

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА СВЯЗИ ВСПЛЫТИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ТОКОВ И СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК 10 МАЯ 2012 Г.

М. А. Лившиц,^{1,*} И. Ю. Григорьева,^{2,**} И. И. Мышьяков,^{3,***} Г. В. Руденко³

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения*

радиоволн им. Н.В. Пушкова, Москва, Троицк, Россия

²*Главная астрономическая обсерватория Российской*

академии наук, Пулковое, С.-Петербург, Россия

³*Институт солнечно-земной физики Сибирского*

отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

Мы проанализировали многоволновые наблюдения и данные о магнитном поле солнечной вспышки 10 мая 2012 г. (04:18 UT). Было зарегистрировано обращение знака сигнала в измерениях магнитного поля вдоль луча зрения в тени небольшого пятна. Этот эффект, по крайней мере, частично, связан со всплытием нового магнитного поля. Практически одновременно с этим, произошел всплеск жесткого рентгеновского излучения, и возникла волна в диапазонах вакуумного ультрафиолета (ВУФ) – „солнцетрясение“, связанная с воздействием возмущения в области энерговыделения на фотосферу. В начале события зарегистрировано появление вспышки типа „сигмоид“, но она не распространилась, как обычно, вдоль нейтральной линии. По данным о полном векторе (SDO/HMI) была проведена экстраполяция магнитных полей активной области (АО) 11476 в корону и получено распределение вертикальных токов j_z на фотосфере. Известно, что при изучении распределения токов во всей АО, связь между ними и возникновением вспышек очень сложная. В данном случае мы подтвердили, что ожидаемая „идеальная“ связь и изменение системы токов до и после вспышки, описанная, например, в работе Шарыкина и Косовичева, реализуются только в области сигмоида. Проведено сравнение результатов с наблюдениями двух вспышек этой АО в этот день, одна из которых имела другой тип, а другая – аналогична исследуемой. Эти результаты – аргумент в пользу того, что фор-

мирование и выброс крупномасштабных замагниченных жгутов в сигмоидных вспышках связаны с влиянием сдвиговых движений в фотосфере и выносом спиральности в магнитной трубке и дальнейшим развитием неустойчивости тороидального плазменного шнура.

1. ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие 15 лет нового века космические аппараты (КА) TRACE, RHESSI, КОРОНАС-Ф и др. обеспечили получение огромной информации о нестационарных процессах на Солнце. Были детально изучены характеристики источников рентгеновского излучения [1], его связи с микроволновым и оптическим свечением вспышек. В последние 50 лет считалось, что эти явления происходят в короне и вызываются пересоединением магнитных силовых линий. Однако наблюдения полного вектора магнитного поля, проводимые на *Hinode* и SDO/HMI [2] и AIA [3] и проведенная теоретическая интерполяция фотосферных полей в корону [4] показали, что при эволюции активных областей энергия магнитного поля накапливается на очень низких высотах хромосферы. Там действуют силы Лоренца и существенно усиливаются электрические токи. Свободная энергия токов реализуется на низких высотах, приводя к вспышкам, выбросу CME и „солнцетрясениям“ (sunquakes). Таким образом, от установившегося ранее термина „корональная вспышка“ приходится возвращаться к прежним представлениям 60-70-х годов о хромосферных вспышках. Это мнение высказывается даже сторонниками теории пересоединения как механизма возникновения вспышек [5].

На заре измерений магнитных полей на Солнце А.Б. Северный [6] продемонстрировал, что источники отдельных вспышечных ядер в хромосфере располагаются вблизи линии раздела полярностей. Он и его соавторы показали, что эти ядра возникают в местах с большим градиентом магнитного поля. По первым измерениям полного вектора магнитного поля в АО на Солнце им было начато сопоставление электрических токов с развитием вспышек. Однако обнаруженная связь распределения вертикального маг-

* Electronic address: maliv@mail.ru

** Electronic address: irina.2014.irina@mail.ru

*** Electronic address: rud@mail.iszf.irk.ru

нитного поля с узлами вспышек в хромосферной линии H_{α} оказалась весьма сложной. Только сейчас эту проблему, обсуждаемую Северным и Растом [7], оказывается возможной исследовать сколько-нибудь детально по современным наблюдениям динамики магнитных полей, многоволновым наблюдениям вспышек и развитию теоретических представлений об электромагнитных процессах на Солнце.

Современные исследования связи эволюции магнитных полей с развитием нестационарных процессов базируются на нескольких полученных ранее результатах. Существенным оказалось обнаружение всплытия новых магнитных полей. Изменение конфигурации поля может приводить к внезапному выделению энергии, и в импульсных вспышках к усилению излучения одновременно с развитием движений плазмы (СМЕ и других) и появлением EUV-волны (солнцетрясений). Нагрев плазмы в хромосфере может осуществляться при диссипации токов [8], работой сил Лоренца [9] или гибелью там ускоренных частиц в начале процесса газодинамического отклика, впервые рассмотренного Костюк и Пикельнером в [10]. Для понимания природы нестационарных процессов отметим, что в ряде случаев до вспышки или уже в ходе ее формируется крупномасштабный жгут обычно вблизи нейтральной линии, выброс которого приводит к вспышке типа сигмоид (теоретическое рассмотрение проведено в работе [11] (см. ссылки там же) и последующему формированию постэруптивной аркады.

Таким образом, развитие теории и новые наблюдательные данные потребовали разработки новых представлений о развитии МГД процессов во внешней атмосфере Солнца. Эти взгляды должны учитывать прямое влияние токов на нагрев и движения плазмы в хромосфере, и особенности поведения плазмы в бессиловых и потенциальных полях в короне, включая возможности пересоединения силовых линий и формирования тонких токовых слоёв. Первостепенным в разработке этой общей проблемы в целом является построение системы токов в активных областях. Здесь необходимо учитывать топологию магнитных полей в АО или в комплексах активности, начало изучения которой уже положено в [12]. Резкая перестройка конфигурации магнитных полей оказывается тесно связанной с развитием нестационарных явлений. Влияние сдвиговых движений – „шира“ и возможность такой перестройки магнитной конфигурации неоднократно рассматривались и ранее [13], см. также обсуждение последующих работ в [14] обычно для процессов в короне с пересоединением силовых линий. Наблюдения выброса скрученных жгутов и численное моделирование [11] прямо указывают на характер

такой перестройки конфигурации магнитных полей и системы токов.

Разумеется, важным является выявление тех наблюдательных свидетельств, которые могут подтвердить или опровергнуть новые теоретические разработки. Пожалуй, одной из первых в этом направлении является работа [15], в которой на последнем рисунке 10 схематически изображена система токов, с вертикальными токами j_z разного знака по обе стороны от нейтральной линии. Да, действительно, такую картину следовало бы ожидать в простейшем случае перехода от закрученного жгута к постэруптивной фазе вспышки. Однако сейчас имеются многочисленные регистрации полного вектора многих АО, по которым восстанавливается распределение вертикального тока j_z . По соответствующим картам j_z легко убедиться, что, также как и в пионерских работах Северного, распределение вертикального тока во всей АО не соответствует такой идеальной картине.

