

УДК 523.985.3

Изменения хромосферной лучевой скорости в солнечной микровспышке

У.М. Лейко¹, Н.Н. Кондрашова²

¹ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, ул. Обсерваторная 3, Киев, Украина, 04053
leikout@ukr.net

² Главная Астрономическая обсерватория НАН Украины, ул. Заболотного 27, Киев-127, Украина, 03680
kondr@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. На основе данных спектрополяриметрических наблюдений, полученных Е.В. Хоменко на франко-итальянском телескопе ТЕМИС (о. Тенерифе, Испания), изучено изменение лучевой скорости в хромосфере перед, во время и после микровспышки 4 июля 2009 г. в активной области NOAA 11024. Используются H_{α} -спектры, полученные с высоким пространственным (около $1''$) и временным (2.84 с) разрешением на протяжении 21 минуты наблюдений. Лучевые скорости были измерены по смещению в спектрах центра линии H_{α} для пяти сечений в области флоккула (вспышки) и в ее окрестностях. В начале наблюдений на протяжении 12 минут в изучаемой части активной области имели место восходящие движения вещества. Их скорости находились в пределах от -25 км/с до -4 км/с. Затем, в течение 3 минут скорости уменьшались от -14 км/с до 0 км/с. Непосредственно перед микровспышкой направление движения изменилось на противоположное. Нисходящие движения в центральной части вспышечного узла со скоростью, достигавшей 5 км/с, продолжались до максимума вспышки. После вспышки наблюдались преимущественно восходящие движения.

THE CHROMOSPHERIC LINE-OF-SIGHT VELOCITY CHANGES IN A SOLAR MICROFLARE, by U.M. Leiko, N.N. Kondrashova. The variation of the chromospheric line-of-sight velocity in the active region NOAA 11024 on 4 July 2009 before, during, and after a solar microflare is studied. The spectral observations were carried out by E.V. Khomenko with the French-Italian THEMIS telescope of the Instituto de Astrofisica de Canarias. We used high resolution H_{α} spectra obtained over 21 min. Spatial resolution was below $1''$. The time interval between the spectra was 2.84 s. Doppler velocities were measured in five cuts in the microflare location and its surroundings using the wavelength shift of the local minimum of the line profiles. We revealed strong line-of-sight velocity temporal variations in the chromosphere. During 12 min at the beginning of the observations the upflows were in all cuts of the plage before the microflare. The velocities were in the range from -25 km/s to -4 km/s. Then during 3 min the upflow velocities in the plage were decreasing in time from -14 km/s to about 0 km/s. Before the flare the direction of the motion changed and the downflows in the center of the flare region with the velocity up to 5 km/s continued till the flare maximum. The upflows were observed in the chromosphere after the flare.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, хромосфера, лучевые скорости

1 Введение

Одним из самых динамичных событий на Солнце является вспышка. В результате магнитных пересоединений освобождается огромная энергия, накопленная в магнитном поле, которая выносится из места пересоединения в виде потоков нетепловых частиц, тепла, крупномасштабных течений, волн. Распространяясь в нижние слои солнечной атмосферы, потоки вызывают испарение хромосферы, возникновение хромосферных конденсаций. Вспышки иногда сопровождаются эрупцией волокна, выбросами вещества. Движения в хромосфере солнечных вспышечно-активных областей исследовались в ряде работ (например, Коцци и др., 1996; Черногор, Аликаева, 2000; Кондрашова и др., 2001; Кондрашова, Прокудина, 2006; Бабин, Коваль, 2010; Кейс и др., 2011). Выявлены значительные изменения лучевых скоростей, связанные со вспышками. В работе (Бабин, Коваль, 2010) сообщается о сложной тонкой структуре хромосферного поля скоростей в мощной вспышке балла 2В/М2.3. В процессе вспышек может изменяться направление движения хромосферного вещества. Авторы работы (Кейс и др., 2011) предположили, что изменение направления скорости в узле вспышки балла С могло быть проявлением хромосферного испарения. Согласно работам (Коцци и др., 1996; Черногор, Аликаева, 2000), перед субвспышками и в их импульсной фазе в хромосфере наблюдались восходящие потоки. Направление движений изменилось вскоре после максимума всплеска жесткого рентгеновского излучения. Скорость нисходящих хромосферных потоков составляла около 20 км/с. Максимальные скорости наблюдались на внешних краях подножий вспышечных петель. Авторы объясняют выявленные изменения скоростей нагревом и испарением хромосферы вследствие высыпания нетепловых частиц или тепловых потоков из короны. В мощной вспышке 16 мая 1981 г. также наблюдались нисходящие потоки во время максимумов жесткого рентгеновского излучения (Кондрашова, Прокудина, 2006). Бабин и Коваль (2010) сообщают о нисходящих движениях в максимуме мощной вспышки, не сопровождавшейся высыпанием частиц. В работе (Черногор, Аликаева, 2003) выявлены квазипериодические изменения хромосферной скорости и интенсивности линии H_{α} с периодом около 3-х минут во время яркой вспышки 3 сентября 1990 г.

