

УДК 523.985.3

М. Н. Пасечник

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
rita@mao.kiev.ua

Движение плазмы в солнечной петле в выходящем магнитном потоке

Анализируются изменения лучевых скоростей плазмы в солнечной петле на уровне хромосферы и фотосферы на участке выходящего магнитного потока в развивающейся активной области NOAA 11024. Для анализа использованы данные многоволновых спектрополяриметрических наблюдений 4 июля 2009 г. на солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания) и данные космических спутников GOES, SOHO, STEREO. Исследована сложная последовательность активных событий — образование бомбы Эллера, микровспышки рентгеновского балла В1 и четырех хромосферных выбросов в результате магнитных пересоединений, связанных с выходом нового магнитного потока. Бомба Эллера развилась возле растущей поры. Как в хромосфере, так и в фотосфере изменения лучевой скорости $V_{\text{луч}}$ в ней носили колебательный характер. Перед микровспышкой в одной ноге магнитной петли средние скорости потоков плазмы вверх и вниз, вызванных вращательным движением, были приблизительно одинаковыми — около 26 км/с. Во время микровспышки $V_{\text{луч}}$ восходящего потока увеличилась до -33 км/с, а нисходящего — до 50 км/с. Изменения лучевой скорости движения вещества во второй ноге магнитной петли хорошо коррелировали с изменениями $V_{\text{луч}}$ в области микровспышки, но происходили на 1.5 мин позже. За время наблюдений сформировалось четыре выброса хромосферного вещества, три из них в области развития бомбы Эллера. Во время выбросов происходили резкие изменения интенсивности мягкого рентгеновского излучения. На уровне фотосферы изменения лучевой скорости плазмы во время микровспышки в области ног петли были противоположными — в области одной $V_{\text{луч}}$ уменьшалась от -1.8 до -0.4 км/с, а в области второй — увеличивалась от -0.6 до -2.6 км/с.

РУХ ПЛАЗМИ В СОНЯЧНІЙ ПЕТЛІ У ВИХІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОТОЦІ, Пасечник М. М. — Аналізуються зміни променевої швидкості плазми у сонячній петлі на рівні хромосфери і фотосфери на ділянці вихідного магнітного потоку в активній області NOAA 11024, що розвивається. Для аналізу використано дані багатохвильових спектрополяриметричних спостережень 4 липня 2009 р. на сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) і дані космічних супутників GOES, SOHO, STEREO. Досліджено складну послідовність подій — утворення бомби Еллермана, мікроспалаху рентгенівського балу B1 і чотирьох хромосферних викидів у результаті магнітних пересполучень, пов'язаних з виходом нового магнітного потоку. Бомба Еллермана розвинулася біля зростаючої пори. Як у хромосфері, так і у фотосфері зміни променевої швидкості V_{np} в ній мали коливальний характер. Перед мікроспалахом у нозі магнітної петлі, де він розвивався, середні швидкості потоків плазми вгору і вниз, викликаних обертальним рухом, були приблизно однаковими — близько 26 км/с. Під час мікроспалаху V_{np} висхідного потоку збільшилася до -33 км/с, а низхідного — до 50 км/с. Зміни променевої швидкості руху речовини у другій нозі магнітної петлі добре корелювали із змінами V_{np} в області мікроспалаху, але відбувалися на 1.5 хв пізніше. За час спостережень сформувалися чотири викиди хромосферної речовини, три з них в області розвитку бомби Еллермана. Під час викидів відбувалися різкі зміни інтенсивності м'якого рентгенівського випромінювання. На рівні фотосфери зміни променевої швидкості плазми під час мікроспалаху в області двох ніг петлі були протилежними — в області однієї ноги V_{np} зменшувалась від -1.8 до -0.4 км/с, а в області другої ноги — збільшувалась від -0.6 до -2.6 км/с.

PLASMA MOTIONS IN THE SOLAR LOOP OF THE EMERGING MAGNETIC FLUX, by Pasechnik M. N. — We present some results of our analysis of plasma line-of-sight velocity changes in the solar loop at the chromospheric and photospheric levels in the emerging magnetic flux area in developing active region NOAA 11024. Our analysis combines multiwavelength spectropolarimetric observations carried out on 4 July 2009 with the solar telescope THEMIS (the island of Tenerife, Spain), and data from the space satellites GOES, SOHO, STEREO. It is possible to understand the complex sequence of events associated with the new magnetic flux emergence and Ellerman bomb, microflare GOES class B1 and four chromospheric surges formation there were a result of magnetic reconnection. Ellerman bomb developed in the vicinity of a growing pore. The velocity oscillations there were in the chromosphere and photosphere in its area. Before microflare average V_{LOS} plasma of the upward and downward flows in the leg of the magnetic loop was about 26 km/s. These flows were associated with a twisting motion of the loop. During microflare upflowing velocities increased to -33 km/s, and the V_{LOS} downflow up to 50 km/s. Velocity changes of matter motion in the second leg of the magnetic loop well corre-

lated with microflare V_{LOS} changes, but occurred 1.5 minutes later. Four chromospheric surges formed during our observations, three of them in the area of the Ellerman bomb development. Sharp changes in the soft X-ray intensity there were at that time. At the photospheric level during microflare velocity variations in the loop legs were opposite — in the area of one leg V_{LOS} decreased from -1.8 km/s to -0.4 km/s, and in the second leg V_{LOS} increased from -0.6 km/s to -2.6 km/s.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям [6, 11, 17, 32, 35] за многие динамические явления, наблюдаемые на Солнце, как мелкомасштабные, так и крупномасштабные, ответственен выход новых магнитных потоков из подфотосферных слоев и формирование из них активной области (АО). Тем не менее, на вопрос, как именно магнитные поля поднимаются через конвективную зону Солнца и проходят через фотосферу и хромосферу в корону, до сих пор нет ответа. Детальное исследование выхода магнитного потока и его взаимодействия с окружающим полем важно для установления связи между нижними слоями Солнца и его внешней атмосферой, для определения механизмов передачи энергии и вещества на Солнце, а также для понимания основных моментов энерговыделения и связанных с ним явлений, таких как вспышки и выбросы.

Теоретическое моделирование процесса выхода нового магнитного потока в солнечную атмосферу [5, 6, 11, 12, 17, 19, 38] показало, что в конвективной зоне непосредственно под фотосферой магнитный поток накапливается и фрагментируется на токовые трубки. Трубки должны быть в некоторой степени скручены в виде горизонтального жгута [28], который благодаря силам плавучести поднимается в нижнюю фотосферу. В фотосфере под действием сил плавучести и турбулентных конвективных движений некоторые части жгута выталкиваются вверх — происходит образование магнитных петель, которые поднимаются через фотосферу и хромосферу в корону. Ноги петель формируют две противоположные полярности, развивающиеся в группу пор и пятен. Моделирование показало, что новый магнитный поток может взаимодействовать с уже существующим внешним полем. Петли в конечном итоге пересоединяются с магнитным полем противоположной полярности или становятся частью ранее образованного поля такой же полярности. Следствием магнитных пересоединений являются разной мощности вспышки и разного вида выбросы.