В нашей работе мы постарались изучить связь токов с возникновением нестационарных процессов на примере событий 10 мая 2012 года. Первая вспышка с максимумом 04:18 UT (GOES) была необычной, поскольку в ней всплытие нового поля наблюдалось в тени небольшого пятна с одновременным всплеском жесткого рентгена. Это событие сопровождалось солнцетрасением. Вторая вспышка с максимумом в 05:10 UT была более типичной, а в 20:26 UT – третье явление такое же, как и первое, но менее мощное. После Введения, во 2-ом разделе мы анализируем излучение первой вспышки. В разделе 3 дан анализ наблюдений всплытия магнитного поля около 04:00 UT, в разделе 4 обсуждается поведение фотосферных и корональных магнитных полей, и в 5-ом разделе проводится краткое сравнение с данными о двух последующих вспышках. В последнем разделе обсуждается вопрос о возникновении и возможной модели сигмоидных вспышек с выбросом больших скрученных магнитных жгутов.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВСПЫШКИ 10 МАЯ 2012 Г. (04:18 UT)

Рассматриваемая АО 11476 появилась на диске 5 мая 2012 г. и к 10-му числу достигла по площади около 1000 мдп. Соответствующая группа пятен состояла из большого и сложного ведущего пятна и мелких пятен в центре и хвостовой части группы. В этот день в этой АО произошли две большие М-вспышки и множество слабых С-вспышек. В этой статье мы исследуем события в этой АО, в основном, первую вспышку M5.7

(04:11-4:23, максимум в 4:18 UT по GOES) и, затем, сравниваем ее со вспышками C7.9 – на стадии затухания первого события и с вечерней M1.7 в той же АО (см. рис. 1).

Первая утренняя вспышка была обычной по характеристикам рентгеновского и микроволнового излучения. Она произошла в непосредственной близости от небольшого пятна в центре группы в районе нейтральной линии магнитного поля. Она имела импульсный характер и была достаточно жесткой.

На рис. 2 слева показана вся АО 11476 в белом свете (SDO/HMI Ic), прямоугольником выделена область (A), где и наблюдалась вспышка. Справа помечена квадратом область (B), в которой зарегистрирована смена знака сигнала на магнитограмме вдоль луча зрения (SDO/HMI LOS). Также справа внизу показан вид вспышки в диапазоне 131 Å (SDO/AIA) на фазе роста интенсивности.

Вообще говоря, по рентгеновскому излучению по данным КА GOES и RHESSI [16] – это типичное событие, несколько более жесткое, чем, в среднем, для вспышек M5 класса как показано на рисунке 1 (наклон спектра фотонов $\gamma = 3.0$ в диапазоне энергий 20-80 кэВ, (см. рис. 1 справа внизу)).

Временные профили интенсивности (параметр Стокса „I“) и поляризации (параметр Стокса „V“) на частотах 17.0, 9.4, 3.75 и 2.0 ГГц показаны слева и в центре на рис. 3 по данным поляриметров Nobeyama (NoRP: [17, 18]). Величины потоков и динамика их интенсивности соответствуют большинству вспышек такой мощности. Как обычно, выделяются два основания вспышечной петли, располагающиеся в магнитных полях различного знака (см. рис. 3, справа). В то же время, поведение поляризованного излучения несколько более сложное. Так регистрируется демонстрирует обращение знака поляризованного излучения на частоте 9.4 ГГц, кроме того, временной ход поляризации весьма сложный, в частности, на 2 ГГц видно резкое изменение знака в 04:16 UT. Такая картина эволюции поляризованного излучения на микроволнах, вероятно, свидетельствует о сложной топологии в АО на уровне нижней короны (см. ниже).

3. ВСПЛЫТИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Известно, что во многих случаях наблюдается связь между появлением вспышки и всплытием нового магнитного поля. Однако, время и место этого процесса и собственно вспышки, как правило, не совпадают. Иначе говоря, появление нового магнитного поля

приводит к некоторой дестабилизации магнитной конфигурации. Появление вспышки в данной АО может происходить до или после всплытия или даже между отдельными его эпизодами, а также достаточно далеко от места всплытия поля. В данном случае, эти два явления совпали и по месту и во времени. Кроме того, новое магнитное поле появляется обычно вблизи нейтральной линии, разделяющей холмы с небольшой напряженностью магнитного поля. В нашем случае всплытие произошло с тени небольшого пятна в центре АО, который на рис. 2 помечен квадратом (В). Изменение знака сигнала (SDO/HMI LOS) здесь свидетельствует о всплытии поля, но еще определенно не означает изменение самого знака поля на противоположный.

Нами сделан анализ записи параметров Стокса на участке с предполагаемым всплытием, и мы убедились, что величины распределены по Гауссу. Разумеется, сильные течения плазмы могут также вмешиваться в измерения поля. Одним из аргументов реальности всплытия поля является то, что такая же картина наблюдалась и во вспышке вечером в 20:26 UT в том же месте в той же АО.

Эволюция во времени всплытия поля в области (В) показана на рис. 4 для некоторых моментов времени по данным SDO/HMI LOS-магнитограмм. Обратный знак сигнала наблюдался в течение 4 минут и, затем достиг первоначального значения в течение последующих еще 4 минут. К сожалению, данные полного вектора магнитного поля доступны только для моментов до и после максимального эффекта в сигнале LOS-магнитограмм. Заметим, что направленные вверх движения зарегистрированы по данным SDO на кадре 04:16:30 UT.

Солнцетрясение в этом событии зарегистрировано вблизи максимума жесткого рентгеновского излучения [19]. Такой отклик внезапного выделения энергии на фотосфере проецируется на точку в вершине низкой вспышечной петли. Это проявляется на рис. 3, правая панель, где звездочкой отмечено положение жесткого рентгеновского источника в максимуме всплеска и приведены изолинии радиояркости на 17.0 ГГц и 34.0 ГГц по данным радиогелиографа Нобеяма (NoRH: [20]), наложенные на распределение магнитных полей по лучу зрения на момент максимума события. Видно, что на высокой частоте 34.0 ГГц наилучшим образом выделяются основания низкой вспышечной петли, видимой и в различных диапазонах SDO/AIA. В данном случае солнцетрясение связано, скорее всего, к моменту и локализации области первичного энерговыделения. Это предположение согласуется с данными о солнцетрясениях в работах [15, 21].

4. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ПОЛЕЙ В КОРОНУ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В АО 11476

В последние годы изменились наши представления о роли магнитного поля в развитии активности во внешней атмосфере Солнца. Выяснилось, что магнитное бета (отношение газового давления к магнитному), близкое к 1 сразу над фотосферой, становится очень малым на высотах хромосферы и короны. Это приводит к тому, что в основании АО на плазму действуют силы Лоренца, а выше – поля становятся бессиловыми. При этом при эволюции полей на хромосферных высотах может возникать значительное превышение энергии магнитного поля над соответствующим значением для бестокового (потенциального) поля и эта свободная энергии может расходоваться на развитие нестационарных процессов.

Наблюдения полного вектора магнитного поля в фотосфере позволяют проводить расчеты нелинейных бессиловых полей до корональных высот. Этот метод NLFFF (a non-linear force free field) экстраполяции широко применяется в физике Солнца (см., например, [4]).

В нашей работе для расчета коронального магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении используется оптимизационный метод (впервые предложен в работе [22]) в реализации [23]). Суть оптимизационного метода заключается в последовательном преобразовании некоторого начального (потенциального) распределения магнитного поля к бессиловой структуре в соответствии с фотосферной магнитограммой. Для этой цели в работе вводится функционал вида:

$$L = \int_V [B^{-2} |\nabla \times \mathbf{B}|^2 + |\nabla \cdot \mathbf{B}|^2] dV, \quad (1)$$

который равен 0, если поле B является бессиловым, и положителен в обратном случае. Таким образом, в процессе решения задачи на минимизацию функционала (1) поле в объеме V приобретает бессиловую конфигурацию. В качестве начального распределения поля используется потенциальное поле, рассчитываемое по нормальной компоненте фотосферного поля по технологии быстрого Фурье преобразования FFT (Fast Fourier Transformations). Отличительной особенностью применяемой реализации оптимизационного метода является использование полной системы эволюционных уравнений поля

(см. [23]). Таким образом, в процессе расчетов изменяется распределение поля на боковых и верхней границе расчетной области, изначально не определяемое из измерений. Такой подход позволяет повысить качество восстановления поля.

Результат вычисления хода силовых линий представлен на рисунке 5 (для области (А) на рис. 2) до высот 25 000 км. Здесь видно, что в самом начале вспышки силовые линии вокруг холма поля небольшого пятна концентрируются вдоль нейтральной линии. В области наибольшего их сгущения и формируются ядра вспышки (см. изображение на рис. 5 в диапазоне 171 \AA). Вообще говоря, во многих вспышках формируется жгут магнитных силовых линий, охватывающий значительную часть нейтральной линии, особенно в тех местах, где она разделяет холмы с большой напряженностью магнитного поля. В нашем случае можно предположить, что небольшой жгут сформировался только с южной стороны небольшого пятна в центре группы. Как и в других сигмоидных вспышках такая форма магнитных силовых линий самой АО способствует развитию вспышки типа сигмоид. В данном случае перестройка поля произошла практически сразу после формирования токов над нейтральной линией.

На рис. 5 показаны только замкнутые силовые линии в пределах выбранной области (А) в проекции на картинную плоскость. Небольшое пятно отрицательной полярности здесь окаймляет сгущение силовых линий, продолжающееся и далее над нейтральной линией поля. В настоящее время считается, что в этом участке над нейтральной линией текут основные бессиловые токи, обычно отождествляемые с плазменным токовым жгутом. Существенным является то, что локализация этого сгущения силовых линий совпадает с небольшим „сигмоидом“ – формой расположения узлов вспышки.

Экстаполяция (см. рис.5) показывает, что кроме низких силовых линий, существуют также более высокие, поднимающиеся выше 5000 км и соединяющие небольшое пятно отрицательной полярности с холмом противоположного знака поля. Они располагаются над жгутом и, возможно, их существование препятствует развитию выброса. В последующие моменты развития вспышки по данным ВУФ SDO/AIA сформировались петли с высотой в 10-20 тысяч км, но выхода плазмы в межпланетное пространство не произошло (то есть СМЕ отсутствовало, как это следует из радиоданных - нет радиовсплеска II типа и т.д.).

В нашей работе мы вычислили распределение значений вертикальных токов j_z во всей АО от 03:48 UT до 05:48 UT 10 мая 2012 г. по данным полного вектора маг-

нитного поля с интервалом в 720 секунд. Изучение локализации вспышек в этот день подтверждает выводы о тесной корреляции мест появления вспышечных ядер и участков усиления тока [24]. Однако определенной закономерности в поведении токов во всей АО и развитии вспышек не просматривается. А именно, все токи сосредоточены вблизи нейтральной линии, включая области близ пятен. Поэтому некоторые изменения на участке в средней части нейтральной линии в АО замыкаются в суммарных токах одного и другого знака. В работе [15] обращено внимание на то, что при „идеальной“ системе токов должен наблюдаться рост усредненных токов различных знаков по обе стороны от нейтральной линии, соответственно. В нашем случае, как и в рассмотрении связи вертикальных токов со вспышками в 70-х годах, этот эффект применительно ко всей АО, проявлялся очень слабо.

Но так как самые сильные изменения поля на фазе роста вспышки наблюдались в том месте, где был зарегистрирован сигмоид, мы изучили этот эффект на соответствующем выделенном участке (А) (см. рис. 1). На рис. 6 для двух моментов времени показано распределение вертикальных токов на фотосфере. На этих кадрах виден возникший около 04:00 UT контакт токов разных знаков в районе координат Y 256, X – 350 угл. секунд. Это место совпадает с местом сгущения силовых линий на рис. 5 над точкой линии раздела полярностей в области сильных полей.

Вообще говоря, изменение картины токов прослеживается по совокупности карт j_z , построенных по данным о полном векторе поля. Наибольшие изменения токов происходят в указанном месте локализации сигмоида. Последующая эволюция системы токов оказывается тесно связанной с развитием многочисленных слабых вспышек в АО 11476. Заметим также, что значительные изменения токов происходили в 04:00-04:24 UT в области Y 250, X – 364 угл. секунд, которая является основанием петли, соединяющей место вспышки поля и холм положительной полярности (см. рис. 5).

Кроме изменения картины токов, некоторое различие двух изображений на рис. 6 слева проявляется во всех величинах тока, что в данном примере отражается даже в различии шкал. Чтобы изучить этот эффект, мы определили среднее значение вертикального тока во всей площадке (А) . Усреднение проводилось отдельно для пикселей с положительными и отрицательными полями. В интервале времени от 04:00 UT до 05:48 UT на рис. 6в заметен общий тренд усреднённого вертикального тока j_z обоих знаков. Весь тренд отражает тот факт, что в этот день вспышечная активность этой

АО постепенно возрастала.

Эффект, связанный с рассматриваемой вспышкой, проявляется в виде некоторого увеличения усреднённых токов во время вспышки 04:00 UT – 04:24 UT. По данным жесткого рентгена максимум вспышки приходится на 04:16:30 UT (см. рис. 1). В нашем случае максимальное значение соответствует времени 04:24 UT, и далее спадает. Такой характер изменения j_z отмечен и в [15]. Величина максимума небольшая и лишь несколько превышает значение 3σ (её величина σ приблизительно равна $2.3 \cdot 10^{-4}$ А/м² определяется по изменению токов в площадке той же активной области в спокойные моменты времени).

Заметим также, что указанный максимум вспышки произошёл между моментами 04:12 UT и 04:24 UT. К сожалению, в открытом доступе нет данных по полному вектору магнитного поля с лучшим временным разрешением и поэтому наш эффект изменений характеристик токов во время этой вспышки может быть несколько занижен.