В данной работе представлены результаты изучения вариаций лучевой скорости в хромосфере активной области (АО) NOAA 11024, связанные с развитием микровспышки. Они получены на основе спектрального наблюдательного материала с высоким пространственным (около 1'') и временным (2.84 с) разрешением.

2 Наблюдательный материал

Для изучения движений в хромосфере АО NOAA 11024 использованы данные спектрополяриметрических наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением, полученные Е.В. Хоменко на солнечном франко-итальянском телескопе ТЕМИС (Канарские о-ва, Испания) 4 июля 2009 г. Исследуемая АО появилась на диске Солнца 29 июня 2009 г. в виде факельной площадки и быстро развивалась в биполярную группу пятен, усложнялась ее магнитная структура. В день наблюдений, 4 июля, она находилась вблизи центрального меридиана. В ней возникло множество микровспышек. В этот день были хорошие условия для наблюдений. Ширина щели спектрографа была равной 0.5'', пространственное разрешение – около 1''. Нами выбрана временная серия с фиксированной щелью, запись началась в 11:47:12 UT. В щель спектрографа попадал центральный участок активной области, находившийся примерно в области инверсии полярностей магнитного поля. Наблюдения продолжались около 21 минуты (11:47:12 UT — 12:07:40 UT). В течение этого времени было получено 436 спектров. Интервал времени между отдельными спектрами составлял 2.84 с. Детальное описание наблюдательного материала и изображение активной области приведены в работе (Кондрашова, 2013). Согласно данным спутника GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), в 11:59 UT в изучаемой АО во время наших наблюдений начался рентгеновский всплеск балла В3.1, который достиг максимума в 12:07 UT. *RHESSI (Reuven Ramaty High*



Рис. 1. H_{α} -спектры для моментов 11:50:17 UT (сверху) и 12:04:36 UT

Energy Solar Spectroscopic Imager) (Лин и др., 2002) зарегистрировал вспышку с 12:04:52 UT в полосах 3–6 keV и 12 keV. Спектры *RHESSI* не показывают наличия нетепловых частиц. Примерно в 12:03:30 UT появилось поярчение в линии H_{α} , его максимум наступил примерно в 12:04:35 UT.

В данной работе использованы спектры, включающие линию H_{α} . Спектры для моментов 11:50:17 UT и 12:04:36 UT, перед вспышкой и в ее максимуме, приведены на рис. 1. Поле зрения телескопа разделено на 3 части длиной примерно по 11 Мм. Интервалы между ними отмечены черными горизонтальными линиями. Изучаемая часть активной области расположена между этими линиями. Тонкая структура линии H_{α} в спектре, полученном перед вспышкой, свидетельствует о сильных движениях в хромосфере в месте предстоящей вспышки. В синем крыле линии виден хромосферный выброс. Выше, в области небольшой поры, в красном крыле линии имеется темная деталь. В центре участка АО расположен флоккул, в области которого через 13 минут возникла микровспышка. На этом же рисунке показана эта микровспышка во время ее максимального развития.

3 Изменение хромосферной лучевой скорости со временем

В результате обработки спектров были получены значения лучевой скорости для пяти сечений АО. Сечения располагались по спектру снизу вверх. Расстояние между сечениями составляло $1''$. Первое и пятое сечения относятся к местам вне вспышки (флоккула). Третье соответствует центру вспышки, второе и четвертое – краям области вспышки. Лучевые скорости определялись по доплеровским смещениям центра линии H_{α} в спектрах относительно их положений в лабораторном спектре с использованием близлежащих теллурических линий. Ошибка измерения скорости составляет около 0.3 км/с.

