

УДК 523.985.3

Н. Н. Кондрашова¹, В. С. Прокудина²

¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 ГСП Киев, ул. Академика Заболотного, 27

² Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
119992, Москва, Университетский проспект 13

Движения хромосферного вещества в мощной солнечной вспышке

Приведены результаты анализа H α -фильтрограмм, спектрограмм, а также рентгеновского и радиоизлучения мощной солнечной двухленточной вспышки в период ее наибольшего энерговыделения. По спектрограммам изучены изменения хромосферного поля лучевых скоростей в процессе вспышки в разных ее узлах. Эти данные сопоставлены с вариациями интенсивности потоков жесткого рентгеновского излучения и микроволнового излучения на длине волны 6 см. Выявлено, что перед максимумами и во время максимумов интенсивности жесткого рентгеновского излучения во вспышечных узлах преобладали нисходящие потоки хромосферного вещества.

РУХИ ХРОМОСФЕРНОЇ РЕЧОВИНИ У ПОТУЖНОМУ СОНЯЧНОМУ СПАЛАХУ, Кондрашова Н. М., Прокудіна В. С. — Наведено результати аналізу H α -фільтрограм, спектрограм, а також рентгенівського і радіовипромінювання потужного сонячного двострічкового спалаху у період його найбільшого енерговиділення. За спектрограмами вивчено зміни хромосферного поля променевих швидкостей у процесі спалаху в різних його вузлах. Ці дані зіставлено з варіаціями інтенсивності потоків жорсткого рентгенівського випромінювання і мікрохвильового випромінювання на довжині хвилі 6 см. Виявлено, що перед максимумами та під час максимумів інтенсивності жорсткого рентгенівського випромінювання у спалахових вузлах переважали низхідні рухи хромосферної речовини.

CHROMOSPHERIC MOTIONS IN A LARGE SOLAR FLARE, by Kondrashova N. N., Prokudina V. S. — We present the results of the analysis of large two-ribbon solar flare H α -images, spectra as well as X-ray and radio emissions for the most energy release period. We study variations of the chromospheric motion line-of-sight velocities during the flare in its different kernels. They are compared with the variations of the hard X-ray and microwave emission at a wavelength of 6 cm. Some chromospheric downflows are revealed in the flare kernels before and at the maxima of the hard X-ray emission.

ВВЕДЕНИЕ

Среди проявлений солнечной активности с точки зрения энерговыделения и влияния на земные процессы наибольший интерес представляют мощные вспышки. В оптическом диапазоне такие события наблюдаются в виде двухленточной вспышки, на H_{α} -фильмограммах они видны как протяженные развивающиеся ленты, представляющие собой основания аркад корональных и хромосферных петель. Эмиссионные ленты расположены вдоль нейтральной линии магнитного поля, где обычно лежит волокно, видимое в поглощении.

Энергия, реализуемая во вспышках, накапливается в магнитном поле и в результате магнитных пересоединений высвобождается в виде потоков тепла и ускоренных частиц (протонов и электронов), гидродинамических течений, волн. В импульсной фазе вспышек вследствие воздействия электронных пучков, тепловых потоков происходит нагрев лежащих ниже слоев атмосферы Солнца, возникает разбаланс давления [17, 26, 29, 33, 34]. Нагретая хромосферная плазма испаряется в корону. Наблюдается резкое увеличение интенсивности излучения в разных диапазонах спектра. В работах [11, 18, 21, 37, 40—42], основанных на наблюдениях с высоким временным разрешением, выявлена временная корреляция между появлением эмиссии в жестком рентгеновском диапазоне (HXR) и повышением интенсивности излучения в линии H_{α} . Результаты статистического исследования большого количества вспышек [38] показали, что начало H_{α} эмиссии связано с импульсной фазой ускорения частиц. Эти работы свидетельствуют о том, что потоки нетепловых частиц непосредственно нагревают хромосферную плазму, вызывая эмиссию в линии H_{α} .

Кенфилд и др. [7] рассчитали профили линии H_{α} для хромосферы, подвергнувшейся нагреву вследствие воздействия на нее потоков нетепловых электронов, тепловых потоков, а также при условии высокой плотности коронального вещества в области ускорения частиц. Профили линии H_{α} с учетом воздействия на хромосферу пучков нетепловых электронов вычислялись также в работах [12, 13]. Эти профили отличаются наличием центрального обращения и большой шириной. Изменения формы профилей вызваны возбуждением и ионизацией водородной плазмы. Таким образом, по виду профилей линии H_{α} можно диагностировать механизм переноса освобожденной энергии: наличие нетепловых эффектов, теплопроводность и величину корональной плотности. В работах [5, 10, 14] выполнена подобная диагностика с привлечением данных о потоках рентгеновского и микроволнового излучения. В этих работах, а также в работе [23] обнаружено, что в разных узлах одной и той же вспышки возможны разные механизмы нагрева хромосферы.

В результате численного моделирования отклика хромосферы на потоки нетепловых электронов [26, 29, 34 и др.] показано, что в ней могут образовываться плотные, холодные конденсации, движущиеся вниз [16, 17]. Эти конденсации, согласно работе [17], появляются при больших энергиях пучков электронов, когда испарение носит взрывной характер. Согласно оценкам ожидаемое время жизни конденсаций — примерно 1 мин. В работе [6] были рассчитаны профили линии H_{α} , изменяющиеся во времени из-за влияния на хромосферу проходящих через нее сгустков, и показано, что спустя несколько секунд после воздействия электронных пучков вследствие появления в хромосфере нисходящих потоков в спектральных линиях должна появиться красная асимметрия.