5. ДРУГИЕ ВСПЫШКИ 10 МАЯ 2012 ГОДА

Рассматриваемая АО 11476 была вспышечноактивной. Начиная с 6 мая, каждый день в ней наблюдались большое количество слабых C-вспышек и в некоторые дни, вплоть до 17 мая, – 1-2 M-вспышки.

Кроме исследуемого события M5.7 класса в этот день в АО 11476 произошли 16 C-вспышек и еще одна M1.7 в 20:20 UT. По распределению продольного магнитного поля (SDO/HMI LOS) зарегистрировано изменение величины сигнала в тени того же небольшого пятна, как и в первой M-вспышке. Время регистрации этого эффекта примерно в два раза меньше, чем в первой вспышке (с ~20:24 UT по 20:29 UT). Однако, в отличие от первой M5.7, здесь обращение знака сигнала магнитограммы HMI LOS в месте всплывания не произошло.

Эта M1.7 вспышка также была достаточно жесткой. По данным КА FERMI наблюдалось излучение в области ~ 100 кэВ. В этот же интервал времени около 20:24 UT регистрировались значительные потоки излучения в области выше 50 кэВ по данным КА *Suzaku* с максимумом более 2000 импульсов в секунду (см. каталог <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/HXD-WAM/WAM-GRB/solar/untrig/120510202227.html>). Таким образом, условия, приводящие к явлениям

типа „быстрого“ сигмоида могут повторяться в данной АО через промежуток времени от нескольких часов до суток.

Большинство слабых С-вспышек в этот день имели другую природу, чем события класса М. Для примера мы рассмотрели вспышку С7.9, которая произошла на фазе спада мягкого рентгена нашего основного события. Она возникла в 05:04 UT над нейтральной линией между исследованным нами и ведущим пятнами. Далее очаги вспышки протянулись от этой точки непосредственно к большому пятну. Такие слабые события могли быть инициированы его активностью. В некоторых случаях эта активность также связана со всплытием нового поля около него, или с вращением пятна, или просто с возникновением новых магнитных холмов. Часть из слабых событий являются достаточно жесткими, но они происходят, как правило, на фазе спада мягкого излучения больших событий. Большая жесткость таких событий обусловлена более благоприятными условиями ускорения частиц в ловушках, где еще существуют некоторое количество электронов с энергиями более 10 кэВ, оставшимися там от предыдущего события [25].

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наши выводы сводятся к следующему:

1) Фактически в анализируемом событии наблюдалось импульсное энерговыделение, сопровождающееся всплеском жесткого рентгеновского и микроволнового излучения. Одновременно с этим произошла и реакция фотосферы, проявившаяся в виде возникновения ВУФ-волны – солнцетрясения. Имеются основания полагать, что при этом начала формироваться вспышка типа сигмоида, но этот процесс не получил дальнейшего развития. Во второй М-вспышке в 20:20 UT, аналогичные явления повторились в отличие от многих слабых С-вспышек в других участках этой АО.

2) По данным полного вектора магнитного поля вычислены вертикальные токи во всей АО. Временной тренд величины токов определяет общее развитие вспышечной активности данной АО. Простая схема токовой цепи [15], возникающая при вспышке после преобразования токов над нейтральной линией в токи в петлях, располагающихся выше над фотосферой под большим углом к нейтральной линии, и замыкающиеся под фотосферой, не согласуется с вычисленными значениями этих токов. Однако, если про-

водить такие вычисления на участке с длинной, ограниченной размером вспыхивающего сигмоида, то обнаруживается локальный максимум на временном ходе как положительных, так и отрицательных значений вертикального тока. Это может свидетельствовать об изменении системы токов.

3) Оба примера двух рассмотренных М-вспышек умеренной мощности продемонстрировали то, что как солцетрясение, так и ускорение частиц происходят эффективнее в достаточно сильных магнитных полях, располагающихся вблизи линии раздела полярностей.

Обсудим кратко связь полученных здесь результатов с общей проблемой развития нестационарных процессов. Физика сигмоидных вспышек широко обсуждается в литературе. Имеется большой опыт численного моделирования этих процессов (см., например, [11] и ссылки там). Прежние работы широко использовали представления о пересоединении магнитных силовых линий. Сейчас же, по-видимому, главным фактором является динамика токов, а роль пересоединения силовых линий становится существенной в высоких корональных слоях. Из проведенных ранее исследований остается справедливым вывод о том, что плазменный жгут с током не выкидывается непосредственно из верхних слоев конвективной зоны. Подфотосферные крупномасштабные движения приводят к различным сдвигам оснований силовых линий вдоль нейтральной линии (то есть к ширу). Кроме того, спиральность также выносится наружу из-под фотосферных слоев.

Таким образом, „вынос“ из-под фотосферы ширы и спиральности создает условия для формирования жгута. Как теоретические соображения так и экстраполяция нелинейных бессиловых магнитных полей в корону показывают, что выше описанная эволюция магнитного поля АО приводит к накоплению в хромосфере некоторого количества свободной энергии, которое может затрачиваться на развитие нестационарного процесса.

Сам момент большой импульсной вспышки связывается с перестройкой системы токов АО. А именно, та совокупность силовых линий и токов вдоль них существенно изменяется, приближаясь к „идеальной“, то есть к токам вдоль петель, располагающихся в проекции на фотосферу под большим углом к нейтральной линии.

Фактически после выброса жгута магнитная конфигурация возвращается в исходное состояние. При дальнейшем существовании прежних крупномасштабных подфо-

тосферных движений процесс формирования жгута повторяется, то есть развивается некоторая серия вспышек похожих друг на друга. Эти соображения согласуются с результатами последних численных расчетов [26].

Одним из важных вопросов является, разумеется, выяснение механизма самого вспышечного процесса. Обратим здесь внимание на то, что перед вспышкой сильный ток в замагниченном жгуте должен замыкаться в подфотосферных слоях. Возникает мысль о тороиде в меридианальной плоскости, частично поднявшимся над поверхностью фотосферы. Такая геометрия закрученного магнитного поля изображена на рисунке 2 в работе [27].

Вообще говоря, жгуты могут долго существовать даже в АО с достаточно сложной топологией. Однако, в некоторых случаях, особенно при сильных токах, может развиваться неустойчивость тороидального плазменного шнура (torus instability) [28]. В лабораторных экспериментах найдены условия развития такой неустойчивости [29]. Разумеется в условиях вспышек на Солнце и маломассивных звездах нельзя настаивать на конкретном типе неустойчивости, и разумнее рассматривать более общий случай гидродинамических неустойчивостей в плазменном жгуте с сильным полем.

На данный момент актуальной стала проблема построения токовой системы во всей АО. Только сейчас ясно, что сильные токи и большие силы Лоренца существуют очень низко (на первых 2-3 тысячах км от фотосферы), а выше в короне поля быстро приближаются к потенциальным с возможным существованием там тонких токовых слоев.