С наблюдательной точки зрения выход нового магнитного потока в развивающейся активной области часто сопровождается такими мелкомасштабными событиями в солнечной атмосфере, как бомбы Эллермана (БЭ), микровспышки и H-выбросы. Время их жизни

около 10...20 мин. Было показано, что некоторые микровспышки могут быть результатом магнитного пересоединения в короне, а некоторые связаны с пересоединениями в хромосфере, и что они могут производить достаточно энергии для нагревания корональной плазмы АО [9, 18, 34]. Отличительной особенностью в их спектрах есть слабая эмиссия в центре и яркая в крыльях некоторых хромосферных линий, таких как линия H [21, 26]. Многочисленные наблюдения показывают, что временная эволюция событий класса A2 — B3 в GOES подобна эволюции больших вспышек. Как и у больших вспышек, X-источники микровспышек представляют собой эмиссию от малых магнитных петель, а яркие H -полосы в спектрах указывают эмиссию в основаниях этих вспышечных петель в нижней атмосфере.

Изучение движения плазмы в солнечных петлях [3, 4, 9, 11, 14—16, 25, 33, 35, 36] показало, что движение вещества по петле может происходить из одного основания в другое — из области одной магнитной полярности в область противоположной полярности. Во время всплывания петли в верхней ее части вещество поднимается, а в ногах опускается — под действием силы тяжести происходит стекание плазмы вдоль линий магнитного поля. Во вспышечных петлях направление движения и скорость плазмы зависят от высоты, на которой произошло магнитное пересоединение, и стадии развития вспышки. Из области магнитного пересоединения наблюдается разнонаправленное движение вещества — движение вниз связано с образующимися при этом хромосферной конденсацией и МГД-волнами, а движение вверх — с хромосферным испарением. На EUV-изображениях, полученных на спутниках STEREO, хорошо видно распространение горячей плазмы вдоль магнитных петель.

В данной работе на основе спектрополяриметрического материала, полученного на франко-итальянском телескопе THEMIS, мы продолжаем изучать динамику атмосферы активной области NOAA 11024. Она была одной из первых АО, развившихся в южном полушарии Солнца в начале 24-го цикла солнечной активности, и представляла особый интерес для исследований, так как была в то время единственной на диске Солнца и быстро развивалась. Много работ посвящено изучению морфологических и физических свойств АО во время ее прохождения по диску Солнца [5, 8, 11, 13, 29, 31, 37, 38]. Одной из первых была работа [31], в которой на основе спектрополяриметрических данных рассмотрена область основного выходящего магнитного потока и физические процессы, приводящие к формированию таких магнитных элементов АО, как поры и пятна. В работе [8] представлены наблюдения микровспышки рентгеновского балла B1.8 и отмечено, что в АО за время ее прохождения по диску Солнца произошло много микровспышек класса A и B. В работе [38] с помощью многоволновых наблюдений исследовалась связь процесса выхода и эволюции мелкомасштабных магнитных биполярных структур с образующимися впоследствии крупномасштабными структура-

ми в короне. В работе [13] описаны 137 вспышечноподобных событий, которые наблюдались на SphinX (Solar Photometer IN X-rays) в АО 11024 с 3 по 7 июля 2009 г., и проанализированы физические условия в них с целью лучшего понимания вспышечных событий, наблюдаемых в областях выходящих магнитных потоков. Было отмечено, что большинство петель вспышек расположены вдоль линии инверсии полярностей и обычно развиваются из начального поярчания в основании, которое затем переходит в поярчание всей петли. Это говорит о том, что большое количество вспышек было результатом магнитного пересоединения в основаниях петель, и вещество в них двигалось из одного основания в другое.

В двух наших предыдущих работах [2, 22] были исследованы изменения хромосферных и фотосферных лучевых скоростей в разных активных образованиях АО — в хромосферных выбросах, порах, флоккулах. Исследуемый участок АО находился в области одного из выходящих в это время магнитных потоков. Целью этой работы является изучение особенностей движения плазмы в солнечной петле во время таких мелкомасштабных событий, как бомба Эллермана, перед и во время микровспышки рентгеновского балла В1 и развившихся за время наблюдений четырех хромосферных выбросов.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Активная область NOAA 11024 появилась на восточном крае диска Солнца в виде факельной площадки 29 июня 2009 г. и оставалась относительно спокойной до конца 3 июля, когда начал выходить новый магнитный поток, который имел такую же магнитную конфигурацию, как уже существующий. В день наших наблюдений, 4 июля 2009 г., АО был присвоен номер, в это время в ее состав входили 17 пор и пятен (рис. 1, *a*). Активность ее быстро росла [13, 38], и в разных частях области наблюдались три выходящих магнитных потока. Группа пятен была биполярной с вкраплениями большого количества элементов противоположных полярностей, расположенных вдоль оси соединяющей, основные полярности [29]. В работах [11, 17, 38] на основе численного МГД-моделирования было показано, что, скорее всего, новый магнитный поток представляет собой серию небольших участков со смешанной полярностью (так называемое серпантинное магнитное поле), даже если вся выходящая область биполярна. В день наблюдений область имела координаты S25E02 (–29, –449), т. е. она находилась на солнечном диске возле центрального меридиана, поэтому все определяемые параметры были без существенных искажений [13].

Спектрополяриметрические наблюдения одновременно в нескольких участках спектра были проведены Е. В. Хоменко на франко-итальянском телескопе THEMIS Института астрофизики на Канар-

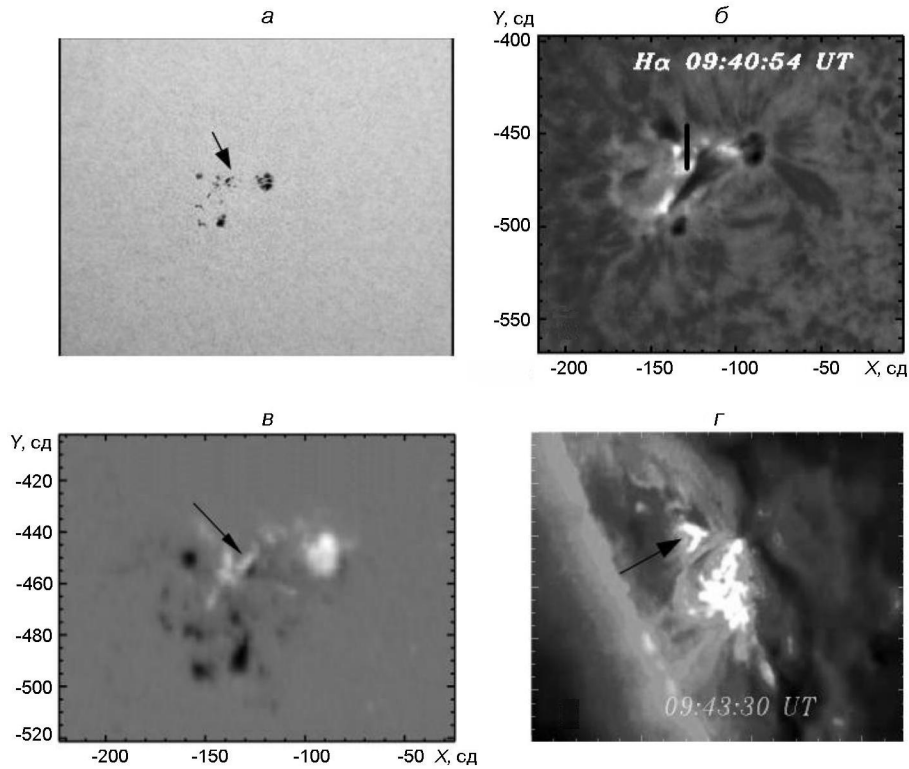
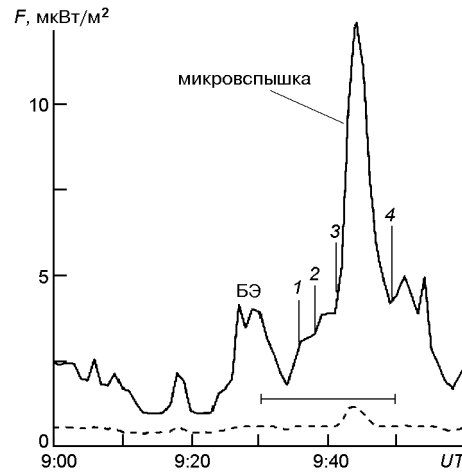


