучен гидродинамический отклик фотосферы на мощную солнечную вспышку 23 июля 2002 г. Выявлены разнонаправленные фотосферные движения со скоростью в интервалах $0.6...1$ и $-0.6...-0.7$ км/с в местах высыпания электронов. Максимум доплеровской скорости наблюдался в максимуме рентгеновского излучения в диапазоне 12—25 кэВ.

Профили, полученные для узла Б во все моменты наблюдений, не имеют обращения. Возможным механизмом возбуждения хромосферы в этом узле была теплопроводность. В хромосфере и на всех высо-

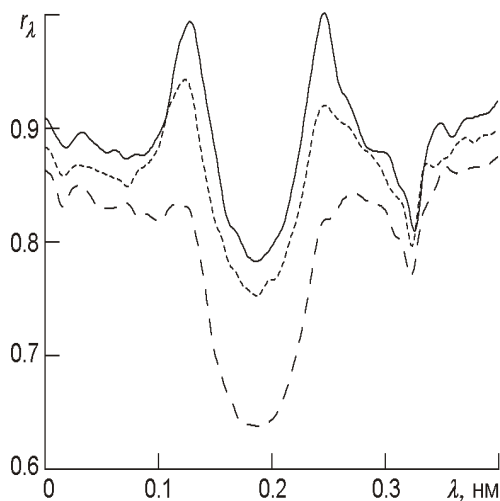


Рис. 7. Профили линии Н для разных моментов наблюдений вспышки: $08^h10^m16^s$ UT (штриховая линия), $08^h10^m51^s$ UT (пунктирная линия), $08^h12^m58^s$ UT (сплошная линия)

тах фотосферы этого узла в $08^h 10^m 51^s$ наблюдалось заметное увеличение скорости движений. Сложно определить, что явилось причиной этого изменения, так как на узел Б накладывался выброс. Однако в последующие два момента наблюдений выброс также наложен на этот узел, а подобного повышения скорости во всех слоях фотосферы не было. Возможно, увеличение скорости в узле все же было гидродинамическим откликом на вспышечное возмущение.

Исследуя движения на уровне фотосферы в месте Н -выброса, мы выявили увеличение в два раза горизонтальной скорости в начальной фазе вспышки по сравнению с ее предвспышечным значением. Со временем скорость постепенно уменьшалась от -2.5 до -1.2 км/с (табл. 3). Известно, что выбросы обычно появляются в результате магнитных пересоединений при выходе нового магнитного потока и его взаимодействия с крупномасштабным магнитным полем активной области [10, 17, 18]. Перед и при появлении хромосферных выбросов усиливаются вихревые движения в подножиях петель в фотосфере [8]. В работе [9] исследована лучевая скорость на фотосферном уровне выброса, наблюдавшегося в главной фазе вспышки 7 июня 1991 г., и никаких ее изменений не выявлено. Наши данные показывают, что изменения скорости горизонтальных движений происходили и на фотосферном уровне.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе спектрограмм изучены горизонтальные движения вещества в большом диапазоне высот фотосферы в двух узлах в начальной и главной фазах двухленточной солнечной вспышки 4 сентября 1990 г. Вспышка сопровождалась выбросом.

На протяжении вспышки, как и перед ней, вещество фотосферы и хромосферы преимущественно двигалось к наблюдателю. Горизонтальные скорости на разных уровнях фотосферы в процессе вспышки изменялись в интервале $-4...2$ км/с. Направления движений во вспышке и спокойном флоккуле, изученном в работе [15], в большинстве случаев совпадают, но амплитуда изменений скорости во вспышке больше.

В узлах вспышки временной ход фотосферных скоростей различен, причем скорости были то больше, то меньше их предвспышечных значений.

В отдельные моменты наблюдений, особенно на начальной стадии развития вспышки, на разных высотах фотосферы направление движений было противоположным, что свидетельствует о вихревом характере движений.

Резкое увеличение скорости хромосферных и фотосферных движений в узле Б наблюдалось примерно в максимуме рентгеновского излучения в диапазоне $0.05—0.4$ нм, а в узле А — через несколько минут.

На фотосферном уровне H α -выброса также происходило изменение скорости горизонтальных движений. В начальной фазе вспышки скорость увеличена по сравнению с ее величиной перед вспышкой и в ее узлах примерно на 1—1.5 км/с.

