

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 12.06.2014
ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ IRIS И RHESSI**

В.М. Садыков, И.Н. Шарыкин, А.Г. Косовичев, И.В. Зимовец, А.Б. Струминский, С. Варгас Домингес

**ANALYSIS OF PLASMA DYNAMICS IN 12.06.2014 SOLAR FLARE
FROM IRIS AND RHESSI OBSERVATIONS**

V.M. Sadykov, I.N. Sharykin, A.G. Kosovichev, I.V. Zimovets, A.B. Struminsky, S. Vargas Dominguez

Представлены результаты анализа вспышки класса M1.0, произошедшей 12 июня 2014 г. (SOL2014-06-12T21:12), по данным наблюдений с космических аппаратов IRIS и RHESSI. IRIS получал изображения и УФ-спектры высокого разрешения для почти всей вспышечной области. В результате анализа наблюдений IRIS в различных спектральных линиях обнаружен хромосферный поток плазмы с большим красным смещением (порядка 100 км/с) непосредственно перед вспышкой. Нетепловая эмиссия линии CII k переходной области наблюдается во время импульсной фазы вспышки в нескольких пространственно-локализованных точках (с характерным размером 1"). Также найдено, что линия CII k испытывает преимущественно красное смещение до, во время и после импульсной фазы вспышки. Пик интегральной эмиссии горячей (10 МК) плазмы в линии FeXXI 1354.1 А зафиксирован спустя примерно 5 мин после пика интегральной эмиссии линии CII k. Установлено, что линия FeXXI испытывает голубое смещение по периметру области, что соответствует испарению хромосферной плазмы со скоростями порядка 50 км/с. Дополнительный анализ данных RHESSI согласуется с тем, что динамика верхней хромосферы, наблюдаемой IRIS, находилась в соответствии с моделью мягкого хромосферного испарения (gentle evaporation). Обсуждаются физические механизмы, которые могли привести к наблюдаемому хромосферному испарению.

We present results of analysis of a moderate M1.0 class flare of 12 June, 2014 (SOL2014-06-12T21:12) observed by NASA's IRIS and by RHESSI. Our analysis of the IRIS data in different spectral lines reveals strong redshifted jet-like flow with the speed of ~100 km/s of the chromospheric material before the flare. Strong nonthermal emission of the CII k 1334.5 Å line, formed in the chromosphere-corona transition region, is observed at the beginning of the impulsive phase in several small (with a size of ~1 arcsec) points. It is also found that the CII k line is redshifted across the flaring region before, during and after the impulsive phase. A peak of integrated emission of the hot (1.1 MK) plasma in the FeXXI 1354.1 Å line is detected approximately 5 minutes after the integrated emission peak of the lower temperature CII k. A strong blueshift of the FeXXI line across the flaring region corresponds to evaporation flows of the hot chromospheric plasma with a speed of 50 km/s. Additional analysis of the RHESSI data supports the idea that the upper chromospheric dynamics observed by IRIS has features of "gentle" evaporation driven by heating of the solar chromosphere by accelerated electrons and by a heat flux from the flare energy release site. The possible mechanisms which led to the observed chromospheric evaporation are discussed.

Содержание

Наиболее распространенной моделью развития вспышечного процесса является так называемая Стандартная модель солнечных вспышек [Carmichael, 1964; Sturrock, 1968; Hirayama, 1974; Корр, Пнеуман, 1976]. Согласно этой модели, высокоэнергичные электроны, ускоренные в короне, выпадают в более плотные слои солнечной атмосферы (в переходную область и в хромосферу), образуя неустойчивую перегретую область высокого давления. Область перегрева начинает расширяться, и процесс расширения нагретой хромосферной плазмы вверх в корону называется хромосферным испарением. Поскольку условия в перегретой области зависят от свойств первоначального энерговыделения и определяют дальнейший процесс развития вспышки, наблюдения хромосферы и переходной области и процесса хромосферного испарения представляют особый интерес.