Рис. 1. Изображения активной области NOAA 11024, полученные 4 июля 2009 г.: *а* — в белом свете в 8:39 UT, *б* — в линии H (вертикальная линия — положение щели), *в* — магнитограмма SOHO/MDI, *г* — УФ-изображение в линии Fe IX 17.1 нм, полученное спутником STEREO-A. На всех панелях стрелкой указан исследуемый участок активной области (сд — секунды дуги)

ских островах (Испания, остров Тенерифе). В течение 20 мин было получено 400 спектров с временным интервалом около 3 с. Мы отобрали 47 наиболее качественных из них. Рассматриваемый участок АО, вырезанный щелью спектрографа, находился в области одного из выходящих магнитных потоков [38]. Он включал две поры противоположной полярности (рис. 1, *в*), образовавшиеся при всплывании магнитной петли, на внешней границе одной из пор развивалась бомба Эл-лермана (БЭ), через некоторое время в области второй поры возникла микровспышка рентгеновского балла В1. За время наблюдений (9^h30^m...9^h50^m UT) развились четыре хромосферных выброса.

Известно, что использование наземных наблюдений в сочетании со спутниковыми данными открыло много новых возможностей в изучении активных явлений на Солнце. Такие исследования охватывают широкий диапазон волн, что предоставляет важную информацию о физических характеристиках этих явлений. В своей работе мы также проанализировали изображения исследуемой активной области NOAA 11024, полученные за период наших наблюдений и перед ними спутником STEREO в разных длинах волн, SOHO/MDI и данные спут-

Рис. 2. Изменения потока в рентгеновских диапазонах $\lambda = 0.05...0.4$ нм (штрихи) и $0.1...0.8$ нм (сплошная кривая), полученные на спутнике GOES. Отмечены моменты развития бомбы Эллермана, микровспышки и четырех выбросов (серией 1—4), горизонтальная линия — интервал времени наших наблюдений



ника GOES. На рис. 1 представлены: а) изображение Солнца в белом свете, полученное 4 июля 2009 г. в 8^h39^m UT, б) изображение АО в линии H α 4 июля 2009 г. в $9^h40^m54^s$ UT (вертикальной линией показано положение щели спектрографа), в) магнитограмма АО, полученная SOHO/MDI 4 июля 2009 года в 9^h36^m UT, белым и черным цветом обозначены положительная и отрицательная полярности, г) УФ-изображение области в линии Fe IX 17.1 нм (переходная область), полученное спутником STEREO-A в $9^h43^m30^s$ UT, хорошо видна петля, заполненная горячей плазмой. На всех панелях стрелкой указан исследуемый участок области.

Важной характеристикой, которая дает информацию о физических процессах, происходящих в атмосфере АО, является изменение интенсивности ее излучения в рентгеновском диапазоне. Данные наблюдений на спутнике GOES в рентгеновских диапазонах $0.05...0.4$ и $0.1...0.8$ нм приведены на рис. 2. Видно, что во время наших наблюдений в распределении интенсивности мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в первом диапазоне был максимум в 9^h43^m UT, а во втором диапазоне ($0.1...0.8$ нм) были два максимума — в $9^h27^m...9^h30^m$ UT и в 9^h44^m UT. Горизонтальная линия на рисунке показывает интервал времени наших наблюдений, вертикальными линиями обозначены активные события, произошедшие за это время — бомба Эллермана, микровспышка и четыре хромосферных выброса. Максимальная скорость в 1—4-м выбросах была достигнута в $9^h35^m40^s$, $9^h37^m50^s$, $9^h42^m28^s$ и $9^h48^m51^s$ UT соответственно. Видно, что во время выбросов происходили скачки интенсивности МРИ, а также то, что первые три выброса произошли на стадии роста интенсивности МРИ, а последний — на стадии ее спада.

На рис. 3 представлены H α -спектры, полученные в разные моменты наблюдения. На одном из первых спектров ($9^h30^m56^s$ UT) видны две поры П1 и П2, сформированные всплывающей магнитной петлей, а также две слабые эмиссионные полосы — хромосферные основания ног петли А и Б. В коротковолновом (синем) крыле нижней полосы и в

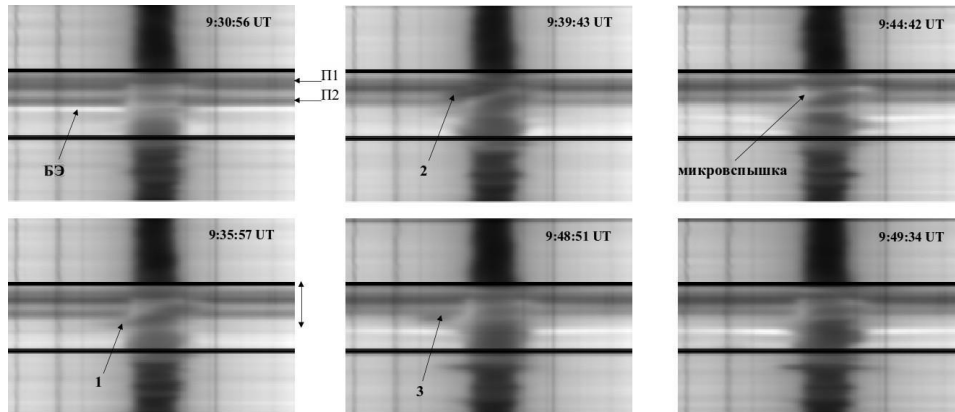


Рис. 3. H -спектры АО, полученные в разные моменты наблюдений: П1 и П2 — поры, БЭ — бомба Эллермана, стрелкой отмечен исследуемый участок (6 Мм), цифрами 1, 2, 3 обозначены хромосферные выбросы

длинноволновом (красном) крыле верхней полосы видны эмиссионные узлы. На этом же спектре возле второй поры, внизу исследуемого участка АО, видна яркая узкая эмиссионная полоса в крыльях линии H — бомба Эллермана. Известно, что бомбы Эллермана появляются в результате выхода новых магнитных потоков и наблюдаются в АО, находящихся в активной фазе развития, в частности в молодых АО [34]. Приведены также спектры, полученные во время трех выбросов, спектр микровспышки, полученный в момент, близкий к максимуму интенсивности МРИ, и спектр, полученный в последний момент наблюдения.

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ

Для изучения движения вещества были использованы *I*-профили Стокса, полученные с интервалом, соответствующим расстоянию на Солнце 160 км. Лучевые скорости $V_{\text{луч}}$ определялись по доплеровским смещениям центров линий в спектрах относительно их положений в лабораторном спектре с использованием близлежащих теллурических линий. При этом учитывались поправки за вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, вращение Солнца и гравитационное смещение.