Кроме общих соображений об этом свидетельствует и сложное поведение поляризации микроволнового излучения. Известно, что знак поляризации обращается при переходе от центра к краю диска. Это вызвано тем, что луч попадает в квазипоперечное магнитное поле (QT-область) (см., например, [30]). В нашем случае (см. рис. 3) для одного и того же момента времени (без движения источника) мы видим обращение знака поляризации на частоте 9.4 ГГц.

Кроме этого известного эффекта, на частоте 2 ГГц зарегистрировано кратковременное вторичное обращение с максимумом поляризованного излучения в 04:16 UT. Это, в свою очередь, свидетельствует о более сложной топологии коронального магнитного поля, когда усложнение картины поляризации связано как с зависимостью от проекционных эффектов (это имеет место при прохождении QT-области, например, [31]), так и с усложнением топологии короны АО.

Таким образом, внутри некоторого небольшого объема может существовать „идеальная“ система токов. Но обычно она погружена в совокупность независимых магнитных потоков, разделенных сепаратрисными поверхностями. В итоге, появление особенностей поляризационного излучения на низких частотах микроволнового диапазона указывает на роль пересоединения в корональных слоях АО. Заметим, что реальное начало изучения топологии короны было положено в работе [12].

Отметим также, что на Солнце могут реализоваться два случая развития нестационарных процессов: чаще – с формированием СМЕ (особенно в мощных вспышках), и реже – с подъемом петли без выноса вещества наружу. Последний вариант наблюдался в М-вспышках 10 мая 2012 года.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи и В.И. Выборному за содействие в выполнении работы. Также благодарят NASA за возможность работы с данными SDO и научные команды HMI и AIA. Мы используем рентгеновские данные со спутников RHESSI, GOES. А также, благодарим инструментальные команды, работающие на солнечных объектах Nobeyama.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 14-02-00922, 16-32-00315 мол-а, 15-32-20504 мол-а-вед, 15-02-03835а, 15-02-01089а, 15-02-01077а, 16-02-00749а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
1. S. Krucker, M. Battaglia, P. J. Cargill, L. Fletcher, H. S. Hudson, A. L. MacKinnon, S. Masuda, L. Sui, M. Tomczak, A. L. Veronig, L. Vlahos, S. M. White, *Astron. Astrophys. Rev.* **16**, 155 (2008).
 2. J. Schou, P.H. Scherrer, R.I. Bush, J. Schou, P.H. Scherrer, R.I. Bush, R. Wachter, S. Couvidat, M.C. Rabello-Soares, R.S. Bogart, J.T. Hoeksema, Y. Liu, T.L. Duvall, D.J. Akin, , B.A. Allard, J.W. Miles, R. Rairden, R.A. Shine, T.D. Tarbell, A.M. Title, C.J. Wolfson, D.F. Elmore, A.A. Norton, S. Tomczyk, *Solar Phys.* **275**, 229 (2012).

3. J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake, D.W. Duncan, C.G. Edwards, F.M. Friedlaender, G.F. Heyman, N.E. Hurlburt, N.L. Katz, G.D. Kushner, M. Levay, R.W. Lindgren, D.P. Mathur, E.L. McFeaters, S. Mitchell, R.A. Rehse, C.J. Schrijver, L.A. Springer, R.A. Stern, T.D. Tarbell, J.-P. Wuelser, C.J. Wolfson, C. Yanari, J.A. Bookbinder, P.N. Cheimets, D. Caldwell, E.E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W.A. Podgorski, R.I. Bush, P.H. Scherrer, M.A. Gummin, P. Smith, G. Aufer, P. Jerram, P. Pool, R. Souffi, D.L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, N. Waltham, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
4. T.R. Metcalf, M.L. De Rosa, C.J. Schrijver, G. Barnes, A.A. van Ballegooijen, T. Wiegmann, M.S. Wheatland, V. Gherardo, J.M. McTiernan, *Solar Phys.* **247**, (2), 269 (2008).
5. L. Fletcher, B.R. Dennis, H.S. Hudson, S. Krucker, K. Phillips, A. Veronig, M. Battaglia, L. Bone, A. Caspi, Q. Chen, P. Gallagher, P.T. Grigis, H. Ji, W. Liu, R.O. Milligan, M. Temmer, *Space Sci. Rev.* **159**, 19 (2011).
6. А.Б. Северный, *Некоторые проблемы физики Солнца*, (М.:Наука, Физматлит, 1988), с. 224.
7. D.M. Rust, *Astron. J.* **73**, 74 (1968).
8. В.В. Зайцев, А.В. Степанов, *Успехи Физических наук* **178**, (11), 1165 (2008).
9. G.H. Fisher, D.J. Bercik, B.T. Welsch, H.S. Hudson, *Solar Phys.* **277**, 59 (2012).
10. Н.Д. Костюк, С.Б. Пикельнер, *Астрон. журн.* **51**, 1002 (1974).
11. A.W. Hood, V. Archontis, D. MacTaggart, *Solar Phys.* **278**(1), 3 (2012).
12. J.-Y. Lee, G. Barnes, K.D. Leka, K.K. Reeves, K.E. Korreck, L. Golub, E.E. DeLuca, *Astrophys. J.* **723**(2), 1493 (2010).
13. Ю.Г. Матюхин, В.М. Томозов, *Астрон. журн.* **68**, 158 (1991).
14. Э. Прист, Т. Форбс, *Магнитное пересоединение*, (М.:Наука, Физматлит, 2005), с. 592.
15. I.N. Sharykin, A.G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **808**(1), article id. 72 (9pp), (2015).
16. R.P. Lin, B.R. Dennis, G.J. Hurford, D.M. Smith, A. Zehnder, P.R. Harvey, D.W. Curtis, D. Pankow, P. Turin, M. Bester, A. Csillaghy, M. Lewis, N. Madden, H.F. van Beek, M. Appleby, T. Raudorf, J. McTiernan, R. Ramaty, E. Schmahl, R. Schwartz, S. Krucker, R. Abiad, T. Quinn, P. Berg, M. Hashii, R. Sterling, R. Jackson, R. Pratt, R.D. Campbell, D. Malone, D. Landis, C.P. Barrington-Leigh, S. Slassi-Sennou, C. Cork, D. Clark, D. Amato, L. Orwig, R. Boyle, I.S. Banks, K. Shirey, A.K. Tolbert, D. Zarro, F. Snow, K. Thomsen, R. Henneck, A. McHedlishvili, P. Ming, M. Fivian, J. Jordan, R. Wanner, J. Crubb, J. Preble, M. Matranga,