Спектральные наблюдения [8, 10, 19, 22—25, 28, 36, 41] подтверждают

теоретическое предсказание. Выявленные в импульсной фазе вспышек движения хромосферного вещества вниз со скоростью, иногда достигающей 100 км/с, как и восходящие корональные потоки, считаются проявлениями хромосферного испарения. Из наблюдений установлено, что время жизни конденсаций в 2—4 раза больше предсказанного, что в работе [16] объясняется наложением на луче зрения нескольких конденсаций.

Одна из наиболее известных и изученных больших солнечных вспышек — двухленточная вспышка 3В/X1 16 мая 1981 г. [1, 2, 15, 20, 31, 39 и др.]. Эта вспышка относится к продолжительным событиям (LDE). Ее излучение наблюдалось в разных длинах волн, включая оптический, рентгеновский и радиодиапазоны. Выделение энергии в процессе вспышки происходило неоднократно и наблюдалось в различных участках активной области [2, 15, 20]. Мы поставили своей целью изучить особенности поля хромосферных лучевых скоростей во время наибольшего энерговыделения вспышки.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В качестве наблюдательного материала были взяты спектры вспышки и ее изображения в линии H_{α} (рис. 1). Согласно данным Solar Geophysical Data [32] рассматриваемая вспышка началась в 8^h10^m UT. H_{α} -филтрограммы были получены в Высокогорной экспедиции ГАИШ МГУ (высота 3000 м) с использованием интерференционно-поляризационного H_{α} -филтра «Оптон». Ширина полосы пропускания филтра составляла 0.025 нм, сканировалась область спектра в пределах ± 0.3 нм от центра линии H_{α} . Спектральные наблюдения вспышки проведены на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-5 ГАО НАНУ в Киеве. Они сопровождались фотографированием

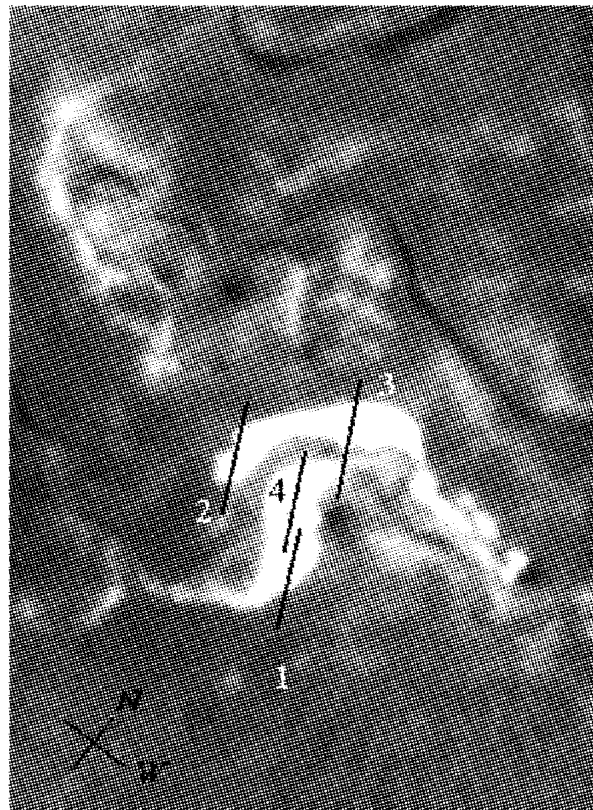


Рис. 1. H_{α} -филтрограмма вспышки 16 мая 1981 г., полученная на Высокогорной станции ГАИШ МГУ в 8^h43^m UT. Линией отмечены положения щели спектрографа солнечного горизонтального телескопа АЦУ-5 ГАО НАНУ для моментов наблюдений: 1 — в 8^h18—27^m UT южной ленты, 2 — в 8^h32—34^m северной ленты, 3 — в 8^h38—41^m северной ленты, 4 — 8^h42—46^m южной ленты

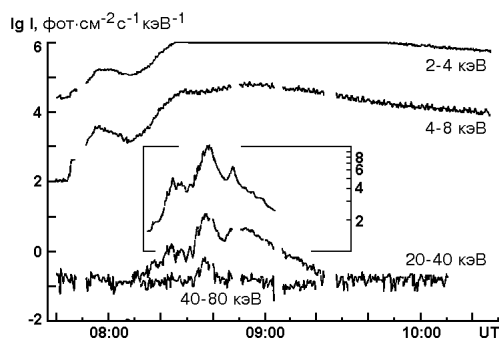
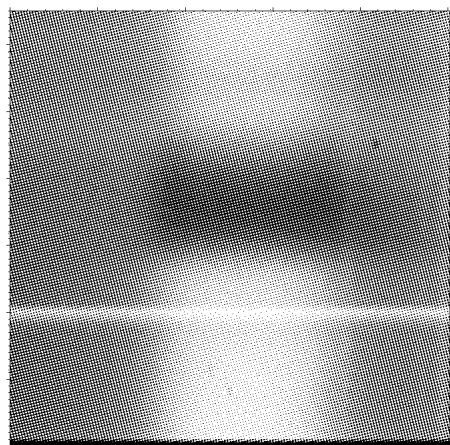


Рис. 2. Спектрограмма вспышки, включающая линию H_{α} , полученная в $8^{\text{h}}38^{\text{m}}11^{\text{s}}$ UT

Рис. 3. Изменения потоков жесткого и мягкого рентгеновского излучения, а также радиоизлучения на длине волны 6 см в течение вспышки 16 мая 1981 г. из работы [15]

активной области с помощью H_{α} -фильтра Halle на киноплёнку, причем спектрограммы и фильтрограммы получались одновременно. В процессе наблюдений в щель спектрографа поочередно попадало излучение от разных, по возможности наиболее ярких, узлов вспышки (рис. 1). На рис. 2 приведена спектрограмма одного из таких узлов для момента наблюдений $8^{\text{h}}38^{\text{m}}11^{\text{s}}$ UT.