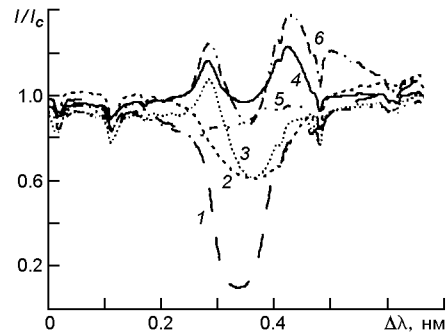
Хромосферные скорости рассчитывались по сдвигам ядра линии H и эмиссионных узлов в ее крыльях.

Для определения лучевых скоростей плазмы фотосферы был использован участок спектра 630 нм. Он удобен тем, что включает фраунгоферовы линии, которые формируются в большом диапазоне высот. Это две сильные линии нейтрального железа Fe I 630.15 нм ($d_0 =$

$= 0.719$), 630.25 нм ($d_0 = 0.650$) и две слабые линии Fe I 630.35 нм ($d_0 = 0.045$) и линия титана Ti I 630.38 нм ($d_0 = 0.072$), где d_0 — центральная глубина профиля, полученного для центра диска Солнца [1]. Отметим, что в случае активной области мы можем говорить только о верхних и нижних слоях фотосферы [22]. Центральные глубины первых двух линий гораздо больше центральных глубин последних двух линий, поэтому можно ожидать, что как и в спокойной фотосфере, чем слабее линия, тем глубже она образуется.

Смещение спектральных линий в коротковолновую сторону указывает на восходящие потоки плазмы, а смещение в длинноволновую сторону — на движение вниз. Погрешность определения хромосферных скоростей составляла 0.3 км/с, а фотосферных — 0.1 км/с.

Рис. 4. Шесть профилей линии H для двух ног магнитной петли, относящиеся к разным моментам наблюдений: 1 — профиль для участка без активных образований; 2 — для бомбы Эллермана; 3 — для ноги Б петли, 4 — для микровспышки; 5 и 6 — для 2-го выброса



Хромосфера. На рис. 4 приведены примеры профилей линии H для двух ног петли, относящиеся к разным моментам наблюдения. Их вид очень разнообразен — они асимметричны и сдвинуты в разные стороны спектра, отражая изменения скорости движения плазмы. В области ноги А развивалась микровспышка, а в области ноги В — бомба Эллермана. Для сравнения дан профиль линии, полученный для спектра участка АО без активных образований. Профиль 2, полученный для БЭ, обнаруживает значительную эмиссию в крыльях и широкое ядро в поглощении. Известно, что у всех БЭ профили асимметричны по интенсивности крыльев и их протяженности. Профиль 3 состоит из двух компонентов, основного — абсорбционного и эмиссионного в коротковолновом крыле. По положению этого компонента определялись скорости восходящего движения плазмы в ноге Б. Профиль 4 получен для микровспышки, он имеет два эмиссионных компонента в синем и красном крыле линии, отражая разнонаправленное движение хромосферного вещества. Профиль 5, полученный для 2-го выброса, полностью смещен в синюю сторону спектра, величина смещения соответствует $V_{\text{луч}} = -39$ км/с. На профиле 6 видна очень широкая эмиссия в красном крыле H, до 2.4 нм от центра линии, что соответствует скорости 110 км/с. Спектр получен в $9^{\text{h}}42^{\text{m}}45^{\text{s}}$ UT, когда вещество выброса возвращалось обратно вдоль линий магнитного поля.

На одном из первых спектров (рис. 3), полученных во время наших наблюдений, возле растущей поры П2 [22] видна развивающаяся

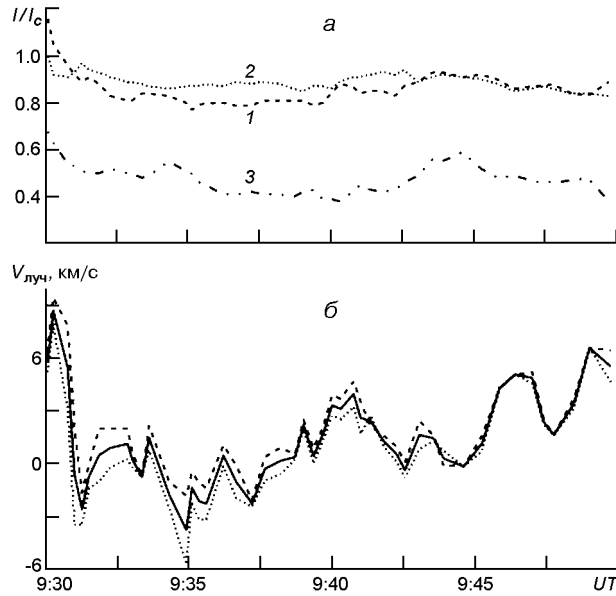
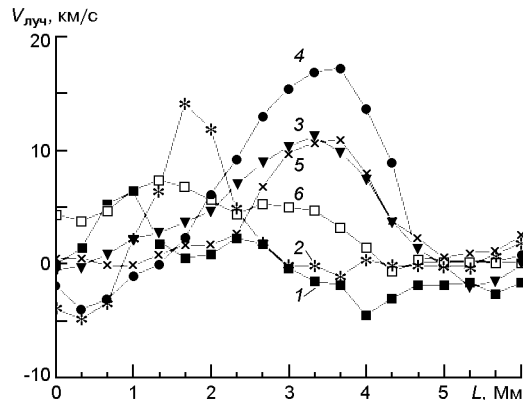


Рис. 5: а — относительные изменения интенсивности в крыльях линии Н в спектрах БЭ на расстоянии 0.1 нм от ее центра (1 — в коротковолновом крыле, 2 — в длинноволновом крыле, 3 — в центре линии), б — изменения лучевой скорости $V_{\text{луч}}$ плазмы в центральной части БЭ. Положительные значения скорости соответствуют движению вещества от наблюдателя

бомба Эллермана. Рис. 5, а показывает изменение интенсивности в крыльях линии Н на расстоянии 0.1 нм от ее центра и в центре линии в области БЭ. Как и в большинстве спектров БЭ, более интенсивным было синее крыло. В конце ее развития, с момента $9^{\text{h}}32^{\text{m}}$ и до момента $9^{\text{h}}43^{\text{m}}$ UT, более интенсивным стало красное крыло, в последние моменты наблюдений интенсивность в крыльях была одинаковой. По изменению интенсивности МРИ (рис. 2, в $9^{\text{h}}27^{\text{m}} \dots 9^{\text{h}}30^{\text{m}}$ UT GOES показывает максимум первого всплеска интенсивности, связанного, очевидно, с БЭ) и интенсивности в линии Н можно видеть, что БЭ находилась в максимуме своего развития. На рис. 5, б приведено изменение лучевой скорости плазмы в центральной части БЭ на уровне образования ядра линии Н (1300...1500 км). Видно, что в начале наших наблюдений, до момента $9^{\text{h}}31^{\text{m}}$ UT, хромосферное вещество в этом месте опускалось с возрастающей скоростью (максимальная $V_{\text{луч}}$ 10 км/с). Затем скорость опускания резко уменьшилась, и в течение минуты в этом месте плазма двигалась вверх (максимальная $V_{\text{луч}}$ -4 км/с). До конца наблюдений изменения скорости носили колебательный характер — изменялись как величина скорости, так и ее направление. Период колебаний тоже изменялся — он уменьшился от четырех минут до трех.