С недавних пор (с 24 июля 2013 г.) появилась возможность изучать плазменные потоки в солнечной хромосфере и переходной области Солнца с помощью данных, полученных миссией NASA IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) [De Pontieu et al., 2014]. IRIS получает ультрафиолетовые спектры в трех диапазонах длин волн (покрывающих сильные ультрафиолетовые линии MgII h и k, SiIV, CII и OI), а также растровые изображения поля зрения телескопа в четырех различных фильтрах с высоким пространственным (0.33"), временным (~2 с) и спек-

тральным (26–53 мÅ) разрешениями. Это позволяет детально изучить спектры в каждой точке, а также понять более глубоко и точно процесс каждого отдельного вспышечного энерговыделения. В данной работе рассматривается вспышка класса M1.0, произошедшая 12 июня 2014 г. примерно в 21:12 UT. Наблюдения данной вспышки телескопом NST (New Solar Telescope) [Goode et al., 2010] рассмотрено в докладе Шарыкина Ивана. В данной же работе анализируются наблюдения события аппаратами IRIS и RHESSI (Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager) [Lin et al., 2002].

По итогам анализа данного события могут быть выделены несколько интересных наблюдений. Во-первых, был найден джет с сильным красным смещением в верхней хромосфере прямо перед вспышкой (см. рис. 1). Для установления этого факта была рассмотрена эволюция профилей линий в одной из точек джета. Происхождение джета пока что является загадкой. Возможно, данный джет представляет собой поток плазмы из области магнитного пересоединения. Во-вторых, была зафиксирована эмиссия линии CII k в нескольких пространственно-локализованных точках (с характерным размером 1") по периметру вспышечной области (см. рис. 2). Мы считаем, что эта эмиссия инициирована ускоренными нетепловыми частицами, проникающими из короны в более плотные слои атмосферы и инициирующими нетепловую неравновесную ионизацию и возбуждение атомов.

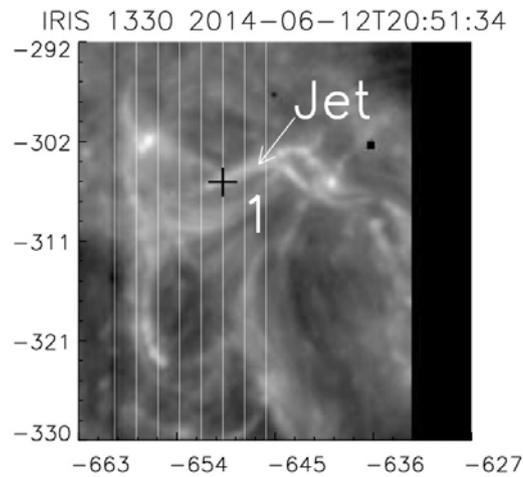


Рис. 1. Растровое изображение IRIS в канале 1330 А для момента времени 20:51:34UT. Позиции щели спектрографа IRIS показаны вертикальными белыми линиями. Черным крестиком показано местоположение характерной точки дже-та, спектры в которой изучаются детально в полной версии работы. Изображение построено в дисковой системе координат относительно центра солнечного диска в угловых секундах.