Вариации лучевой скорости приведены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что лучевая скорость в области высот формирования ядра линии H_{α} сильно изменялась со временем. В ее временном ходе заметны значительные колебания. В целом, они были синхронными по всей изучаемой области. В среднем, амплитуда колебаний составляла 4–5 км/с. В течение первой минуты наблюдений в изу-

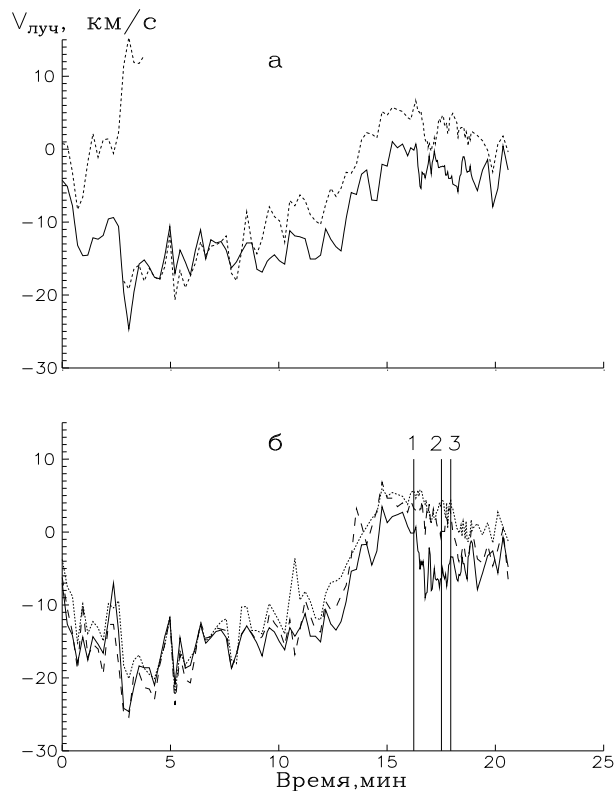


Рис. 2. Временные вариации лучевой скорости в хромосфере активной области, а – вне флоккула (вспышки) (сечение 1 – сплошная линия, 5 – штриховая линия), б – в его центре (сечение 3 – штриховая линия) и на краях флоккула (сечение 2 – сплошная линия, сечение 4 – пунктир). Положительные значения скорости соответствуют направлению движения вещества от наблюдателя. По оси абсцисс указано время в минутах, нулевой момент соответствует времени начала наблюдений (11:47:12 UT). Вертикальные линии показывают начало (1), максимум (2) и конец (3) микровспышки

чаемой области происходил подъем хромосферного вещества, причем скорость восходящего потока резко увеличивалась со временем. Возможно, это связано с выходом нового магнитного потока. Вне флоккула (рис. 2, а) в сечении 1 (сплошная линия) в течение первых трех минут скорость восходящих движений увеличилась от -4 до -25 км/с. На протяжении 9 минут она оставалась почти постоянной, а затем стала резко уменьшаться, достигнув 0 км/с. В начале вспышки она увеличилась до -4 км/с и оставалась примерно на этом уровне до конца наблюдений. При этом наблюдались колебания скорости. В сечении 5 (штриховая линия), с другой стороны от флоккула, в самом начале наблюдений ход скорости был таким же, как и в сечении 1, но скорости были значительно меньше. Через 3 минуты в линии появился второй компонент, и на протяжении одной минуты (с 11:50 UT по 11:51 UT) имелись два компонента. Скорости определены по этим двум компонентам. Они разнонаправлены (рис 2, а) и достигают для первого компонента 15 км/с, а второго -20 км/с. В соседней поре и ее окрестностях в это время наблюдались нисходящие потоки со скоростью 20 км/с. Таким образом, сечение 5 оказалось на границе двух разнонаправленных потоков, что может свидетельствовать о магнитном пересоединении (Вэлори и др., 2012). В работах (Фанг и др., 2006; Джианг и др., 2012) показано, что микровспышки могут появляться в результате магнитных пересоединений в хромосферных слоях Солнца.

После 11:51 UT в сечении 5 остался лишь второй компонент со сдвигом в короткую сторону длин волн. Скорость, измеренная по этому компоненту, далее изменялась синхронно со скоростью для первого сечения. Скорость подъема уменьшалась. Затем, через 14 минут после начала наблюдений, направление движения изменилось на противоположное. В начале вспышки скорость нисходящих движений достигла максимума (примерно 6 км/с) и затем уменьшалась до 0 км/с.