За время наших наблюдений на исследуемом участке АО произошло четыре выброса хромосферного вещества (рис. 2), причем три из них — в области развития БЭ. В первом выбросе максимальная скорость $V_{\text{луч}} = -44$ км/с была достигнута в $9^{\text{h}}35^{\text{m}}40^{\text{s}}$ UT, в третьем $V_{\text{луч}}$

Рис. 6. Изменение лучевой скорости вдоль участка АО, вырезанного щелью спектрографа, для шести моментов наблюдений (кривые 1—6 — для $9^h30^m56^s$, $9^h31^m50^s$, $9^h34^m17^s$, $9^h35^m57^s$, $9^h44^m42^s$, $9^h49^m34^s$). Центральные части БЭ, основания ног Б и А магнитной петли соответствуют положениям 0.83, 2.2 и 4.7 Мм



$= -25$ км/с в $9^h42^m28^s$ UT, в четвертом $V_{\text{луч}} = -63$ км/с в $9^h48^m51^s$ UT. С 9^h35^m UT начал развиваться второй выброс в области между основаниями петли, где находилась ее вершина, максимальная лучевая скорость -73 км/с в нем была достигнута в $9^h37^m50^s$ UT. Во время выбросов наблюдались вихревые движения плазмы, об этом свидетельствуют наклонные полосы в спектрах и резкое изменение направления скорости в начале и конце выбросов. В работах [10, 30] показано, что H⁺-сержи, наблюдавшиеся во время микровспышек и БЭ, были результатом магнитного пересоединения в нижней хромосфере.

Интересной особенностью движения хромосферного вещества было расширение нисходящего потока плазмы из области бомбы Эл-лермана. Изменение лучевой скорости вдоль участка АО, вырезанного щелью спектрографа, в разные моменты наблюдений показаны на рис. 6. На спектре I БЭ, полученном в $9^h30^m56^s$ UT в ядре линии H⁺, видна узкая темная полоска (поглощение), сдвинутая в красную часть спектра (рис. 3). На рис. 6 видно, что в это время в области БЭ была небольшая область, в которой хромосферное вещество опускалось с повышенной скоростью до 6 км/с. Отметим, что между порами в это время происходил подъем вещества со скоростью до -4.6 км/с. Это место, вероятно, соответствовало верхней части поднимающейся петли. В области основания А вещество также поднималось со средней скоростью -1.7 км/с. Затем в течение минуты область с опускающимся веществом расширилась в сторону внутреннего края второй поры П2, и скорость в ней увеличилась в два раза — до 14 км/с (кривая 2 на рис. 6, момент $9^h31^m50^s$ UT). В последующие моменты наблюдений эта область продолжала расширяться, изменения скорости в ней носили колебательный характер — максимальное значение $V_{\text{луч}} = 18$ км/с было достигнуто в $9^h35^m42^s$ UT, минимальное значение $V_{\text{луч}} = 6.8$ км/с было в $9^h32^m18^s$ UT. Второе увеличение скорости в этой области до $V_{\text{луч}} = 13.7$ км/с наблюдалось в период от 9^h42^m до 9^h44^m UT.

Такие изменения скорости в ноге Б магнитной петли можно объяснить тем, что при всплывании петли более холодная материя, чем окружающая хромосфера, поднялась вверх выходящими магнитными полями, а затем под действием силы тяжести возвращалась вниз вдоль

линий магнитного поля. В работах [24, 25, 32] найдены нисходящие потоки хромосферного вещества в окрестностях молодых растущих пор, причем область, занимаемая этими потоками, увеличивалась. Авторы предложили возможное объяснение такого движения в петлях, как свободное падение материи с высоты формирования исследованной спектральной линии в сторону фотосферы.

На рис. 2 видно, что в 9^h34^m UT закончился первый всплеск интенсивности МРИ и начался второй всплеск балла В1 (его координаты S25E08) — в области ноги А магнитной петли начала развиваться микровспышка. В работе [20] подробно рассмотрено, как мелкомасштабные события пересоединения, такие как БЭ, генерируют периодические колебания скорости вдоль петли и могут вызывать события большего масштаба пересоединения (например микровспышки). В работе [17] сделан вывод, что БЭ и микровспышки имеют много общих черт: короткое время жизни, температура, выбросоподобные движения хромосферного вещества. Вероятно, они вызваны магнитным пересоединением в нижней солнечной атмосфере. Полученные нами профили микровспышки (рис. 4) состояли из двух эмиссионных компонентов в синем и красном крыле линии Н. На рис. 7, а показано изменение со временем интенсивности в крыльях линии Н на расстоянии 0.052 нм (максимум интенсивности эмиссионного узла в синем крыле) и 0.088 нм (максимум интенсивности эмиссионного узла в красном крыле) от ее центра и в ее центре в спектре микровспышки. Видно, что увеличение интенсивности в синем крыле линии Н началось около 9^h39^m UT, за 2 мин до начала резкого роста интенсивности МРИ. В ее

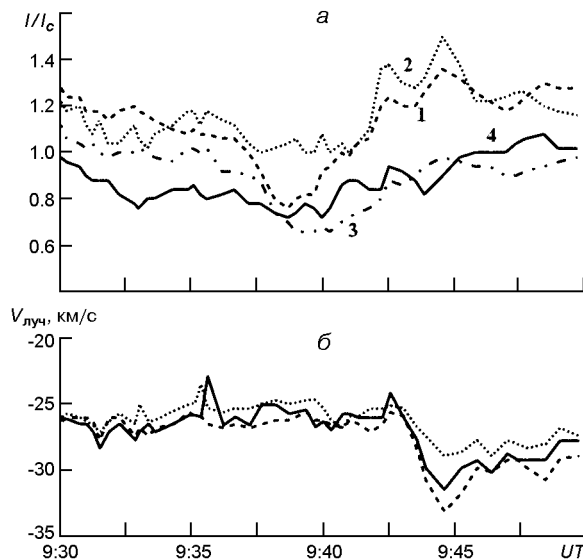


Рис. 7: а — относительные вариации интенсивности в крыльях линии Н в спектре микровспышки (1 — в коротковолновом крыле на расстоянии 0.052 нм, 2 — в длинноволновом крыле на расстоянии 0.088 нм от ее центра, 3 — в ее центре, 4 — в спектре ноги В магнитной петли (в коротковолновом крыле на расстоянии 0.052 нм)), б — изменение лучевой скорости плазмы в центральной части основания Б

красном крыле и в центре увеличение интенсивности началось около 9^h41^m UT — одновременно с началом резкого роста интенсивности МРИ. На том же рисунке показано изменение со временем интенсивности в синем крыле линии Н на расстоянии 0.052 нм от ее центра в спектре ноги В магнитной петли. Видно, что увеличение интенсивности происходило во время бомбы Эллера и началось в 9^h40^m UT во время микровспышки, причем изменения интенсивности в обеих ногах петли происходили синхронно, что говорит о их физической связи.