Авторы благодарят В. Л. Костюченко за фотометрию спектрограмм вспышки.

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 профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № 87Р.)
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
4. Данилевський В. О., Єрємін 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.
5. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45. С. 86—99.
6. Пасечник М. М. Рух хромосферної речовини активної області під час спалаху з викидом // Вісн. Київ. нац. ун-ту. ім. Тараса Шевченка. Астрономія.—2003.—Вип. 39—40.—С. 13—16.
7. Canfield R. C., Gunkler T. A., Ricchiazzi P. J. The H α spectral signatures of solar flare nonthermal electrons, conductive flux, and coronal pressure // *Astrophys. J.*—1984.—**282**, N 1.—P. 296—307.
8. Canfield R. C., Reardon K. P., Leka K. D., et al. H α surges and X-ray jets in AR 7260 // *Astrophys. J.*—1996.—**464**, N 2.—P. 1016—1029.
9. 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**, N 1.—P. 625—637.
10. Chen H. D., Jiang Y. C., Ma S. L. Observations of H α surges and ultraviolet jets above satellite sunspots // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**478**, N 3.—P. 907—913.
11. Fang C., Henoux J. C., Gan W. Q. Diagnostics of non-thermal processes in chromospheric flares. I. H α and Ca II K line profiles of an atmosphere bombarded by hecta keV electrons // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**274**, N 3.—P. 917—922.
12. Gorbachev V. S., Somov B. V. Photospheric vortex flows as a cause for two-ribbon flares.— A topological model // *Solar Phys.*—1988.—**117**, N 1.—P. 77—88.
13. Harvey K. L., Harvey J. W. A study of the magnetic and velocity fields in an active region // *Solar Phys. J.*—1976.—**47**, N 1.—P. 233—246.
14. Keil S. L., Balasubramaniam K. S., Bernasconi P., et al. Observations of active region dynamics: preflare flows and field observations // *ASP Conf. Ser.*—1994.—**68**.—P. 265—281. Solar Active Region Evolution: Comparing Models with Observations / Eds K. S. Balasubramaniam, G. W. Simon).
15. Kondrashova N. N. Line-of-sight velocities in a flaring active region // *Kinematics and Physics Celest. Bodies. Suppl.*—2005.—N 5.—P. 179—182.

16. *Kosovichev A. G.* The cause of the photospheric and helioseismic responses to solar flares: high-energy electrons or protons? // *Astrophys. J.*—2007.—**670**, N 1.—P. L65—L68.
17. *Kurokawa H., Kawai G.* H surge activity at the first stage of magnetic flux emergence // *ASP Conf. Ser.*—1993.—**46**.—P. 507. (The magnetic and velocity fields of solar active regions / Eds H. Zirin, G. Ai, H. Wang).
18. *Kurokawa H., Liu Y., Sano S., Ishii T. T.* Observation of magnetic field reconnection at the base of EFR surges // *ASP Conf. Ser.*—2007.—**369**.—P. 347. (Eds K. Shibata, Sh. Nagata, T. Sakurai).
19. *Moon Y.-J., Chae J., Choe G. S., et al.* Flare activity and magnetic helicity injection by photospheric horizontal motions // *Astrophys. J.* 2002. **574**, N 2. P. 1066—1073.
20. *Moon Y.-J., Chae J., Wang H., et al.* Impulsive variations of the magnetic helicity change rate associated with eruptive flares // *Astrophys. J.*—2002.—**580**, N 1.—P. 528—537.
21. *Moon Y.-J., Chae J., Park Y. D.* Magnetic helicity changes of solar active regions by photospheric horizontal motions // *J. Korean Astron. Soc.*—2003.—**36**.—S. 37—44.
22. *Moore C. E., Minnaert M.G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
23. *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al.* VALD: The Vienna atomic line data base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. **112**, N 3. P. 525—535.
24. *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.
25. *Solar Geophys. Data.*—1991.—**559**.—P. II.
26. *Somov B. V., Kosugi T., Hudson H. S., et al.* Magnetic reconnection scenario of the Bastille Day 2000 flare // *Astrophys. J.*—2002.—**579**, N 2.—P. 863—873.

Поступила в редакцию 13.11.08