На рис. 2, б приведены скорости, полученные для области флоккула (вспышки). В этой области (сечения 2–4) в начале наблюдений происходил подъем вещества со скоростями в пределах от -6 км/с до -25 км/с. Интересно, что во время появления второго компонента в линии H_{α} в сечении 5, в области флоккула в два раза увеличилась амплитуда колебания скорости. Через 12 минут после начала наблюдений в ней началось резкое уменьшение скорости, и на 14 минуте направление движения изменилось на противоположное. Скорость нисходящих движений в центре области флоккула (сечение 3) и в сечении 4 достигла максимума (5 км/с) за 1 минуту до начала вспышки, а во время вспышки уменьшалась. После максимума вспышки в центре появились восходящие движения. В четвертом сечении (на краю вспышки) в конце наблюдений скорость равна 0 км/с. На другом краю области, в сечении 2, после начала вспышки наблюдались только восходящие потоки.

4 Выводы

В нашей работе на основе спектральных наблюдений на франко-итальянском телескопе ТЕМИС, полученных с высоким пространственным (около $1''$) и временным (2.84 с.) разрешением, изучены движения хромосферного вещества АО NOAA 11024 перед, во время и после микровспышки 4 июля 2009 г. Рассмотрено изменение лучевой скорости в области формирования ядра линии H_{α} со временем в разных частях микровспышки и в ее окрестностях. Лучевые скорости изменялись в пределах от -25 км/с до 15 км/с. Изменение лучевой скорости со временем в разных участках изучаемой области было синхронным. Наблюдались ее осцилляции с амплитудой 4–5 км/с.

В начале наблюдений в изучаемой области имели место восходящие потоки. За 12 минут перед вспышкой на одной из сторон области флоккула в течение одной минуты наблюдались сильные разнонаправленные потоки, что может свидетельствовать о магнитном пересоединении. При этом амплитуда осцилляций скорости увеличилась в два раза.

В течение трех минут перед вспышкой скорость восходящих потоков резко уменьшилась. В центре области за 1 минуту до начала вспышки изменилось направление движений, скорость опускания вещества достигла максимального значения 5 км/с. Во время вспышки скорость уменьшалась. После вспышки лучевые скорости в разных местах изучаемой области имели нулевые или небольшие отрицательные значения.

Авторы благодарят Е.В. Хоменко и группу поддержки телескопа ТЕМИС за наблюдения, Р.И. Костыка за предоставление программ обработки спектров, а также группы поддержки GOES и RHESSI за свободный доступ к данным.

Литература

- Бабин, Коваль (Babin A.N., Koval' A.N.) // *Kinem. and Phys. Celest. Bodies*. 2010. V. 26. N. 3. P. 130.
 Вэлори и др. (Valori G., Green L.M., Démoulin P., Vargas Dominguez S., van Driel-Gesztelyi L., Wallace A., Baker D., Fuhrmann M.) // *Solar Phys.* 2012. V. 278. P. 73.
 Джианг и др. (Jiang R.-L., Fang C., Chen, P.-F.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 751. N. 2. P. 11.
 Кейс и др. (Keys P.H., Jess D.B., Mathioudakis M., Keenan F.P.) // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 529. idA127. P. 5.
 Кондрашова (Kondrashova N.N.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 431. N. 2. P. 1417.
 Кондрашова Н.Н., Прокудина В.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2006. V. 22. № 4. С. 271.

- Кондрашова Н.Н, Рудникова Е.Г., Пасечник М.Н. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2001. Т. 17. № 6. С. 485.
- Коцци и др. (Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L.A.) // Astron. Astrophys. 1996. V. 306. P. 625.
- Лин и др. (Lin R.P. et al.) // Solar Phys. 2002. V. 210. N. 1. P. 3.
- Фанг и др. (Fang C., Tang Y.-H., Xu Z.) // Chin. J. Astron. Astrophys. 2006. V. 6. N. 5. P. 597.
- Чорногор С.Н., Аликаева К.В. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2000. Т. 16. № 6. С. 541.
- Чорногор С.Н., Аликаева К.В. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2003. Т. 19. № 5. С. 417.