На рис. 7, б представлено изменение скорости движения плазмы в центральной части основания Б. С начала наблюдений до момента 9^h42^m UT (резкое увеличение интенсивности МРИ) в этом месте регистрировался восходящий поток $V_{\text{луч}} = -25$ км/с. Как можно видеть, за это время произошло небольшое увеличение $V_{\text{луч}}$ до -29 км/с около момента $9^h32^m18^s$ UT, через 30 с после того, как в области БЭ изменилось направление скорости, и нисходящий поток сменился восходящим. Также видны два небольших уменьшения $V_{\text{луч}}$ около моментов максимальных скоростей в 1-м и 3-м выбросах (9^h36^m и 9^h42^m UT). После момента 9^h42^m UT величина лучевой скорости резко увели-

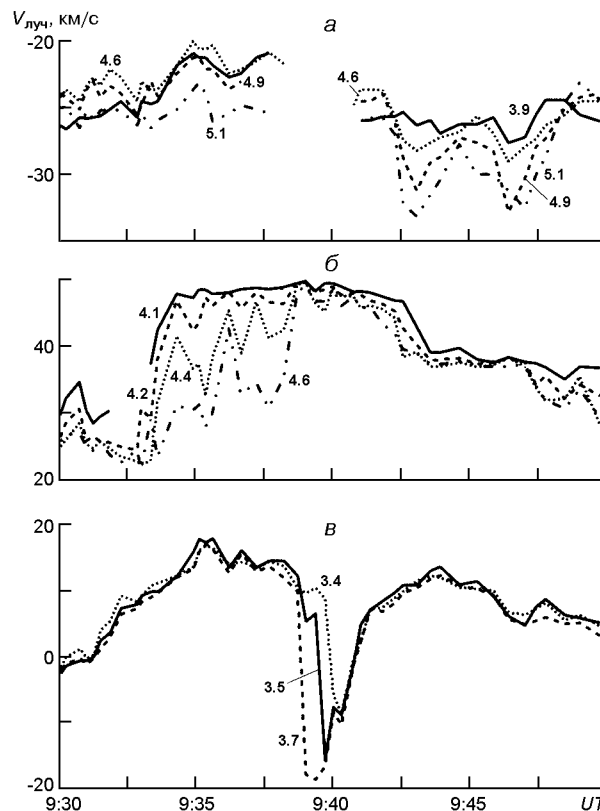


Рис. 8. Изменение со временем хромосферных лучевых скоростей в области основания А перед и во время микровспышки: а — в области восходящего потока, б — в области с опускающимся веществом, в — в верхней части петли, на уровне образования ядра линии Н. Цифры возле кривых — места сечений в Мм согласно рис. 3

чилась до -33 км/с, ее изменения имели два максимума с интервалом около 3 мин ($9^h44^m42^s$ и $9^h48^m20^s$ UT).

На рис. 8 показано изменение со временем хромосферных лучевых скоростей в области основания А перед и во время микровспышки. Профили линии Н в спектрах этой области имели два эмиссионных компонента (рис. 4), и $V_{\text{луч}}$ были измерены по доплеровским смещениям этих компонентов. Видно, что перед микровспышкой средние скорости потоков плазмы вверх и вниз, вызванных вращательным движением магнитной петли, изменялись мало и были приблизительно одинаковыми (-25 и 27 км/с соответственно).

В работе [7] получены многокомпонентные профили, которые состояли из двух или трех пиков, и отмечена очень сложная динамика потоков во время микровспышек. Появление противоположно направленных потоков в непосредственной близости друг от друга было интерпретировано как результат хромосферного испарения (движение вверх) и падения холодной материи (движение вниз) и как результат вращательного движения магнитной петли.

На рис. 8, а видно, что с момента наблюдения $9^h34^m20^s$ UT (начало развития микровспышки) происходит сильное увеличение амплитуды изменений величины скорости восходящего движения плазмы. Линии прерываются в середине рисунка, возле момента наблюдений 9^h40^m UT, так как в это время область 2-го выброса перекрывала область, где развивалась микровспышка. После окончания 2-го выброса скорость подъема вещества увеличилась в середине основания петли до -26 км/с, а на его границах — до -34 км/с. Изменения скорости восходящего потока во время максимума микровспышки (резкого роста интенсивности МРИ) испытывали колебания с интервалом около 3 мин (наблюдались два пика в $9^h43^m14^s$ и $9^h46^m58^s$ UT). Из сравнения рис. 7, б и 8, а видно, что изменения $V_{\text{луч}}$ восходящего движения плазмы в ноге Б магнитной пели хорошо коррелировали с изменениями $V_{\text{луч}}$ в ноге А в области микровспышки, но происходили на 1.5 мин позже. В конце наблюдений скорость движения вещества вверх уменьшилась в среднем до -25 км/с, т. е. стала такой же как перед микровспышкой.

На рис. 8, б представлено изменение $V_{\text{луч}}$ хромосферного вещества, движущегося вниз. В начале микровспышки ($9^h34^m57^s$ UT) скорость резко увеличилась до 49 км/с на границе основания А, тогда как $V_{\text{луч}}$ в средней части основания составляла в среднем 28 км/с, т. е. наблюдался большой разброс величин скоростей в потоке. Во время 2-го выброса на всей площади основания петли вещество опускалось с одинаковой скоростью около 50 км/с. Затем величина $V_{\text{луч}}$, практически не испытывая колебаний, постепенно уменьшилась до 33 км/с.

На рис. 8, в показано изменение $V_{\text{луч}}$ хромосферного вещества в верхней части петли на уровне образования ядра линии Н ($1300...1500$ км). В начале наблюдений в этом месте хромосферное вещество поднималось с небольшой скоростью -2.5 км/с. Во многих работах (например [3]) отмечено, что чаще всего минимальные значения ско-

ростей наблюдались в местах, близких к вершине петли. Затем около 9^h32^m UT скорость изменила направление. Возможно, разогретое и поднявшееся вверх во время бомбы Эллермана хромосферное вещество начало опускаться вниз. Скорость опускания увеличилась до 18 км/с, затем начала уменьшаться, и во время 2-го выброса в этом месте опять наблюдался подъем со скоростью, которая резко увеличилась до -19 км/с. Во время максимума микровспышки хромосферное вещество в верхней части петли опускалось, испытывая небольшие колебания.

Фотосфера. В работе [22] было показано, что во время наших наблюдений на исследуемом участке АО распределение фотосферных скоростей не было похоже на поле хромосферных скоростей. По всей высоте фотосферы движение вещества было направлено к наблюдателю, что свидетельствовало о восходящем движении не только петли, которая поднималась в хромосферу, но и окружающей ее фотосферы. Необходимо отметить, что на участке АО без активных образований лучевая скорость фотосферного вещества во время наших наблюдений изменялась в пределах $0.8...-1.5$ км/с.

В работе [25] на основе спектрополяриметрических наблюдений нескольких небольших развивающихся биполярных областей по доплеровским сдвигам линий Fe I 630.15 и 630.25 нм было найдено, что в области выходящего потока на уровне фотосферы вещество предпочтительно двигалось вверх со скоростью до 1.5 км/с. В работах [15, 16] по SOHO-MDI-магнитограммам, доплерограммам и континуум-изображениям была изучена динамика поля скоростей на ранней стадии развития активной области. Зафиксировано появление области восходящего потока вещества в фотосфере, когда вершина петлеобразной магнитной силовой трубки проходит через нее. Максимальная скорость вещества в потоке достигала 2 км/с, его максимальный размер превысил 20 Мм, время жизни составляло 2 ч. Локальные восходящие потоки в основаниях петель, поднимающие фотосферную материю вверх, описаны в работе [11]. В работе [23] сделано заключение, что стабильный восходящий поток в фотосфере является общей характеристикой области выходящего магнитного потока.

На рис. 9 приведены изменения со временем лучевых скоростей вещества на разных высотах фотосферы в ногах выходящей петли, а также в области БЭ. Отрицательные значения лучевой скорости соответствуют смещениям линий в коротковолновую часть спектра, движениям по направлению к наблюдателю. В начале наблюдений, перед микровспышкой, лучевая скорость плазмы в обеих ногах петли была примерно одинаковой — около -1.3 км/с. После начала микровспышки в области ноги А (рис. 9, а) скорость увеличивалась с высотой фотосферы и уменьшалась со временем, вероятно, под действием хромосферного потока, движущегося вниз во время микровспышки. В верхнем слое, где формировалась линия Fe I 630.15 нм, скорость плазмы достигала -1.8 км/с, а к концу наблюдений уменьшилась до -1 км/с. В

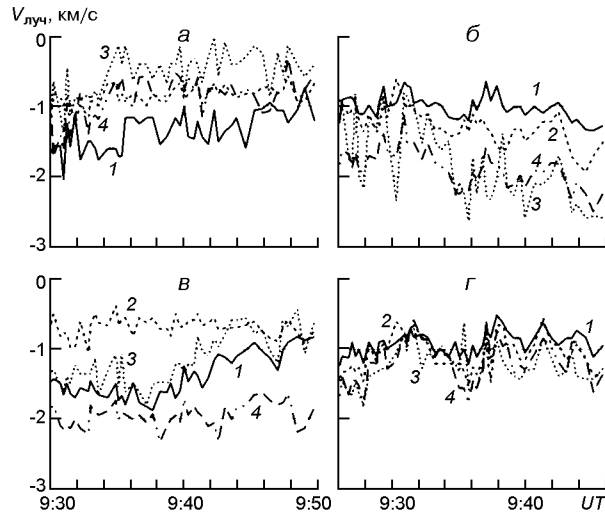


Рис. 9. Изменения со временем лучевых скоростей вещества (кривая 1 — по сдвигу ядра линии Fe I 630.15 нм, 2 — Fe I 630.25 нм, 3 — Fe I 630.35 нм, 4 — Ti I 630.38 нм) на разных высотах фотосферы: а, б — в области ног А и Б магнитной петли, в — область фотосферы между порами, г — в области БЭ. Отрицательные значения лучевой скорости соответствуют движению по направлению к наблюдателю

слое, где формировались линии Fe I 630.25 нм и Ti I 630.38 нм, изменения скорости были одинаковыми (от -1.2 до -0.7 км/с). В нижнем слое, где формировалась линия Fe I 630.35 нм, скорость уменьшилась в среднем от -1 до -0.4 км/с. В области ноги Б (рис. 9, б) изменения скорости были противоположными — скорость подъема уменьшалась с высотой фотосферы, испытывая колебания с периодом около 5 мин, и увеличивалась на всех уровнях с момента начала микровспышки. В верхнем слое — от $-0.6...-0.9$ км/с до $-1.4...-2.0$ км/с, в нижнем слое — в среднем от -1.3 до -2.6 км/с. В работах [9, 35] отмечается асимметрия в доплеровских скоростях вещества в ногах петли на уровне фотосферы.

Если в ногах петли изменения лучевой скорости плазмы происходили синхронно по всей высоте фотосферы, то в области фотосферы между порами (рис. 9, в) скорость в разных слоях изменялась по-разному: в верхнем и самом нижнем слое она уменьшилась во время микровспышки, а в среднем слое практически не изменялась со временем, но сильно отличалась по величине.

В области бомбы Эллера (рис. 9, г) $V_{\text{луч}}$ по всей высоте фотосферы имели близкие значения, их изменения со временем происходили синхронно, испытывая колебания с амплитудой около 1.2 км/с и с периодом около 5 мин. Во время 1-го и 3-го сержей (рис. 2), которые произошли в этой области, в хромосфере на уровне образования ядра линии H наблюдались восходящие потоки (рис. 5, б), а в фотосфере — уменьшение скорости движения вещества вверх (рис. 9). Это говорит о том, что выбросы произошли в нижнем слое хромосферы. Во

время 4-го сержа на уровне хромосферы вещество двигалось вниз, а на уровне фотосферы — вверх, это значит, что, вероятно, выброс образовался выше слоя формирования линии H .

Интересно отметить, что когда вещество 2-го выброса, который проектировался на область между пор и немного на область самих пор (рис. 3), возвращалось ($9^h42^m28^s \dots 9^h42^m45^s$ UT) по той же траектории, что и поднималось, и хромосферная скорость в основании A увеличилась до 110 км/с (рис. 4), в верхнем слое фотосферы через полминуты (в моменты наблюдений $9^h42^m45^s \dots 9^h43^m14^s$ UT) произошло уменьшение скорости подъема от -1.9 до -1.3 км/с.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты анализа особенностей изменений лучевых скоростей плазмы в солнечной петле на уровне хромосферы и фотосферы на участке выходящего магнитного потока в развивающейся активной области NOAA 11024 во время таких мелкомасштабных событий, как бомба Эллермана, перед и во время микровспышки рентгеновского балла В1 и развившихся за время наблюдений четырех хромосферных выбросов.

Бомба Эллермана появилась возле растущей поры. Наши наблюдения начались после максимума ее развития, в это время в области БЭ наблюдался нисходящий поток с лучевой скоростью около 10 км/с, через минуту в этом месте плазма двигалась вверх со скоростью около -4 км/с. До конца наблюдений изменения скорости носили колебательный характер — изменялись как величина скорости, так и ее направление.

Изменения интенсивности в линии H в спектрах обеих ног петли происходили синхронно, что говорит о их физической связи.

Перед микровспышкой в ноге магнитной петли средние скорости потоков плазмы вверх и вниз, вызванных вращательным движением, были приблизительно одинаковыми — около -25 км/с и 27 км/с соответственно. Во время микровспышки скорость $V_{\text{луч}}$ восходящего потока увеличилась до -33 км/с, а нисходящего — до 50 км/с.

Изменения лучевой скорости движения вещества во второй ноге магнитной петли хорошо коррелировали с изменениями $V_{\text{луч}}$ в области микровспышки, но происходили на 1.5 минуты позже.

Скорость движения хромосферного вещества в основаниях петли была выше на границах оснований, чем в их центральной части.

За время наблюдений сформировались четыре выброса хромосферного вещества, три из них — в области развития бомбы Эллермана. Перед выбросами наблюдались вихревые движения плазмы. Во время выбросов происходили резкие изменения интенсивности мягкого рентгеновского излучения.

На уровне фотосферы исследуемого участка АО движение вещества было направлено к наблюдателю. В области ног петли изменение лучевой скорости плазмы во время микровспышки было противоположным — в области ноги, где развилась микровспышка, лучевая скорость увеличивалась с высотой фотосферы и уменьшалась со временем, а в области второй ноги $V_{\text{луч}}$ уменьшалась с высотой фотосферы, испытывая колебания с периодом около 5 мин, и увеличивалась с момента начала микровспышки. Величина фотосферной скорости во время наших наблюдений изменялась от -0.4 до -2.6 км/с.

Изменения величины скорости плазмы в обеих ногах магнитной петли хорошо коррелировали с изменением интенсивности мягкого рентгеновского излучения.

На основе анализа полученных нами изменений лучевых скоростей хромосферного и фотосферного вещества в солнечной петле, а также данных космических обсерваторий GOES, SOHO, STEREO и других исследований эволюции этой АО [5, 8, 11, 13, 29, 31, 37, 38] можно предположить такой сценарий последовательности событий на исследуемом участке АО: в области поднимающегося нового магнитного потока сформировалась петля, ноги петли образовали две поры, и в результате взаимодействия с уже существующим магнитным полем или соседней петлей серпантинного магнитного поля произошло пересоединение в нижней хромосфере — развилась бомба Эллера, возбуждение от которой передалось по петле и вызвало повторное пересоединение — микровспышку.

Автор выражает благодарность Е. В. Хоменко, Р. И. Костыку и Н. Н. Кондрашовой за материалы наблюдений на THEMIS и программы по их обработке.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — К.: Наук. думка, 1989.—200 с.
2. Пасечник М. Н., Черногор С. Н. Динамика атмосферы активной области во время двух хромосферных выбросов // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Астрономія.—2012.—Вип. 48.—С. 22—26.
3. 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.
4. Шилова Н. С., Старкова Л. И. Трехмерная структура и скорости движения вещества в темных петлях прилибмовых H α -вспышек // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 6.—С. 28—35.
5. Archontis V. Flux emergence and associated dynamic events in the Sun // ASP Conf. Ser. / Eds K. Tsinganos, D. Hatzidimitriou, T. Matsakos.—2010.—424.—P. 3.
6. Archontis V., Moreno-Insertis F., Galsgaard K., et al. Emergence of magnetic flux from the convection zone into the corona // Astron. and Astrophys.—2004.—426.—P. 1047—1063.
7. Berkebile-Stoiser S., Gomory P., Veronig A. M. Multi-wavelength fine structure and mass flows in solar microflares // Astron. and Astrophys.—2009.—505, N 2.—P. 811—823.

8. *Brasius J. W., Holman G. D.* Early chromospheric response during a solar microflare observed with SOHO's CDS and RHESSI // *Astrophys. J.*—2010.—**720**.—P. 1472—1482.
9. *Cauzzi G., Falchi A., Falciani R.* Mass motions in young active region // *Mem. S. A. It.*—2003.—**74**.—P. 659—662.
10. *Chae J., Qiu J., Wang H., Goode P. R.* Extreme-ultraviolet jets and H α surges in solar microflares // *Astrophys. J.*—1999.—**513**, N 1.—P. L75—L78.
11. *Dominguez S. V., van Driel-Gesztelyi L., Bellot Rubio L. R.* Granular-scale elementary flux emergence episodes in a solar active region // *Solar Phys.*—2012.—**278**, N 1.—P. 99—120.
12. *Emonet T., Moreno-Insertis F.* The physics of twisted magnetic tubes rising in a stratified medium: two-dimensional results — 1998 // *Astrophys. J.*—1998.—**492**.—P. 804—821.
13. *Engell A. J., Siarkowski M., Gryciuk M., et al.* Flares and their underlying magnetic complexity // *Astrophys. J.*—2011.—**726**.—P. 12—20.
14. *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensation // *Astrophys. J.*—1989.—**346**, N 2.—P. 1019—1029.
15. *Grigor'ev V. M., Ermakova L. V., Khlystova A. I.* Emergence of magnetic flux at the solar surface and the origin of active regions // *Astron. Repts.*—2009.—**53**, N 9.—P. 869—878.
16. *Grigor'ev V. M., Ermakova L. V., Khlystova A. I.* The dynamics of photospheric line-of-sight velocities in emerging active regions // *Astron. Repts.*—2011.—**55**, N 29.—P. 163—173.
17. *Guglielmino S. L., Bellot Rubio L. R., Zuccarello F., et al.* Multiwavelength observations of small-scale reconnection events triggered by magnetic flux emergence in the solar atmosphere // *Astrophys. J.*—2010.—**724**.—P. 1083—1098.
18. *Gupta M., Rajmal J., Jayshree T., et al.* Microflares as possible sources for coronal heating // *J. Astrophys. Astr.*—2008.—**29**.—P. 171—177.
19. *Hood A. W., Archontis V., Galsgaard K., et al.* The emergence of toroidal flux tubes from beneath the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**503**.—P. 999—1011.
20. *Jess D. B., Mathioudakis M., Browning P. K., et al.* Microflare activity driven by forced magnetic reconnection // *Astrophys. J. Lett.*—2010.—**712**.—P. L111—L115.
21. *Jiang R. L., Fang C., Chen P. F.* Numerical simulations of chromospheric microflares // *Astrophys. J.*—2010.—**710**.—P. 1387—1394.
22. *Kondrashova N. N., Pasechnik M. N., Chornogor S. N., et al.* Atmosphere dynamics of the active region NOAA 11024 // *Solar Phys.*—2013.—**284**, N2—P. 499—513.
23. *Kozu H., Kitai R., Brooks D. H., et al.* Horizontal and vertical flow structure in emerging flux regions // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2006.—**58**.—P. 407—421.
24. *Lagg A., Woch J., Solanki S. K., et al.* Supersonic downflows in the vicinity of a growing pore Evidence of unresolved magnetic fine structure at chromospheric heights // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**462**.—P. 1147—1155.
25. *Lites B. W., Skumanich A., Martinez Pillet V.* Vector magnetic fields of emerging solar flux I. Properties at the site of emergence // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**333**.—P. 1053—1068.
26. *Liu Ch., Qiu J., Gary D. E., et al.* Studies of microflares in RHESSI hard X-ray, Big Bear Solar Observatory H α , and Michelson Doppler imager magnetograms // *Astrophys. J.*—2004.—**604**.—P. 442—448.
27. *Liu Yu., Kurokawa H.* On a surge: properties of an emerging flux region // *Astrophys. J.*—2004.—**610**.—P. 1136—1147.

28. Longcop D. W., Fisher G. H., Arendt S. The evolution and fragmentation of rising magnetic flux tubes // *Astrophys. J.*—1996.—**464**.—P. 999—1011.
29. Luoni M. L., Demoulin P., Mandrini C. H., et al. Twisted flux tube emergence evidenced in longitudinal magnetograms: magnetic tongues // *Solar. Phys.*—2011.—**270**, N 1.—P. 45—74.
30. Madjarska M. S., Doyle J. G., de Pontieu B. Explosive events associated with a surge // *Astrophys. J.*—2009.—**701**.—P. 253—259.
31. Schlichenmaier R., Rezaei R., Bello Gonzalez N. On the formation of penumbrae as observed with the German VTT, SOHO/MDI, and SDO/HMI // *Hinode-4. Astron. Soc. Pacif.* / Eds L. R. Bellot Rubio, F. Reale, M. Carlsson.—2012.—CS-455.
32. Schmidt W., Muglach K., Knolker M. Free-fall downflow observed in He I 1083.0 nanometers and H // *Astrophys. J.*—2000.—**544**.—P. 567—571.
33. Schmieder B., Peres G., Enome S., et al. Energy transport and dynamics // *Solar. Phys.*—1994.—**153**.—P. 55—72.
34. Schmieder B., Rust D. M., Georgoulis M. K. Emerging flux and the heating of coronal loops // *Astrophys. J.*—2004.—**601**.—P. 530—545.
35. Spadaro D., Billotta S., Contarino L., et al. AFS dynamic evolution during the emergence of an active region // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**.—P. 309—319.
36. Strous L. H., Zwaan C. Phenomena in an emerging active region. II. Properties of the dynamic small-scale structure // *Astrophys. J.*—1999.—**527**.—P. 435—444.
37. Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., et al. Physical characteristics of AR 11024 plasma based on SphinX and XRT data // *Cent. Eur. Astrophys. Bull.*—2011.—**35**.—P. 171—180.
38. Valori G., Green L. M., Demouli P., et al. Nonlinear force-free extrapolation of emerging flux with a global twist and serpentine fine structures // *Solar. Phys.*—2012.—**278**, N 1.—P. 73—97.

Статья поступила в редакцию 28.10.13