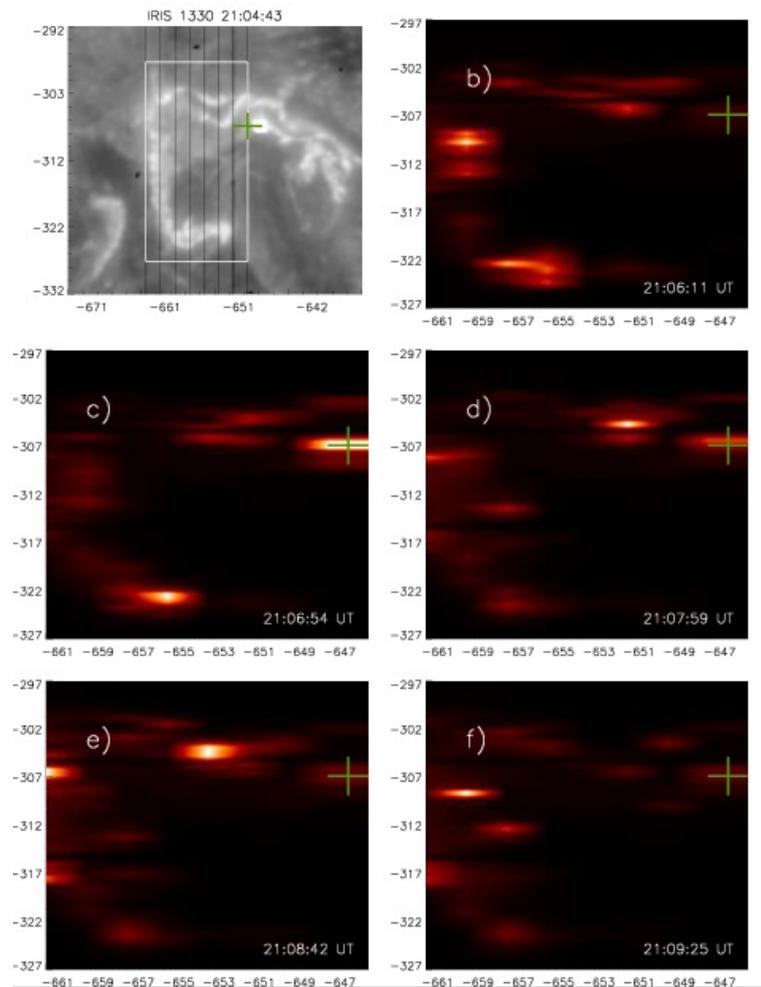


Рис. 2. (а) растровое изображение IRIS в канале 1330 А для момента времени 21:04:43 UT с отмеченными положениями щели спектрографа (черные вертикальные линии) и точкой вспышки (зеленый крестик на изображении), в которой спектры изучались детально. Белый прямоугольник соответствует области, для которой построены карты пиковой интенсивности линии СII к на панелях (b)–(f) для пяти моментов времени. Соответствующие моменты времени отмечены в правом нижнем углу каждого изображения.

В-третьих, для рассматриваемого события наблюдается стабильное красное смещение (порядка 50 км/с) по периметру почти всей вспышечной области в линии СII к. Эти смещения существовали до,

во время и после импульсной фазы вспышки, и их пространственная конфигурация не изменилась существенно за время события (см. левую панель рис. 3). Таким образом, эти красные смещения, вероятно, не