- A. Benz, H. Hudson, R.C. Canfield, G.D. Holman, C. Crannell, T. Kosugi, A.G. Emslie, N. Vilmer, J.C. Brown, C. Johns-Krull, M. Aschwanden, T. Metcalf, A. Conway, *Solar Phys.* **210**, 3 (2002).
17. K. Shibasaki, M. Ishiguro, S. Enome, *Solar Radio Acquisition and Communication System /SORDACS/ of Toyokawa Observatory. Proceedings of the Research Institute of Atmospheric, Nagoya University* **26**, 117 (1979).
 18. H. Nakajima, H. Sekiguchi, M. Sawa, K. Kai, S. Kawashima, *Publ. Astron. Soc. Japan* **37**, 163 (1985).
 19. J.C. Buitrago-Casas, J.C. Martinez Oliveros, C. Lindsey, B. Calvo-Mozo, S. Krucker, L. Glesener, S. Zharkov, *Solar Phys.* **290**(11), 3151 (2015).
 20. H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome, K. Shibasaki, T. Takano, Y. Hanaoka, C. Torii, H. Sekiguchi, T. Bushimata, S. Kawashima, N. Shinohara, Y. Irimajiri, H. Koshiishi, T. Kosugi, Y. Shiomi, M. Sawa, K. Kai, *Proc. IEEE* **82**, 705 (1994).
 21. I.N. Sharykin, A.G. Kosovichev, I.V. Zimovets, *Astrophys. J.* 807(1), article id. 102 (9pp), (2015).
 22. M.S. Wheatland, P.A. Sturrock, G. Roumeliotis, *Astrophys. J.* **540**(2), 1150 (2000).
 23. G. V. Rudenko, I. I. Myshyakov, *Solar Phys.* **257**, 287 (2009).
 24. И.Ю. Григорьева, М.А. Лившиц, Г.В. Руденко, И.И. Мышьяков, *Астрон. журн.* **90** (8), 665 (2013).
 25. V.I. Vybornov, I.Yu. Grigor'eva, M.A. Livshits, E.F. Ivanov, *Geomagnetizm and Aeronomy* **55**(8), 1112 (2015).
 26. A. Savcheva, E. Pariat, S. McKillop, P. McCauley, E. Hanson, Y. Su, E.E. DeLuca, *Astrophys. J.* **817**(1), article id. 43, (22pp) (2016).
 27. V.S. Titov, P. Demoulin, *Astron. Astrophys.* **351**, 707 (1999).
 28. V. Shafranov, *Plasma equilibrium in a magnetic field. Rev. Plasma Phys.* (ed. Leontovich, M. A.) **2**, 103 (1966).
 29. C.E. Myers, M. Yamada, H. Ji, J. Yoo, W. Fox, J. Jara-Almonte, A. Savcheva, E.E. DeLuca, *Nature* **528**(7583), 526 (2015).
 30. В.В. Железняков, Е.Я. Злотник, *Астрон. журн.* **40**, 633, (1963).
 31. Н.Г. Петерова, Ш.Б. Ахмедов, *Астрон. журн.* **50**, 1220 (1973).

Справа: кривые эволюции усреднённого тока $j_z < 0$ (красный цвет) и $j_z > 0$ (синий цвет) 10 мая 2012 г. Для отрицательного поля показан модуль j_z . Вертикальный отрезок – ошибка измерений.

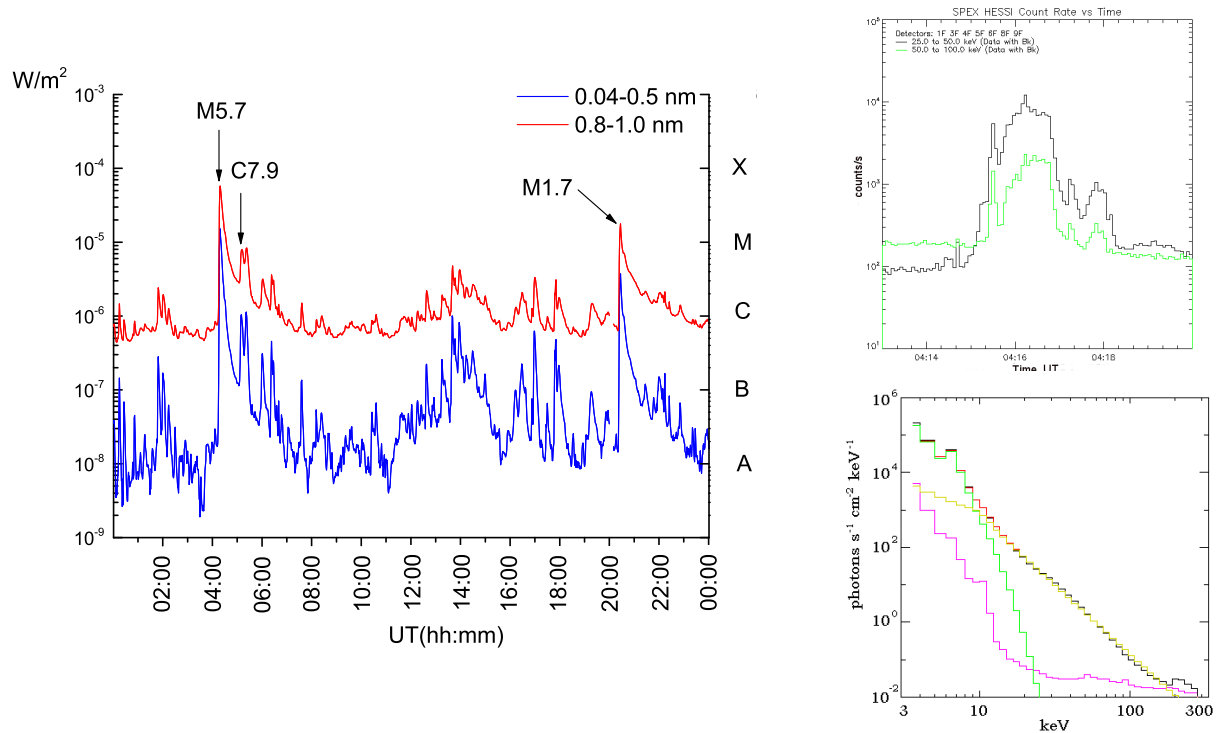


Рис. 1. Слева: временной профиль 1-мин данных GOES за 10 мая 2012 г., где стрелками отмечены изучаемые вспышки. Справа: сверху – временной HXR-профиль RHESSI - скорости счёта над фоном в диапазонах 25-50 кэВ (черная линия) и 50-100 кэВ (зелёная линия), внизу – вспышечный спектр на 04:15:44 UT 10 мая 2012 г., с вычтенным фоном (маженда); показано разделение на тепловое (зелёная линия) и нетепловое (рыжая линия) излучение.

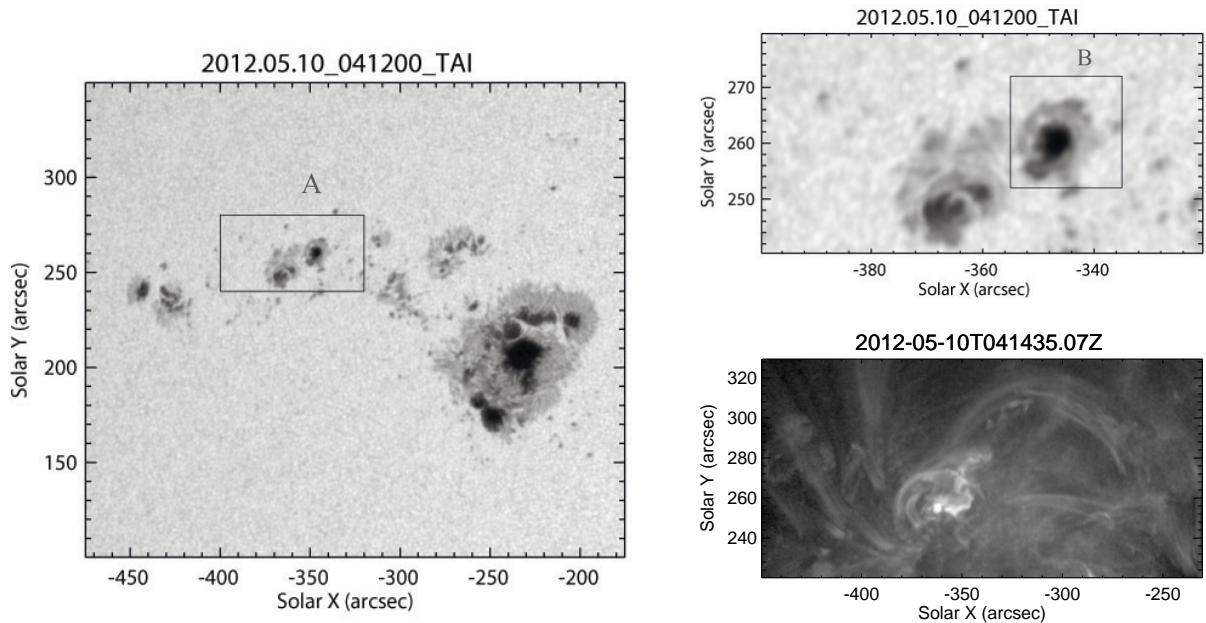


Рис. 2. Слева: изображение группы пятен АО 11476 в 04:12 UT (SDO/HMI Ic), прямоугольник – выделенная область (A). Справа: (внизу) область (A) с выделенной в ней квадратом областью (B) в тоже время; (вверху) изображение вспышки в линии 131 \AA (SDO/AIA) вблизи максимума. Шкалы – расстояние от центра диска в угл. секундах.

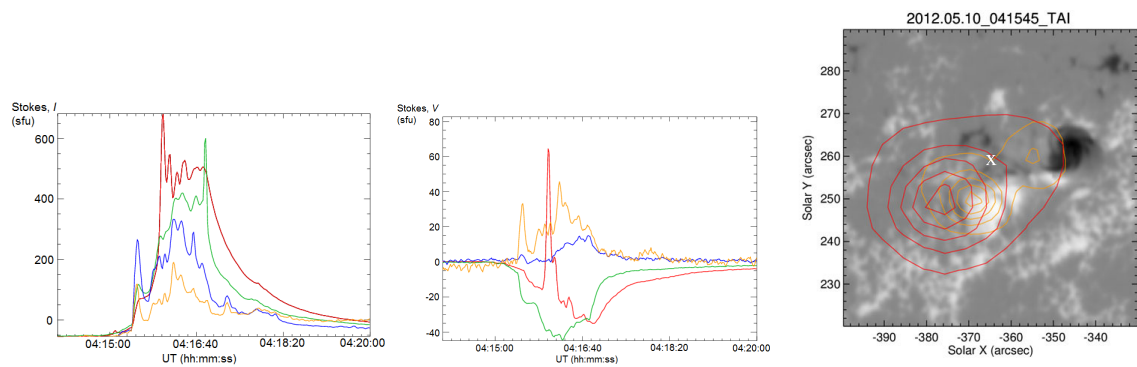


Рис. 3. Слева и в центре: временная эволюция потока на микроволнах во вспышке M5.7 10 мая 2012 (параметры Стокса „I, V“ на частотах 2.0 ГГц (красная линия), 3.75 ГГц (зелёная), 9.4 ГГц (синяя) и 17.0 ГГц (жёлтая) (Нобейма, NoRP). Справа: фрагмент LOS-магнитограммы области генерации вспышки на момент максимума; шкалы – расстояние от центра диска в угл. секундах; контуры: жёлтый – излучение на 34.0 ГГц, красный – на 17.0 ГГц (Нобейма, NoRH) на 04:15:30 UT; знак X – место возникновения вспышки по данным HXR RHESSI.

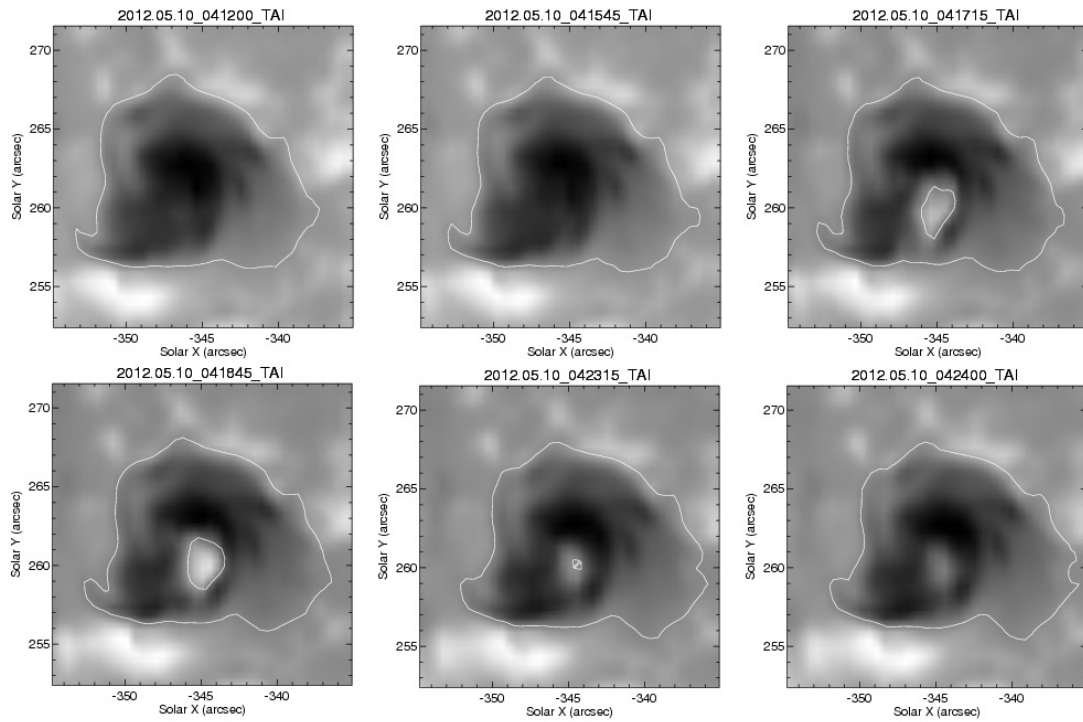


Рис. 4. Фрагменты изображения продольной компоненты магнитного поля в области вспышки в АО NOAA 11476 (SDO/HMI LOS) 10 мая 2012 г. на моменты во время регистрации вспышки с 04:12:00 UT по 04:24:00 UT, выборочно. Контурсы – выделенное локальное магнитное поле по линии раздела полярности. Шкалы – расстояние от центра диска в угл. секундах.

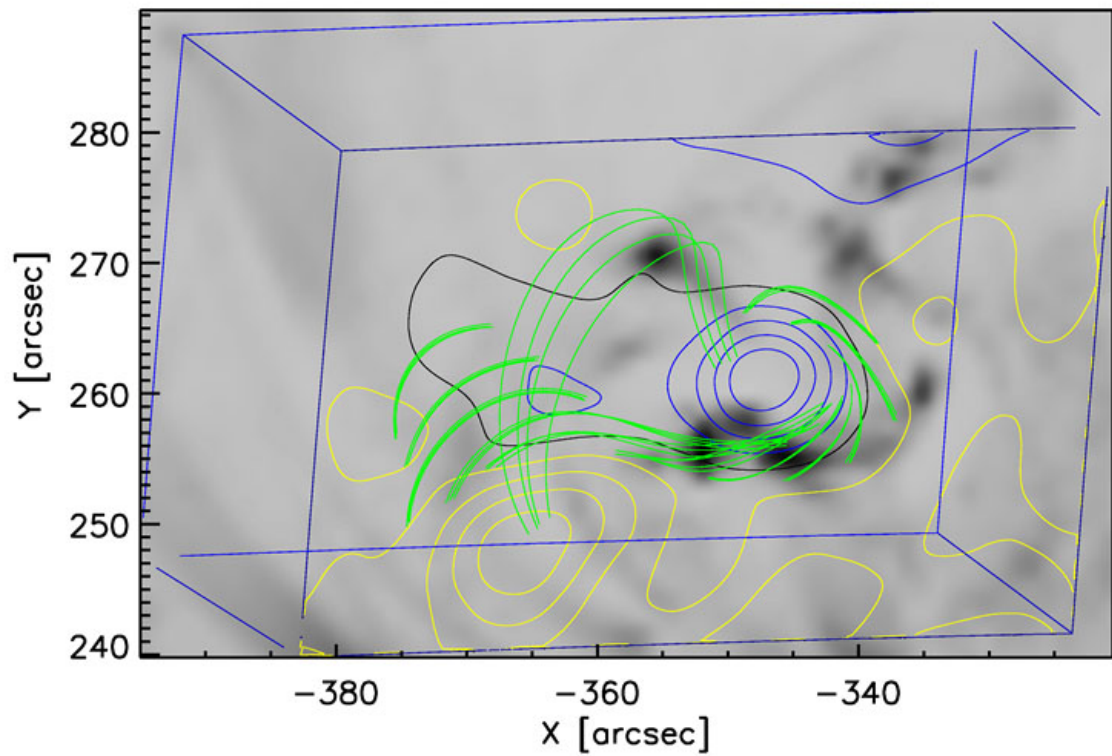


Рис. 5. Фон – фрагмент негативного изображения в EUV линии 171\AA АО NOAA 11476 (SDO/AIA) 10 мая 2012 г. в 04:12:00 UT. Жёлтым и синим цветом показаны изолинии радиальной компоненты положительного и отрицательного магнитного поля в области вспышки с напряженностью в 80%, 60%, 40%, 20% от максимума в тот же момент времени. Зелёным цветом показаны также силовые линии над нейтральной (чёрной) линией и более высокие линии петель, соединяющие холмы поля противоположного знака. Синие прямые линии – проекционный куб. Шкалы – расстояние от центра диска в угловых секундах.

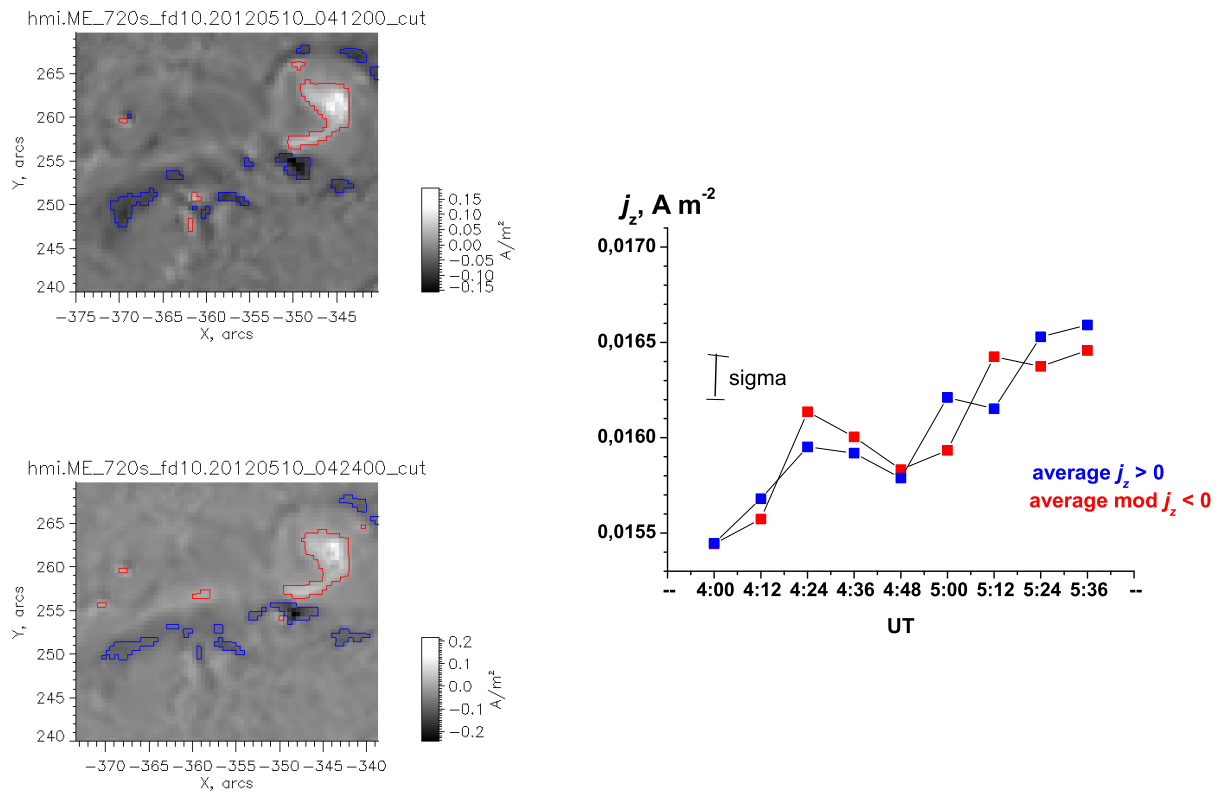


Рис. 6. Слева: фон - фрагменты карт вертикальных токов j_z , рассчитанных на время до и после максимума вспышки 04:12 UT и 04:24 UT, соответственно; синий и красный контуры - уровни $j_z + / - 0,05 A/m^2$. Шкалы - расстояние от центра диска в угл. секундах. Справа: кривые эволюции усреднённого тока $j_z < 0$ (красный цвет) и $j_z > 0$ (синий цвет) 10 мая 2012 г. Для отрицательного поля показан модуль j_z . Вертикальный отрезок - ошибка измерений.