Мы анализировали также данные наблюдений в рентгеновском и радиодиапазонах на ИСЗ «Прогноз-8» и радиотелескопе в Вестерборке [2, 15]. Согласно этим данным (рис. 3) в $8^{\text{h}}10^{\text{m}}$ UT начался рост мягкого и жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 2—4, 4—8, 20—40 кэВ, а также потока радиоизлучения на длине волны 6 см. В $8^{\text{h}}22^{\text{m}}$ UT был зарегистрирован первый максимум потока жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, а в $8^{\text{h}}39^{\text{m}}$ UT — основной максимум, во время которого наблюдалось также излучение с энергией 40—80 кэВ. Последний максимум зарегистрирован в $8^{\text{h}}46^{\text{m}}$ UT. Из анализа временных изменений потоков жесткого рентгеновского и микроволнового излучения [2] следует, что в течение вспышки имело место несколько импульсных процессов в разных местах активной области.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВСПЫШКИ

Активная область, в которой возникла вспышка, имела сложную структуру магнитного поля, изменявшуюся в течение нескольких дней. Согласно нашим наблюдениям можно выделить несколько стадий развития вспышки — предвспышечную, импульсную и главную. В предвспышечной стадии наблюдалась активизация отдельных эмиссионных узлов и подъем темного волокна, расположенного вдоль линии раздела полярностей магнитного поля (ЛРП). Активизация волокна и его движение предшествовали развитию вспышки. По обе стороны от ЛРП сформировались вспышечные эмиссионные ленты. Эти ленты являются основаниями хромосферной и корональной аркады петель, обычно наблюдаемой в далеком ультрафиолете и мягком рентгене. В процессе развития вспышки они расходились, вытягивались, изменялась их площадь и интенсивность в линии H_{α} . Во время основного

максимума жесткого рентгеновского излучения вспышечные ленты, видимые на H_{α} -фильмограммах, имели наибольшую яркость и площадь. Эмиссионные ленты были видны при смещениях полосы пропускания фильтра в крылья линии H_{α} 0.15—0.2 нм. После третьего максимума появилась система арочных H_{α} -петель, видимых в поглощении при смещениях в красное крыло линии H_{α} . Вспышечные ленты ослабевали в течение нескольких часов.

ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ХРОМОСФЕРЫ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ ВСПЫШКИ

На основе спектральных наблюдений были изучены движения хромосферного вещества в разных узлах вспышки в процессе ее развития. Спектры были профотометрированы с помощью автоматического двумерного микрофотометра [3]. Лучевые скорости определялись по доплеровским смещениям центра линии H_{α} в спектрах относительно ее положения в лабораторном спектре [30] с использованием близлежащих теллурических линий. При этом учитывались поправки за вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, а также гравитационное смещение. Погрешность измерений скорости составляет 0.75 км/с. Фотометрические сечения сделаны с шагом 0.1 мм вдоль щели спектрографа, что соответствует расстоянию на поверхности Солнца 870 км.

На рис. 1 (сечение 1) показано положение щели спектрографа в первые моменты наблюдений $8^h18^m-8^h22^m$. В это время происходил рост жесткого рентгеновского излучения и радиопотока на длине волны 6 см. Щель спектрографа пересекала южную ленту, в которой в $8^h18^m30^s$ начал формироваться самый большой узел вспышки. Согласно [15, рис. 13] этот узел находился вблизи мест, где наблюдались всплески излучения на длине волны 6 см, возможно, в основании пересоединяющейся петли.

Лучевые скорости $V_{\text{луч}}$ хромосферного вещества для указанных выше моментов наблюдений приведены на рис. 4, а. Положительные значения лучевой скорости соответствуют смещениям линии в длинноволновую часть спектра. По оси абсцисс отложены номера N разрезов спектров (с юга на север, в данном случае от внешнего к внутреннему краю узла вспышки). В нижней части рисунка показан ход интенсивности I в ядре линии H_{α} (в относительных единицах). Скорости не превышали 5 км/с. Можно отметить их колебания вдоль участка, вырезаемого щелью спектрографа.

В $8^h18^m27^s$ скорости имели положительные значения, что соответствует опусканию вещества. На внешней границе ленты они значительно больше, чем на внутреннем краю вспышечного узла. К следующим моментам наблюдений $8^h21^m15^s$ и $8^h22^m29^s$ вспышечная лента сильно расширилась. Скорость уменьшилась, а участки опускающегося вещества уже соседствовали с участками, где происходил его подъем. Заметно увеличение колебаний скорости вдоль участка, вырезаемого щелью, в $8^h22^m29^s$, особенно на внешней границе ленты.

Следующий момент наблюдения этого же яркого узла южной ленты $8^h25^m20^s$ тоже относится к первому всплеску жесткого рентгеновского излучения ($E = 20...40$ кэВ) и радиопотока на длине волны 6 см. Как и в предыдущие моменты наблюдений, скорости не превышали 5 км/с (рис. 4, б). В местах наибольшей интенсивности вспышки в линии H_{α} хромосферное вещество опускалось. В $8^h26^m27^s$, на спаде пика, скорость нисходящего потока уменьшилась, а в $8^h27^m43^s$ опускание сменилось подъемом.

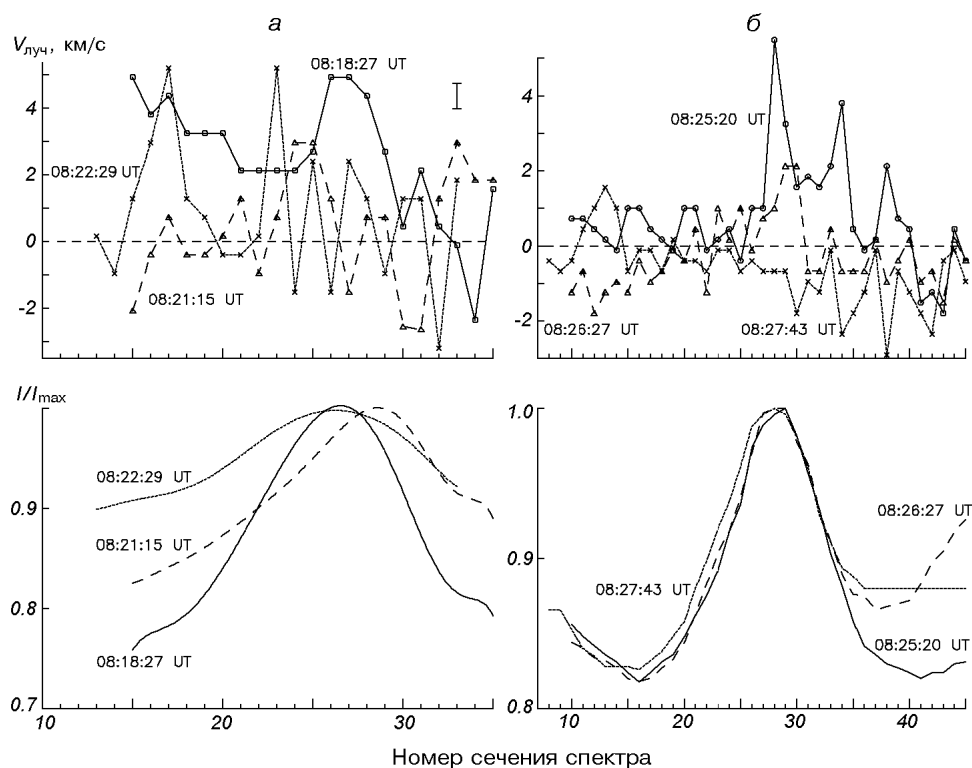


Рис. 4. Изменения лучевой скорости движения хромосферного вещества и интенсивности линии H_{α} (в относительных единицах) в южной ленте вдоль щели спектрографа по направлению с юга к северу: *а* — для моментов наблюдений $8^{\text{h}}18^{\text{m}}27^{\text{s}}$ UT (сплошная линия, кружки), $8^{\text{h}}21^{\text{m}}15^{\text{s}}$ UT (штриховая линия, треугольники) и $8^{\text{h}}22^{\text{m}}29^{\text{s}}$ UT (пунктирная линия, крестики); *б* — для моментов $8^{\text{h}}25^{\text{m}}20^{\text{s}}$, $8^{\text{h}}26^{\text{m}}27^{\text{s}}$ и $8^{\text{h}}27^{\text{m}}43^{\text{s}}$ UT. Положительные значения скорости соответствуют опусканию вещества. По оси абсцисс отложены номера N фотометрических сечений спектра

Примерно в $8^{\text{h}}32^{\text{m}}$ начались изменения в северной ленте вспышки: постепенно увеличивалась ее яркость, к западу от ленты разгорались новые узелки. Согласно [15, 39] происходило взаимодействие и пересоединение петель, соединяющих ленты. По-видимому, в результате этих процессов в $8^{\text{h}}32^{\text{m}}40^{\text{s}}$ начался второй импульсный всплеск жесткого рентгеновского излучения ($E = 20\text{--}80$ кэВ) и радиоизлучения в длине волны 6 см. Эмиссионная лента хорошо видна на H_{α} -фильтрограммах, полученных в крыле линии при смещении полосы пропускания фильтра 0.1—0.15 нм от центра линии (рис. 5), что согласно [2] может быть следствием высыпания электронов из области ускорения и их воздействия на хромосферу. Следует отметить, что при обработке H_{α} -фильтрограмм вспышки методом эквиденсит в лентах были выделены цепочки эмиссионных элементов с размерами порядка $20''$ [2]. Можно предположить, что эти элементы — основания магнитных петель, по которым двигались электроны.

Положение щели спектрографа для моментов наблюдений $8^{\text{h}}32^{\text{m}}$ — $8^{\text{h}}34^{\text{m}}$ UT дано на рис. 1 (сечение 2), а также на рис. 5, где приведено H_{α} -изображение вспышки, полученное в $8^{\text{h}}33^{\text{m}}$ в крыле линии на расстоянии 0.1 нм от ее центра. К сожалению, не было получено спектров западного края северной ленты, где происходили основные процессы энергетического выделения [39]. Щель проходила через восточный край ленты, где согласно [15,

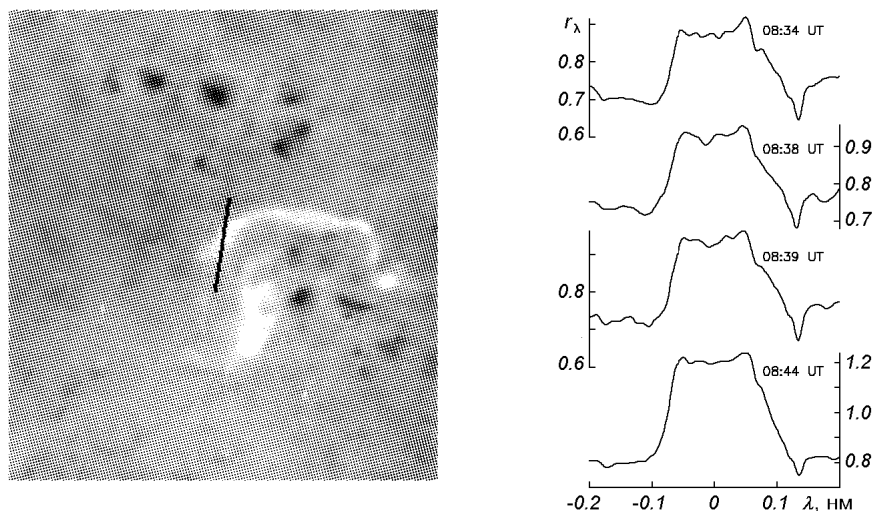


Рис. 5. Изображение вспышки в линии H_{α} , полученное в $8^{\text{h}}33^{\text{m}}$ со смещением полосы пропускания фильтра в левое крыло на 0.1 нм

Рис. 6. Профили линии H_{α} для разных моментов наблюдений вспышки

рис. 13] находилось одно из предполагаемых мест магнитных соединений.

На рис. 6 приведены некоторые профили линии H_{α} для разных моментов наблюдений вспышки, в том числе профиль для момента $8^{\text{h}}34^{\text{m}}19^{\text{s}}$. Этот профиль асимметричный, двухвершинный и имеет протяженные крылья. Вариации лучевых скоростей для этого периода наблюдений показаны на рис. 7, а. Внешний край ленты на рисунке находится справа. Скорости в самом ярком месте вспышечного узла имели преимущественно положительные значения. На северной границе узла заметны колебания скоростей и смена направления движения вещества со временем — к $8^{\text{h}}34^{\text{m}}$ УТ преобладали нисходящие потоки. На внешней границе ленты колебания снова больше, чем на внутренней, как и в предыдущем случае.

Фотографирование спектров северной ленты продолжалось и в $8^{\text{h}}38^{\text{m}}$ — $8^{\text{h}}41^{\text{m}}$, когда щель спектрографа пересекала другой поярчавший узел, расположенный ближе к западному краю этой ленты (рис. 1, сечение 3). К первому моменту наблюдений этого узла лента уже достигла тени головного пятна. В $8^{\text{h}}39^{\text{m}}$ яркость и площадь вспышечных лент, интенсивность жесткого и мягкого рентгеновского и радиоизлучений были максимальными. В течение максимума вспышки наблюдались четыре радиовсплеска из разных участков вспышки [15]. Обе ленты были видны в эмиссии при смещениях полосы пропускания фильтра 0.15—0.2 нм от центра линии H_{α} , что может свидетельствовать о проникновении электронов на большую глубину атмосферы Солнца, чем в предыдущие моменты. Профили линии H_{α} (рис. 6), как и в предыдущем случае, имели протяженные крылья, а эмиссия в центре линии была усилена. В местах наибольшей интенсивности линии H_{α} имело место опускание хромосферного вещества (рис. 7, б). Следует отметить, что на внешней границе ленты (справа на рисунке), как и в предыдущие моменты ее наблюдений, происходили резкие колебания скоростей.

В $8^{\text{h}}43^{\text{m}}$ — $8^{\text{h}}46^{\text{m}}$ были получены спектры большого яркого узла южной ленты (рис. 1, сечение 4, к северу от предыдущего сечения этой ленты). В

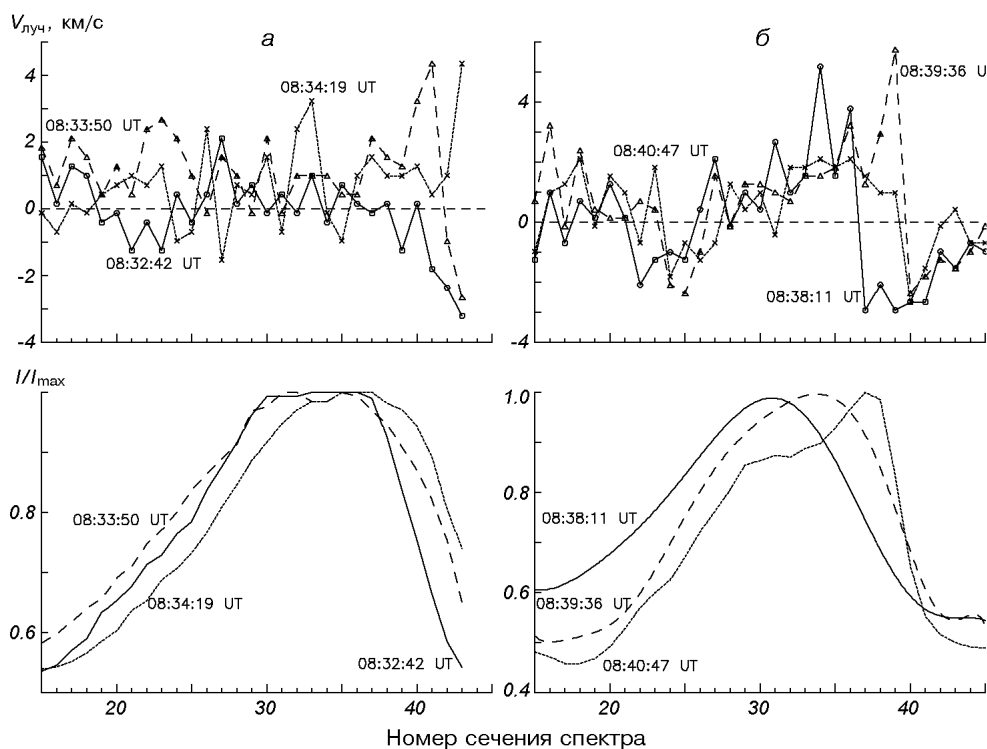


Рис. 7. То же, что на рис. 4: *a* — в северной ленте для моментов $8^{\text{h}}32^{\text{m}}42^{\text{s}}$, $8^{\text{h}}33^{\text{m}}50^{\text{s}}$ и $8^{\text{h}}34^{\text{m}}19^{\text{s}}$ UT; *б* — в другом месте северной ленты для моментов $8^{\text{h}}38^{\text{m}}11^{\text{s}}$, $8^{\text{h}}39^{\text{m}}36^{\text{s}}$ и $8^{\text{h}}40^{\text{m}}47^{\text{s}}$ UT

$8^{\text{h}}43^{\text{m}}20^{\text{s}}$ наблюдалось усиление эмиссии в радиодиапазоне, соответствующее этому N_{α} -поярчению [15]. В $8^{\text{h}}46^{\text{m}}$ был зарегистрирован третий максимум жесткого рентгеновского излучения. В этот период наблюдений вспышечная лента была очень яркой и хорошо видна в крыльях N_{α} на расстоянии 0.1 нм (рис. 8) и более от центра линии. Профиль линии N_{α} (рис. 6) имел такую же форму, как профили для предыдущих моментов наблюдений.

В первые три момента наблюдений узла в нем преобладали нисходящие потоки со скоростью примерно 1 км/с (рис. 9). В $8^{\text{h}}46^{\text{m}}49^{\text{s}}$, после максимума интенсивности жесткого рентгеновского излучения, в соседнем участке того же узла наблюдался преимущественный подъем хромосферного вещества. Как упоминалось выше, на N_{α} -фильтрограммах появились темные петли, соединяющие ленты. В дальнейшем во вспышке согласно [31] наблюдался длительный подъем вещества, связанный с мягким испарением хромосферы, вызванным воздействием на нее потоков тепла и ускоренных частиц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство эмиссионных профилей линии N_{α} в спектрах рассматриваемой вспышки — двухвершинные, с широкими крыльями. Их вид соответствует форме теоретических профилей, полученных из вычислений с учетом влияния на хромосферу нетепловых электронов [7, 12, 13]. Вероятно, этот факт, а также то, что рассматриваемые узлы вспышки хорошо видны через фильтр в далеких крыльях линии N_{α} , может быть свидетельством высыпа-

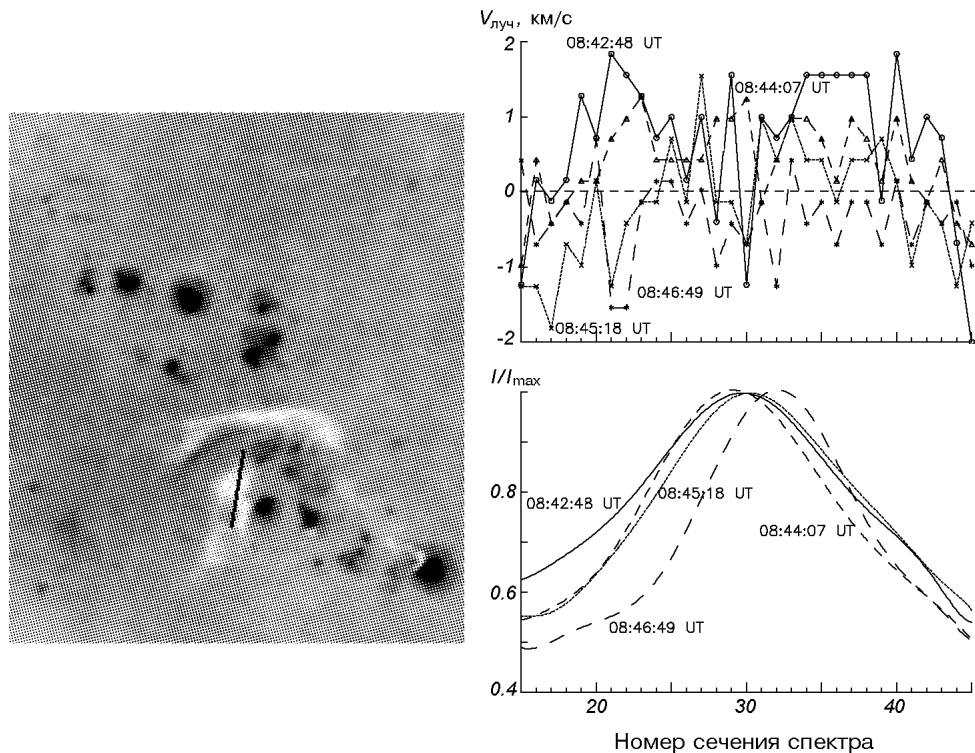


Рис. 8. Изображение вспышки в линии H_{α} , полученное в $8^{\text{h}}45^{\text{m}}$ со смещением полосы пропускания фильтра в правое крыло на 0.1 нм

Рис. 9. То же, что на рис. 4, в другом узле южной ленты для моментов $8^{\text{h}}42^{\text{m}}48^{\text{s}}$, $8^{\text{h}}44^{\text{m}}07^{\text{s}}$, $8^{\text{h}}45^{\text{m}}18^{\text{s}}$ и $8^{\text{h}}46^{\text{m}}49^{\text{s}}$ UT

ния электронов в хромосферу в этих узлах. Из сравнения наблюдаемых и теоретических [7] профилей можно сделать вывод, что поток электронов не превышал $100 \text{ Дж см}^{-2}\text{с}^{-1}$, а корональное давление в области ускорения частиц было небольшим.

Лучевые скорости в данной работе определялись по доплеровским смещениям центра линии H_{α} , т. е. для самых верхних слоев ее формирования. Именно в центре линии в первую очередь можно ожидать заметных изменений, связанных с хромосферной конденсацией. Однако нами получено, что во все моменты наблюдений скорость не превышала $\pm 5 \text{ км/с}$. В то же время профили линии в спектрах северной ленты имели сильно выраженную красную асимметрию, что может быть следствием быстрого опускания вещества. Из расчетов теоретических профилей и их сравнения с наблюдениями [1] следует, что в $8^{\text{h}}33^{\text{m}}$ и $8^{\text{h}}39^{\text{m}}$ скорость опускания могла достигать $50\text{--}90 \text{ км/с}$. Эти значения скоростей относятся к более низким слоям хромосферы, чем измеренные нами. Опускание вещества с такой скоростью может быть проявлением прохождения через эти слои в это время хромосферных конденсаций. Следует отметить, что и в работе [11] по смещениям центра линии H_{α} в спектре вспышек получены нулевые или небольшие значения лучевых скоростей, тогда как по смещениям бисектора в крыльях линии выявлены нисходящие потоки со скоростью $30\text{--}40 \text{ км/с}$.

Сопоставим полученные данные об изменениях лучевых скоростей с временными профилями интенсивности жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения в длине волны 6 см. Можно заметить, что перед максимумами и в максимумах всплесков жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения в длине волны 6 см во вспышечных узлах на уровне образования ядра линии H_{α} происходило преимущественное опускание хромосферного вещества. Отметим, что в работах [4, 9] сообщается о нисходящих потоках фотосферного вещества в максимумах рентгеновского излучения яркой вспышки 1В/М2.2 3 сентября 1990 г.

Интересен также факт увеличения амплитуды и усиления колебаний скоростей на внешних границах вспышечных узлов, где интенсивность в линии H_{α} значительно меньше, чем в центре узла. В работе [35] обнаружены вдоль внешних границ лент короткоживущие мелкомасштабные элементы, в спектре которых линия H_{α} смещена в длинноволновую сторону, и сделан вывод, что внешние границы лент — основания вновь пересоединяющихся горячих корональных петель, а внутренние — низких, холодных. В работе [27] выявлено, что на внешних краях лент спектр НХР более жесткий (электроны имеют большую энергию), чем на внутренних границах. Максимальные скорости опускания хромосферного вещества на внешних участках лент найдены в работах [23, 24] для импульсной фазы вспышки.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе спектрограмм и H_{α} -фильтрограмм изучены особенности динамики мощной солнечной вспышки 16 мая 1981 г. По доплеровским смещениям центра линии H_{α} измерены лучевые скорости хромосферного вещества в разных узлах вспышки, получены их распределения вдоль щели спектрографа для разных моментов в период наибольшего энерговыделения. Лучевые скорости не превышали ± 5 км/с. Полученные данные о лучевых скоростях во вспышечных узлах сопоставлены с временными профилями интенсивности жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения в длине волны 6 см. Перед максимумами и в максимумах всплесков жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения в длине волны 6 см во вспышечных узлах происходило опускание хромосферного вещества. На внешних границах вспышечных лент наблюдались резкие изменения скоростей.

Авторы благодарят В. Л. Костюченко за фотометрию спектрограмм вспышки и отмечают, что эта работа была бы невозможна без значительного вклада В. Г. Парусимова. Авторы благодарны рецензенту за ценные комментарии.

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. Ликин О. Б., Писаренко Н. Ф., Прокудина В. С. О некоторых особенностях всплесков рентгеновского излучения и их взаимосвязи с эмиссией в линии H_{α} на примере вспышки 16 мая 1981 г. // Космич. исслед.—1994.—32, вып. 6.—С. 165—171.
3. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
4. Черногор С. Н., Аликаева К. В. Поле лучевых скоростей в H_{α} -петлях в процессе развития яркой солнечной вспышки // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 417—430.

5. *Acton L. W., Canfield R. C., Gunkler T. A., et al.* Chromospheric evaporation in a well-observed compact flare // *Astrophys. J.*—1982.—**263**, N 1.—P. 409—422.
6. *Canfield R. C., Gayley K. G.* Impulsive H_{α} diagnostics of electron-beam-heated solar flare model chromospheres // *Astrophys. J.*—1987.—**322**, N 2.—P. 999—1009.
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., 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.
9. *Chornogor S. N., Alikeeva K. V.* Line-of-sight velocity variations in the low-temperature layers of the H_{α} flare loops // *Multi-wavelength investigations of solar activity: Proc. IAU Symp. N 223 / Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev.* — Cambridge: Univ. Press, 2005.—P. 235—236.
10. *de la Beaujardiere J.-F., Kiplinger A. L., Canfield R. C.* Coordinated spectral and temporal H_{α} observations of a solar flare // *Astrophys. J.*—1992.—**401**, N 2.—P. 761—767.
11. *Ding M. D., Fang C., Huang Y. R.* Analysis of 2-D flare spectra: velocity fields derived from H_{α} line asymmetries // *Solar Phys.*—1995.—**158**, N 1.—P. 81—93.
12. *Dinh Q.-V.* Spectral analysis of solar flares. II. Non-LTE analysis of hydrogen spectra // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1980.—**32**—P. 515—532.
13. *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.
14. *Fang C., Xu Z., Ding M. D.* Spectral diagnostics of non-thermal particles in the solar chromosphere // *J. Korean Astron. Soc.*—2003.—**36**—P. 55—61.
15. *Farnik F., Kaastra J., Kalman B., et al.* X-ray, H_{α} , and radio observations of the two-ribbon flare of 16 May, 1981 // *Solar Phys.*—1983.—**89**, N 2.—P. 355—378.
16. *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.*—1989.—**346**, N 2.—P. 1019—1029.
17. *Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N.* Flare loop radiative hydrodynamics. VI. Chromospheric evaporation due to heating by nonthermal electrons // *Astrophys. J.*—1985.—**289**, N 1.—P. 425—433.
18. *Gan W.-Q., Fang C.* Combined study between the chromospheric flare models and hard X-ray observation // *Solar Phys.*—1990.—**125**, N 2.—P. 333—342.
19. *Ichimoto K., Kurokawa H.* H_{α} red asymmetry of solar flares // *Solar Phys.*—1984.—**93**, N 1.—P. 105—121.
20. *Ishkov V. N., Markeev A. K., Fomichev V. V., et al.* Analysis of the flare of May 16, 1981 with a complex space-time structure using optical, X-ray data and radio observation // *Bull. Astron. Inst. Czech.*—1985.—**36**, N 2.—P. 81—96.
21. *Kurokawa H., Takakura T., Ohki K.* Close relationship between H_{α} and hard X-ray emissions at the impulsive phase of a solar flare // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1988.—**40**, N 3.—P. 357—367.
22. *Lee S. W., Yun H. S., Hu J., et al.* Spectral analysis of H_{α} , H_{β} , and H_{γ} lines of a white-light flare (3B/X6.1) on October 27, 1991 // *Solar Phys.*—1996.—**163**, N 2.—P. 361—370.
23. *Li J. P., Ding M. D.* Multiwavelength analysis of an X1.6 flare of 2001 October 19 // *Astrophys. J.*—2004.—**606**, N 1.—P. 583—591.
24. *Li H., Li J. P., Fang C., et al.* A multi-wavelength study of the 3B/X1.2 flare observed on 2003 October 26 // *Chin. J. Astron. Astrophys.*—2005.—**5**, N 6.—P. 645—664.
25. *Li H., You J., Du Q.* Spectroscopic properties of dynamical chromospheric processes in a confined solar flare // *Solar Phys.*—2006.—**235**, N 1/2.—P. 107—123.
26. *Livshits M. A., Badalyan O. G., Kosovichev A. G., Katsova M. M.* The optical continuum of solar and stellar flares // *Solar Phys.*—1981.—**73**, N 2.—P. 269—288.
27. *Masuda S., Kosugi T., Hudson H. S.* A hard X-ray two-ribbon flare observed with Yohkoh/HXT // *Solar Phys.*—2001.—**204**, N 1/2.—P. 55—67.
28. *Milligan R. O., Gallagher P. T., Mathioudakis M., et al.* RHESSI and SOHO CDS observations of explosive chromospheric evaporation // *Astrophys. J.*—2006.—**638**, N 2.—P. L117—L120.
29. *Nagai F., Emslie A. G.* Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares // *Astrophys. J.*—1984.—**279**, N 2.—P. 896—908.
30. *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.
31. *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.
32. *Solar Geophys. Data.*—1981.—**439**—P. 81—83.

33. *Somov B. V., Sermulina B. J., Spector A. R.* Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. II. Thermal model // *Solar Phys.*—1982.—**81**, N 2.—P. 281—292.
34. *Somov B. V., Syrovatskii S. I., Spector A. R.* Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. I. Heating by accelerated electrons // *Solar Phys.*—1981.—**73**, N 1.—P. 145—155.
35. *Svestka Z., Martin S. F., Kopp R. A.* Particle acceleration in the process of eruptive opening and reconnection of magnetic fields // *Solar and interplanetary dynamics* / Eds M. Dryer, E. Tandberg. — Hanssen, 1980.—P. 217—221.
36. *Teriaca L., Falchi A., Cauzzi G., et al.* Solar and heliospheric observatory/coronal diagnostic spectrograph and ground-based observations of a two-ribbon flare: spatially resolved signatures of chromospheric evaporation // *Astrophys. J.*—2003.—**588**, N 1.—P. 596—605.
37. *Trottet G., Rolli E., Magun A., et al.* The fast and slow H_{α} chromospheric responses to non-thermal particles produced during the 1991 March 13 hard X-ray/gamma-ray flare at ~08 UTC // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**356**, N 3.—P. 1067—1075.
38. *Veronig A., Vrsnak B., Temmer M., Hanslmeier A.* Relative timing of solar flares observed at different wavelengths // *Solar Phys.*—2002.—**208**, N 2.—P. 297—315.
39. *Vrsnak B., Ruzdjak V., Messerotti M., Zlobec P.* Evidence for interacting loop process in a phase of the May, 1981 flare // *Solar Phys.*—1987.—**111**, N 1.—P. 23—29.
40. *Wang H., Qiu J., Denker C., Spirock T., et al.* High-cadence observations of an impulsive flare // *Astrophys. J.*—2000.—**542**, N 2.—P. 1080—1087.
41. *Wulser J.-P., Canfield R. C., Acton L. W., 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.
42. *Wulser J.-P., Marti H.* High time resolution observations of H_{α} line profiles during the impulsive phase of a solar flare // *Astrophys. J.*—1989.—**341**, N 2.—P. 1088—1096.

Поступила в редакцию 17.10.05