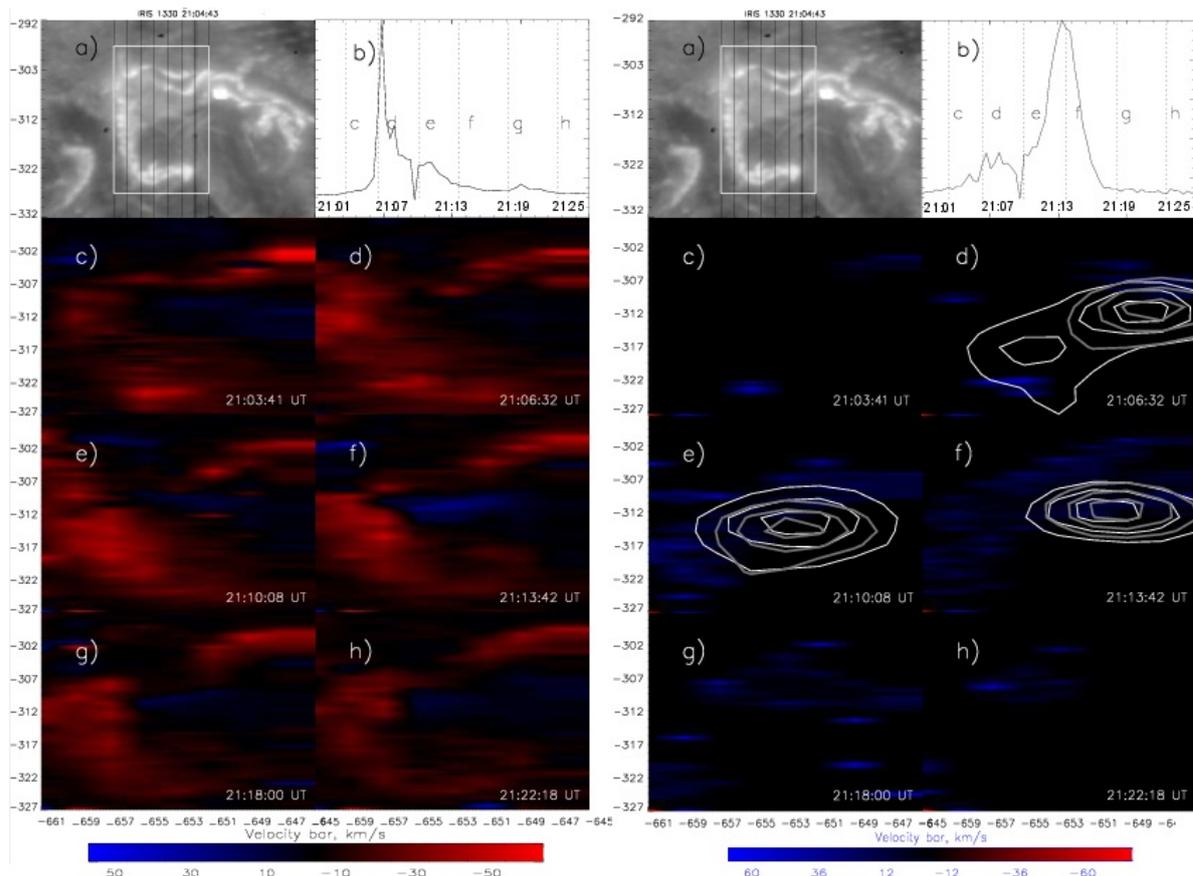


Рис. 3. Слева: (а) растровое изображение IRIS в канале 1330 А для момента времени 21:04:43 UT с отмеченными положениями щели спектрографа (черные вертикальные линии). Белый прямоугольник соответствует области, для которой построены карты доплеровского смещения линии СII к на панелях (с)–(h) для шести моментов времени (соответствующие моменты времени отмечены в правом нижнем углу каждого изображения); (б) профиль пиковой интенсивности для линии СII к в зависимости от времени. Красный цвет соответствует областям, в которых наблюдается красное смещение, а синий – областям, в которых наблюдается голубое смещение. Справа: Серии изображений карт доплеровского смещения для линии FeXXI для шести моментов времени, соответствующим изображениям на рисунке слева, для области, обозначенной белым прямоугольником на рисунке (а). Доплеровское смещение измеряется в диапазоне от -50 км/с до 50 км/с. Также построены соответствующие восстановленные источники жесткого рентгена в диапазонах 12–25 кэВ (белые контуры) и 6–12 кэВ (серые контуры) для моментов времени (d) 21:04:00–21:06:00 UT, (e) 21:07:50–21:09:50 UT и (f) 21:12:00–21:14:00 UT. На панели (б) отражен профиль пиковой интенсивности линии FeXXI как функция времени.

связаны с процессом хромосферного испарения для этой вспышки. В завершении, рассмотрена пространственная структура процесса хромосферного испарения, наблюдаемого в линии FeXXI 1354\AA (с характерной температурой 11 МК) по периметру вспыхивающей области. Голубые смещения порядка 50 км/с и характерные времена порядка нескольких минут позволяют нам классифицировать это испарение как мягкое (см. правую панель рис. 3). Анализ рентгеновских данных аппарата RHESSI показывает, что это испарение может быть вызвано как тепловым потоком из области первоначального энерговыделения за счет электронной теплопроводности, так и ускоренными нетепловыми частицами.

Уникальная композиция пространственного, временного и спектрального разрешений IRIS позволяет рассмотреть в деталях геометрию и динамику вспыхивающего события, установить большое количество интересных наблюдательных фактов и сделать много выводов о вспыхивающем процессе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-32-21078

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Carmichael H. A Process for Flares // NASA Special Publication. 1964. V. 50. P. 451.
 Sturrock P.A. A Model of Solar Flares // Astron. J. 1968. V. 73. P. 78.
 Hirayama T. Theoretical Model of Flares and Prominences. I: Evaporating Flare Model // Solar Phys. 1974. V. 34. P. 323.
 Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // Solar Phys. 1976. V. 50. P. 85.
 De Pontieu B., Title A.M., Lemen J.R., et al. The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) // Solar Phys. 2014. V. 289. P. 2733.
 Goode P.R., Coulter R., Gorceix N., et al. The NST: First results and some lessons for ATST and EST // Astronomische Nachrichten. 2010. V. 331. P. 620.
 Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // Solar Phys. 2002. V. 210. P. 3.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия