

УДК 523.945

СВЯЗЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ С СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ

© 2013 г. А. И. Подгорный¹, И. М. Подгорный², Н. С. Мешалкина³¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва²Институт астрономии РАН, г. Москва³Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, г. Иркутск

e-mail: podgorny@inasan.ru

Поступила в редакцию 21.06.2012 г.

После доработки 12.11.2012 г.

Слабая активная область NOAA 11158 появилась на солнечном диске вблизи восточного лимба. Область NOAA 11158 быстро возростала и достигнув магнитного потока более 10^{22} Мкс произвела вспышку класса X. Во время вспышки наблюдались лишь слабые изменения поля в отдельных точках. Никаких характерных особенностей динамики фотосферного поля во время вспышки при анализе данных с разрешением 45 с обнаружено не было. Область NOAA 10720 после возрастания потока выше 3×10^{22} Мкс произвела шесть вспышек класса X. Поле во время этих вспышек оставалось спокойным. Возрастание магнитного потока выше $\sim 10^{22}$ Мкс является необходимым, но недостаточным условием для появления мощных вспышек. Простые активные области вспышек не производят. Для возникновения вспышки распределение поля в активной области должно иметь сложный вид и линии инверсии полярности должны иметь сложную форму. Только над такими активными областями могут существовать особые линии магнитного поля, в окрестностях которых возникают токовые слои, в магнитном поле которых накапливается энергия солнечных вспышек.

DOI: 10.7868/S0016794013060114

1. ВВЕДЕНИЕ

На диске Солнца в максимуме солнечной активности может одновременно наблюдаться более десятка АО (активных областей). АО появляется неожиданно. Появление нового магнитного потока связывают со всплыванием магнитной трубки из конвективной зоны. Плаваемость трубки возникает в результате пониженной в ней концентрации, устанавливающейся из-за баланса давлений. Типичное время формирования большой АО около недели, а время ее существования может достигать месяца. В отличие от изображений в видимом излучении, где отдельное солнечное пятно обычно представляет собой круг, границы магнитного поля в пятне имеет сложную форму, и линии инверсии полярности поля также имеют сложную форму, особенно у АО, дающих вспышки.

Рентгеновские измерения [Masuda et al., 1994; Lin et al. 2003] показали, что солнечная вспышка происходит в короне над АО. Компактный источник рентгеновского излучения ($n \sim 10^{11}$ см⁻³ и $T \sim 3$ кэВ) отчетливо регистрируется в короне для вспышки класса X, возникшей на лимбе. Единственным резервуаром энергии в короне, где $\beta = 8\pi nkT/B^2 \sim 10^{-6}$, может быть магнитное поле токов, текущих в короне. Токовая система, ответственная за вспышку, должна обладать способностью аккумулировать магнитную энергию

в предвспышечном состоянии и при переходе в неустойчивое состояние выделять ее взрывным образом. Такой способностью обладает токовый слой. Численное решение полной системы трехмерных магнитогидродинамических уравнений показало, что перед вспышкой над АО образуется токовый слой, в магнитном поле которого запасается энергия достаточная для вспышки [Bilenko et al., 2002; Подгорный и Подгорный, 2008]. Граничные и начальные условия в расчете задаются из фотосферных измерений перед реальной вспышкой, и никаких предположений о механизме вспышки не делается. Численное МГД моделирование показало, что токовый слой образуется в окрестности особой линии магнитного поля (в простейшем случае линия нулевого поля) за счет возмущений, поступающих от фотосферы. Таким образом, в предвспышечном состоянии над областью должна существовать особая линия магнитного поля. Энергия возмущений аккумулируется в магнитном поле токового слоя, образующегося в окрестности особой линии. Токовый слой является довольно распространенным явлением в космической плазме. Он разделяет линии магнитного поля в межпланетной среде. Одна из возможностей образования токового слоя реализуется в магнитосфере Земли. Токовый слой в хвосте магнитосферы Земли образуется при взаимодействии солнечного ветра с полем диполя, а быстрый распад геомаг-

нитного хвоста приводит к магнитной суббуре. Ряд авторов рассматривает возможность объяснения вспышек появлением в короне магнитного жгута – тока, направленного вдоль линий поля над АО [Lin, 2004; Зайцев и Степанов, 2008; Соловьев, 2012]. Диссипация токов жгута, расположенных высоко в короне, также не должна вызвать существенных возмущений магнитного поля фотосферы. Однако в работах по численному моделированию магнитного поля над АО, опубликованных к настоящему времени, где задаются реальные условия на фотосфере, существование магнитного жгута в короне обнаружено не было.

Если происхождение вспышки связано с появлением токового слоя, то большая вспышка может произойти только над АО с достаточно сильным магнитным полем, а конфигурация поля в АО должна быть достаточно сложной, чтобы в короне над такой АО существовали особые линии. В области, состоящей из двух солнечных пятен (ведущего и ведомого), разделенных линией инверсии полярности не сложной формы, линии поля в короне должны иметь форму простых арок без особых линий. Над такой АО не может появиться особая линия. В обзоре современных методов прогноза вспышечной активности [Robbrecht, 2011] специально подчеркивается, что над областями с одной простой линией инверсии полярности вспышки не происходят.

В работах [Ishkov, 2001; Podgorny and Podgorny, 2010; Подгорный и Подгорный, 2011] исследовался ряд АО, давших больше вспышки. Было показано, что наблюдаемые вспышки класса X возникали только над АО, когда магнитный поток АО становился достаточно большим. Анализ магнитных потоков [Podgorny and Podgorny, 2010; Подгорный и Подгорный, 2011] в магнитных областях NOAA 10486 и 10365, давших серию больших вспышек (класса X), показал, что такие вспышки возникают при магнитных потоках больших 10^{22} Мкс. Предварительный анализ динамики АО NOAA 10720 [Podgorny and Podgorny, 2013] также подтвердил эти результаты и показал постоянство распределения магнитного поля АО во время вспышки.

Целью настоящей работы является **детальное** исследование магнитных полей АО NOAA 11158 и NOAA 10720, давших вспышки класса X, а также исследования поведения магнитного поля АО во время вспышки. Такая информация необходима для проверки того, насколько обнаруженные ранее закономерности являются общими, и для выяснения механизма вспышки: происходит ли при вспышке диссипация магнитной энергии, запасенной в короне или на поверхности Солнца.

Если вспышка возникает из-за диссипации магнитного поля в короне над АО, то в момент вспышечного выделения энергии магнитное поле АО не обязано меняться. Неудачные попытки об-

наружить поток энергии $\sim 10^{29}$ эрг/с из АО во время вспышки были предприняты Falconer et al. (2006) и Lera and Barnes (2007). В обзоре [Petrie and Sudol, 2010] исследовалось 77 вспышек. Во время некоторых из них наблюдались локальные изменения поля ~ 100 Г длительностью ~ 15 с. В работе [Wang et al., 2009] исследовались флуктуации магнитного поля во время вспышки X7.1. Наблюдались небольшие (100 Г) флуктуации поля в отдельных точках АО с характерным временем, соизмеримым с длительностью вспышки, при этом максимальная величина поля составляла около 3000 Г. В статье [Jiang et al., 2012] обращается внимание на перемещения некоторых элементов полутени пятна с отрицательной полярностью в области NOAA 11158, которые трактуются, как вращение пятна со скоростью 90 град/сут. Такое перемещение началось за сутки перед вспышкой X2.2 и продолжалось после вспышки, не обнаруживая каких-либо особенностей во время вспышки. В работе [Kusano et al., 2012] рассмотрен механизм вспышки, основанный на быстром магнитном пересоединении в короне, вызванном “ориентацией малых магнитных элементов”, т.е. незначительным изменением магнитного потока активной области. В настоящей работе исследуется динамика распределения магнитного поля во время вспышек. Проводится сравнение распределений поля во время вспышки, полученных с временным интервалом 45 с.

Использовались измерения компоненты магнитного поля вдоль луча зрения прибором MDI на космическом аппарате SOHO и прибором HMI на аппарате SDO. Величина измеренного таким образом магнитного поля зависит не только от его истинного значения, но и от угла между лучом зрения и поверхностью Солнца. Для исключения этого эффекта в работе использовалась нормальная к поверхности Солнца компонента магнитного поля. Нормальная компонента магнитного поля определялась решением уравнения Лапласа с граничными условиями в виде наклонной производной потенциала. Таким образом, исключалась зависимость измененной компоненты магнитного поля вдоль луча зрения от положения АО на диске Солнца.

2. МАГНИТОГРАММЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ВО ВРЕМЯ И ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ

АО NOAA 11158 начала формироваться вблизи восточного лимба 11.02.2011 (рис. 1), и в течение четырех дней стала крупной областью со сложной линией инверсии полярности. Такого типа АО обладают высокой вероятностью произвести мощные вспышки. Область NOAA 11158 произвела вспышки классов C8, а затем X2.2 (рис. 2). Из приведенных данных следует, что АО NOAA 11158

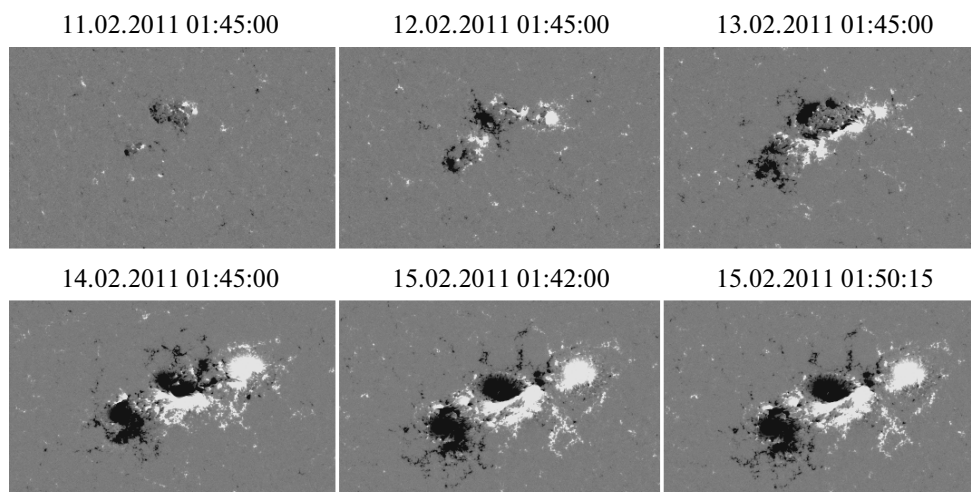


Рис. 1. Магнитограммы АО NOAA 11158, показывающие развитие области перед вспышкой X2.2 15.02.2011.

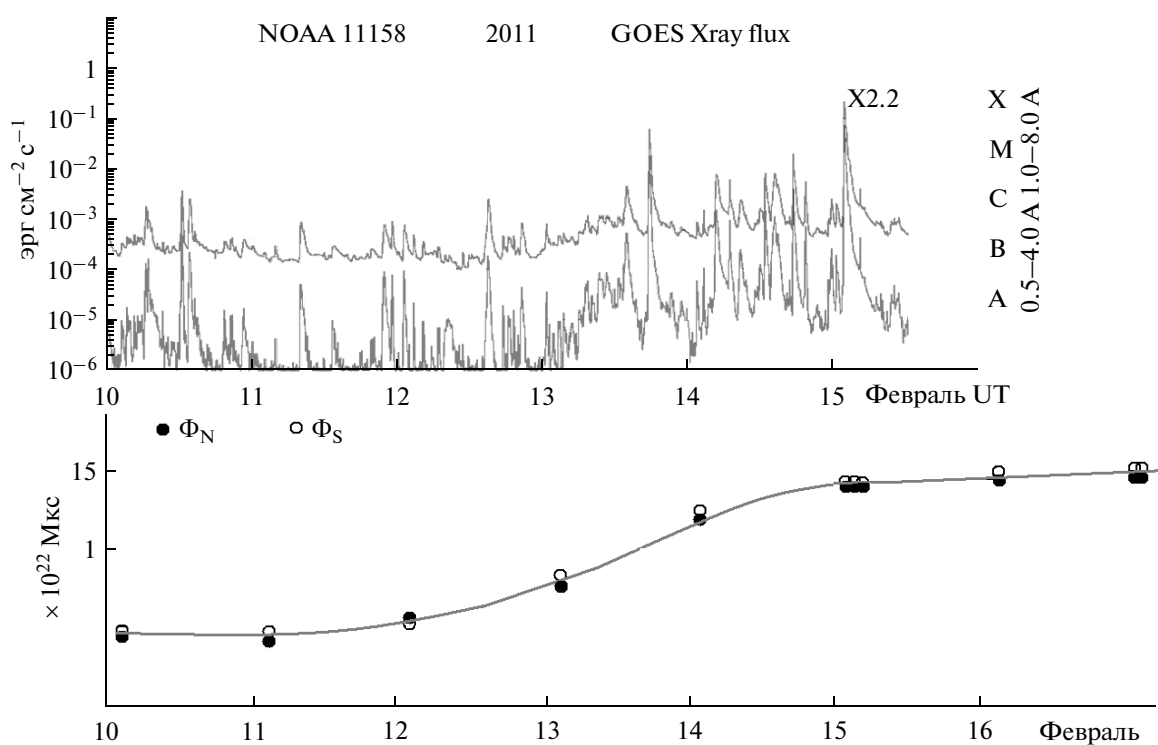


Рис. 2. Измерения на аппарате GOES, демонстрирующие нарастание вспышечной активности области NOAA 11156 и динамика северного и южного потоков. Во время вспышки X2.2 измерения обработаны с интервалом 45 с.

наращивала магнитный поток обеих полярностей в течение четырех дней перед вспышкой, причем распределение поля носило сложный характер с двумя главными линиями инверсии полярности и внедрением поля одной полярности в поле другой.

На рисунке 1 отчетливо видна резкая граница между магнитными потоками противоположной полярности, свидетельствующая о большом градиенте поля поперек линии. Имеет место типичная предвспышечная $\beta\delta$ -конфигурация. Еще одной

важной особенностью предвспышечной эволюции этой области является отсутствие перемещения источников магнитного поля, которые могли бы привести к аккумуляции энергии за счет развития спиралиности.

Возрастание активности перед вспышкой по данным рентгеновского излучения, регистрируемого на космическом аппарате GOES показано на рисунке 2. Ниже приведена зависимость северного и южного магнитных потоков от времени, по-

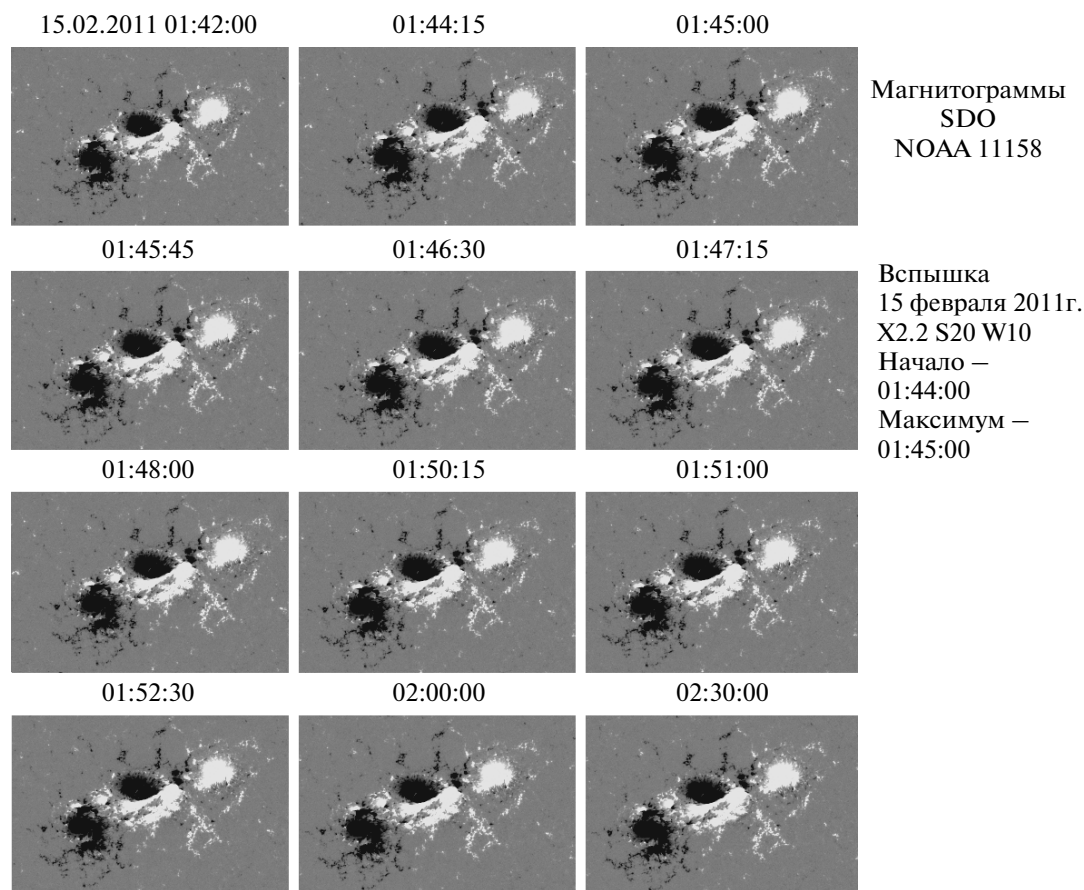


Рис. 3. Магнитограммы АО NOAA 11158 во время вспышки X2.2.

лученная обработкой данных прибора HMI на космическом аппарате SDO. Прибор HMI ведет систематические измерения составляющей магнитного поля вдоль луча зрения. Поэтому его показания сильно зависят от положения АО на диске Солнца. Для исключения влияния этой зависимости компоненты магнитного поля, измеряемой вдоль луча зрения, т.е. зависимости измеряемого поля от положения АО на диске, использовалась нормальная компонента магнитного поля. Нормальная компонента, как и в работах [Podgorny and Podgorny, 2010; Подгорный и Подгорный, 2011], находилась для потенциального поля, что справедливо, если магнитная энергия перед вспышкой запасается в токовом слое высоко в короне, как показано в работе [Подгорный и Подгорный, 2008]. Для определения потенциального поля над АО численно решалось уравнение Лапласа с наклонной производной в качестве граничного условия на фотосфере. Наклонная производная от потенциала задавалась равной компоненте вдоль луча зрения, распределение которой на фотосфере измеряется на приборе HMI. Вспышка X2.2 возникла после увеличения магнитного потока выше 10^{22} Мкс. Из приведенной зависимости видно возрастание вспышечной активности с ростом магнитного потока АО.

Вспышка типа X произошла в NOAA при северном и южном потоках, превышающих 10^{22} Мкс.

Постоянство магнитных потоков во время вспышки X2.2 следует из рис. 2 и магнитограмм, приведенных на рис. 3, снятых во время вспышки X2.2 15.02.2011. Эти данные демонстрируют высокую стабильность фотосферного магнитного поля непосредственно перед вспышкой, в течение всей вспышки и после нее. В течение часа не наблюдается никаких сколько-нибудь значительных изменений измеряемой составляющей магнитного поля, которые можно было связать с энерговыделением вспышки. Полностью отсутствует перемещение основных элементов магнитограммы. Эти наблюдения полностью согласуются с результатами численного трехмерного МГД моделирования, демонстрирующими накопление энергии для вспышки в токовом слое высоко в короне [Bilenko et al., 2002; Подгорный и Подгорный, 2008] и результатами рентгеновских измерений на космическом аппарате RHESSI [Lin et al., 2003], во время вспышки, произошедшей на лимбе. Данные аппарата RHESSI указывают, что первичное энерговыделение вспышки происходит высоко в короне, т.

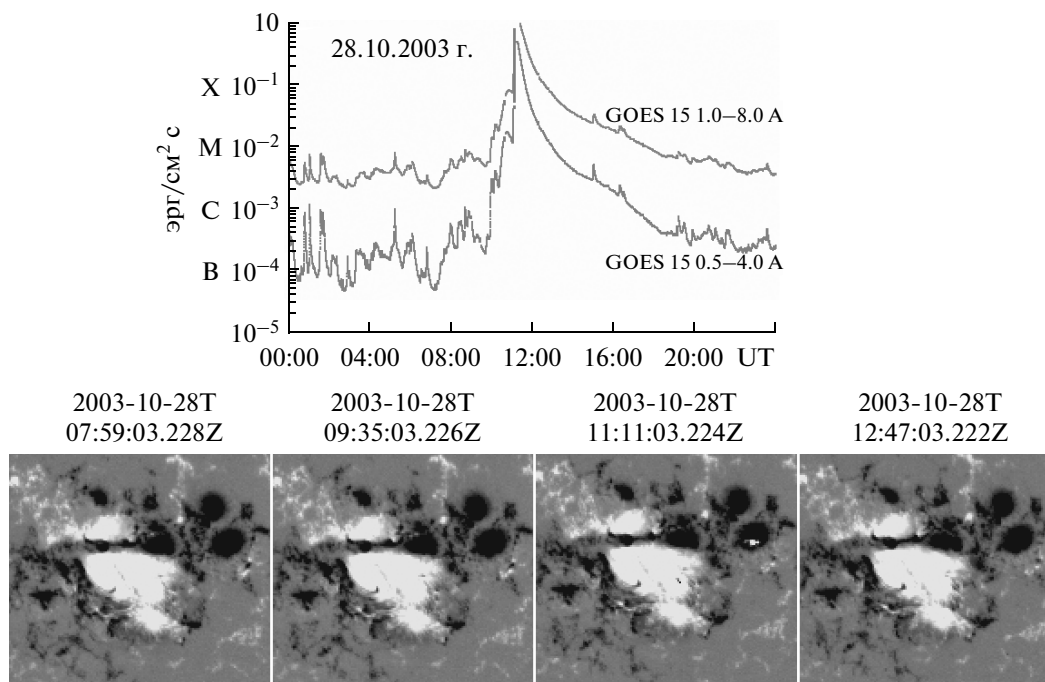


Рис. 4. Поток рентгеновского излучения во время вспышки 28.10.2003 г. и магнитограммы, снятые на аппарате SOHO, демонстрируют высокую стабильность поля АО NOAA 10486 во время вспышки X17.

е. нет никаких оснований считать его взрывным хромосферным явлением.

Аналогичное поведение демонстрируют магнитограммы, снятые во время большой вспышки X17 (рис. 4), произошедшей над АО NOAA 10486 28.10.2003 г. Здесь также наблюдается практически неизменная магнитограмма в течение всего времени развития и затухания вспышки. Отдельные локальные импульсы поля, не превышающие 1–2%, наблюдаются в течение всего времени существования АО независимо от вспышки. Такие локальные микро изменения регистрировались в работе [Wang et al., 2009] во вспышке X7.1 20 января 2005 г.

3. МАГНИТНЫЙ ПОТОК АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 10720 ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ X-ТИПА

Исследования, выполненные для вспышечно активных областей NOAA 10365 и 10486 [Podgorny and Podgorny, 2010; Подгорный и Подгорный, 2011] показали, что мощные вспышки (X-типа) начинают возникать после возрастания магнитного потока АО более 10^{22} Мкс. АО NOAA 11156 дала вспышку класса X при потоке большем 10^{22} Мкс. В настоящей работе детально изучается АО NOAA 10720, давшая серию вспышек типа X. Использовались измерения компоненты магнитного поля, направленной вдоль луча зрения, на аппарате SOHO, которая зависит от положения АО на диске Солн-

ца. Как отмечалось выше, для исключения этой зависимости и определения нормальной к солнечной поверхности компоненты магнитного поля здесь, как и в работах [Podgorny and Podgorny, 2010; 2013; Подгорный и Подгорный, 2011], решалось уравнение Лапласа с заданием на фотосферной границе наклонной производной магнитного потенциала.

На рисунке 5 показана зависимость северного и южного магнитных потоков области NOAA10720 и динамика солнечной активности во время прохождения этой области по диску Солнца. Как и для областей 10365, 10486 и 11158 (Подгорный и Подгорный, 2011) наблюдается отчетливое возрастание вспышечной активности с ростом магнитного потока. Сначала появляются вспышки класса C, затем класса M. Вспышки класса X в NOAA 10720 возникали только при потоках больших 10^{22} Мкс. Изменение магнитных потоков во время вспышек не наблюдается. Обращает на себя внимание, что мощные вспышки появляются при больших величинах магнитных потоков, но их появление не связано с фазой роста потока.

В двух из трех проанализированных здесь случаях динамики АО обнаруживается значительный дисбаланс северного и южного потоков после наступления максимальных их значений. Насколько этот эффект закономерен сейчас судить преждевременно.

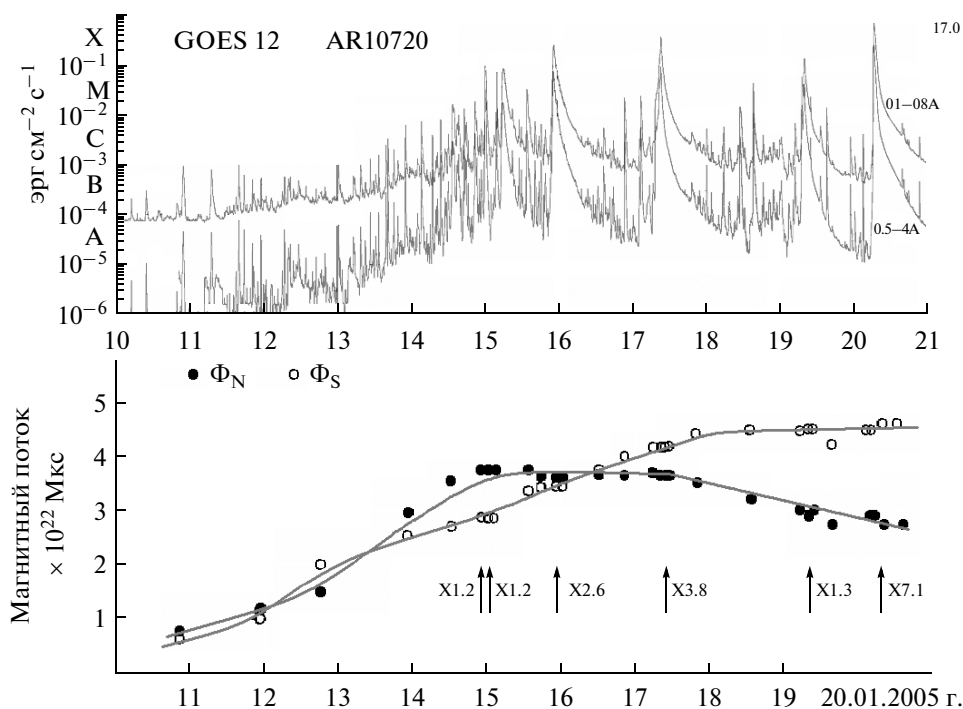


Рис. 5. Рентгеновские импульсы и зависимость от времени магнитного потока АО NOAA 10720, давшей серию мощных вспышек.

4. МАГНИТНЫЙ ПОТОК И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ

Магнитограммы приборов MDI и HMI размещенных на аппаратах SOHO и SDO, приведенные на рисунках 3 и 4, показывают высокую стабильность магнитного поля АО во время больших вспышек. Однако нелинейная связь энергии с почернением на фотографическом изображении позволяют сделать только качественный вывод. Отсутствие сколько-нибудь значительных изменений фотосферного магнитного поля во время вспышки находится в согласии с данными работ [Podgorny and Podgorny, 2010; Подгорный и Подгорный, 2011], в которых стабильность магнитного поля во время больших вспышек была показана при анализе распределений нормальной составляющей поля. Только самая большая вспышка X17 показала появление узкого локального импульса магнитного поля на фотосфере [Подгорный и Подгорный, 2011]. Однако появление этого импульса не дало сколько-нибудь заметного вклада в магнитный поток области. Такие локальные импульсы поля наблюдаются и в отсутствие вспышек. В настоящей работе мы использовали данные аппарата SDO для вспышки X2.2 в NOAA 11158 со скважностью 45 с.

Вспышка X2.2 возникла 15 февраля 2011 г. в 01:44:00 UT в АО NOAA 11158 и достигла максимального значения в 01:45:00. Координаты вспыш-

ки S21 W21. Распределение нормальной составляющей магнитного поля для трех моментов времени (рис. 6) показывает, что конфигурация фотосферного поля при вспышке практически остается неизменной. Причем высокое постоянство распределения поля отчетливо видно не только для вычисленной нормальной составляющей, но и для составляющей, измеренной вдоль луча зрения. Угол зрения за время вспышки (~10 мин) практически не меняется. Никаких заметных изменений распределения поля, которые могли бы характеризовать фотосферное поле во время вспышки, не обнаружено. Однако не исключено небольшое перераспределение поля ~1%, которое обнаруживается при наблюдении за изменением поля в отдельных точках. В таблице приведены значения северного и южного магнитных потоков вблизи вспышки (01:28:30–02:30:00), включая интервал сильного энерговыделения вспышки (01:44:15–01:56:15). Магнитные потоки во время вспышки сохраняются с точностью до 1%. Из таблицы следует, что неизменным во время вспышки остается не только магнитный поток, определенный по нормальной составляющей на фотосфере, но и поток, вычисленный по измеренной составляющей, направленной вдоль луча зрения, т.е. остается неизменной, как нормальная так и тангенциальная составляющая поля. Это значит, что во время вспышки не происходит изменение магнитной скрученности. Отсутствие корреляции между регистрацией магнитной скрученности в АО и возникновением вспышек следу-

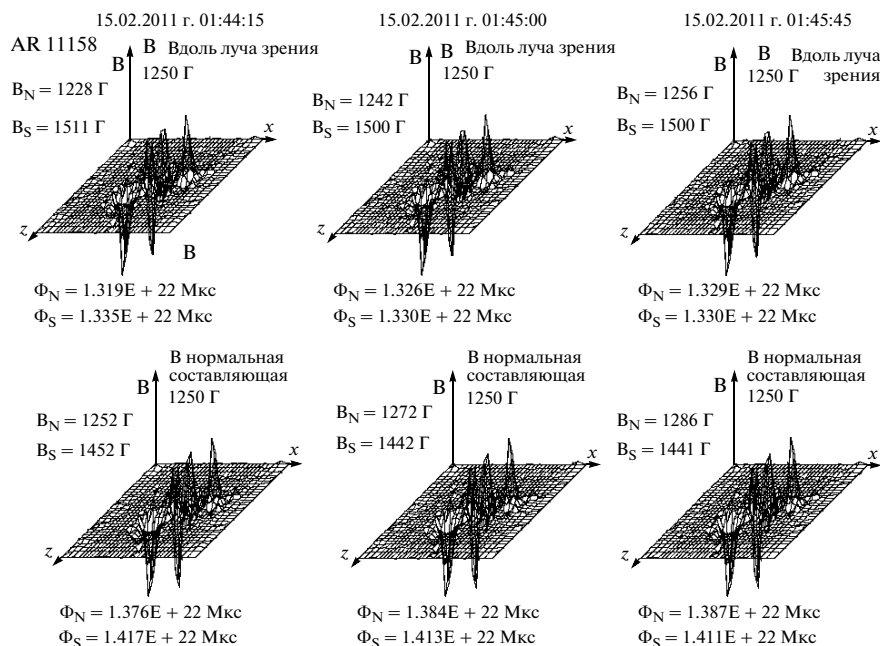


Рис. 6. Распределения магнитного поля АО NOAA 11158 во время вспышки X2.2 (компонента вдоль луча зрения и нормальная к поверхности Солнца). Показаны максимальные значения магнитного поля и магнитные потоки.

ет и из работы [Kusano et al., 2003]. Аналогичное поведение поля наблюдается для всех вспышек в ранее исследованных областях NOAA 10720, 10486 и 10465 (Подгорный и Подгорный, 2011).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ магнитных потоков в мощных АО показывает, что условие появления над ними больших (класса X) вспышек при магнитных потоках, превышающих 10^{22} Мкс, является необходимым, но не достаточным. Примером области с магнитным потоком, превосходящим 10^{22} Мкс, но не давшей мощных вспышек является область NOAA 11190–11192. На рисунке 7 показано распределение нормальной составляющей магнитного поля АО NOAA 11190–11192 и NOAA 10365. Приведены также результаты измерения рентгеновского излучения на аппарате GOES. Величины северного и южного магнитных потоков в обеих АО практически одинаковы $\sim 1.6 \cdot 10^{22}$ Мкс. Однако область АО NOAA 10365, имеющая сложное распределение магнитного поля, дала серию вспышек класса X, а максимальный рентгеновский импульс вспышечной активности АО NOAA 11190–11192 с дипольного типа конфигурацией не превышал класса C3.

В области АО 10365 локальные источники северной и южной полярностей распределены хаотически и их расположение не может быть причислено к простой дипольной группе. По классификации SIDC Royal Observatory of Belgium такие АО называются гамма областями. В γ -активных

областях максимумы положительной и отрицательной полярности расположены настолько нерегулярно, что область не может рассматриваться, как дипольная область (β -область) с ведущим и ведомым пятнами, разделенными одной простой линией инверсии. В γ -АО линия инверсии имеет сложную форму.

При распределении фотосферных источников типа γ в короне создаются условия для образования особых линий магнитного поля, а, следовательно, и возможность появления вспышки. Точное предсказание появления вспышки требует моделирования ситуации над АО в реальном времени. Демонстрация в таком численном эксперименте появления токового слоя с большим магнитным полем должна явиться однозначным указанием на появление вспышки в ближайшие сутки.

АО NOAA 11190–11192 имеет распределение поля другого типа. Здесь существует отчетливая граница раздела между источниками различной полярности. Отчетливо прослеживаются две отдельных части области, каждая из которых содержит локальные источники магнитного поля одного направления. Части области с различным направлением поля разграничивает единственная линия инверсии поля (линия нулевой нормальной составляющей). Согласно классификации SIDC Royal Observatory of Belgium такие АО называются бета областями. Распределение источников поля биполярного типа на фотосфере должно соответствовать полю магнитных арок в короне, без особых линий и точек нулевого поля.

Для образования особых линий необходимо существование сложного магнитного распределения с чередующимися источниками поля различной полярности. Такими АО являются γ -области. В β -областях источники различной полярности отчетливо разделены одной линией инверсии полярности. β -области с простой линией инверсии вспышек не производят. Еще одной особенностью областей, вызвавших сильные вспышки, является компактное расположение солнечных пятен, обеспечивающее сильный градиент магнитного поля поперек линии инверсии полярности. На сильный градиент магнитного поля поперек линии инверсии, как один из признаков появления вспышки еще в 1982 г обратил внимание В.Е. Степанов [1982]. В работе [Schrijver, 2007] делается вывод, что вспышки класса М и Х не возникают, если магнитный поток в области сильного градиента вблизи линии инверсии не превышает 10^{19} Мкс.

Ряд АО β -типа, обладающих большими магнитными потоками, с зонами северного и южного полей, отчетливо разделенными линией инверсии поля, наблюдался в апреле–мае 2011 г. (АО 11183, АО 11226 и др.). Эти области не дали вспышек класса Х. Источники северной и южной полярностей магнитного поля в этих областях не носят компактного характера. Они сгруппированы в двух отдельных частях области. Распределение поля в короне над такой областью должно иметь дипольный характер.

Существование источников северного и южного полей во всей области со сложными линиями инверсии (γ -области) должно привести к формированию особых линий поля в короне, в окрестности которых могут образовываться токовые слои. В АО, обладавшими магнитными потоками, превышающими 10^{22} Мкс и давшими серии мощных вспышек (например, NOAA 10365, NOAA 10486 и др.) максимумы поля как северной, так и южной компонент располагаются во всей АО. Вычисленное решением уравнения Лапласа потенциальное поле в короне над такими областями содержит особые линии. На фотосфере поле это обладает несколькими линиями инверсии полярности [Подгорный и Подгорный, 2011].

Напрашивается вывод: чем сложнее распределение поля АО, тем больше вероятность существования над ней особых линий и тем более вероятно образование токовых слоев, которые при распаде производят вспышку. Этот вывод находится в согласии с данным обзорного доклада E. Robbrecht [2011]. В этом обзоре показано, что вспышки большие Х4 возникали только в АО класса $\beta\gamma\delta$ (δ -область содержит вкрапления пятен одной полярности в магнитное поле другой полярности). Вероятность произойти Х-вспышке в $\beta\gamma\delta$ -области составляет ~40%. В АО, имеющих одну простую линию инверсии полярности, т.е.

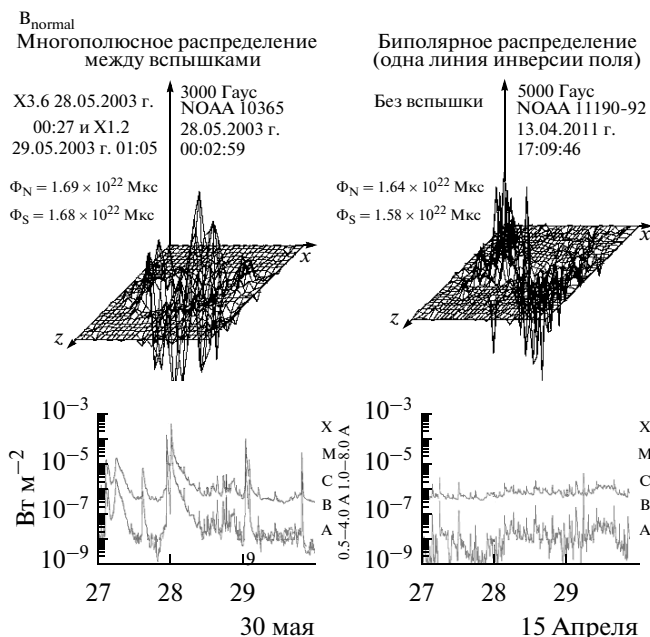


Рис. 7. Распределение магнитного поля в АО γ -типа с сильной и β -типа со слабой вспышечной активностью, имеющих большие магнитные потоки. Внизу рентгеновское излучение.

Северный и южный магнитные потоки во время вспышки X2.2 15.02.2011 г., определенные по вычисленной нормальной составляющей магнитного поля и по измеренной вдоль луча зрения. Вспышка произошла в АО NOAA 11158

| Время | Северный поток (10^{22} Мкс) | | Южный поток (10^{22} Мкс) | |
|----------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| | Нормальная компонента | Вдоль луча зрения | Нормальная компонента | Вдоль луча зрения |
| 01:28:30 | 1.381 | 1.323 | 1.419 | 1.338 |
| 01:33:00 | 1.369 | 1.309 | 1.420 | 1.337 |
| 01:37:30 | 1.377 | 1.321 | 1.415 | 1.335 |
| 01:42:00 | 1.378 | 1.320 | 1.412 | 1.331 |
| 01:42:45 | 1.375 | 1.315 | 1.415 | 1.331 |
| 01:43:00 | 1.395 | 1.338 | 1.400 | 1.332 |
| 01:44:15 | 1.376 | 1.319 | 1.417 | 1.335 |
| 01:45:00 | 1.384 | 1.326 | 1.413 | 1.331 |
| 01:45:45 | 1.387 | 1.329 | 1.411 | 1.330 |
| 01:46:30 | 1.386 | 1.327 | 1.412 | 1.330 |
| 01:47:15 | 1.391 | 1.332 | 1.409 | 1.326 |
| 01:48:00 | 1.387 | 1.318 | 1.412 | 1.320 |
| 01:50:15 | 1.378 | 1.318 | 1.403 | 1.320 |
| 01:51:00 | 1.378 | 1.320 | 1.400 | 1.324 |
| 01:51:45 | 1.379 | 1.321 | 1.400 | 1.318 |
| 01:52:30 | 1.380 | 1.321 | 1.405 | 1.323 |
| 01:54:00 | 1.372 | 1.312 | 1.400 | 1.316 |
| 01:56:15 | 1.376 | 1.313 | 1.403 | 1.319 |
| 02:00:00 | 1.387 | 1.323 | 1.414 | 1.328 |
| 02:15:00 | 1.405 | 1.342 | 1.402 | 1.316 |
| 02:30:00 | 1.409 | 1.346 | 1.406 | 1.319 |

создающих простое арочное (дипольное) поле мощные вспышки не наблюдаются.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимое условие возникновения большой вспышки (класса X) – возрастание магнитного потока АО выше $\Phi = 10^{22}$ Мкс. Это условие является необходимым, но не достаточным.

2. Большая вспышка (класса X) возникает над АО со сложным распределением магнитного поля и линией инверсии полярности сложной формы.

3. Простые биполярные АО, состоящие из разделенных ведущего и ведомого пятен, вспышек не производят.

4. Распределение нормальной составляющей в АО сохраняется во время исследованных больших вспышек с точностью $\sim 1\%$. В некоторых вспышках наблюдаются локальные мелкомасштабные флуктуации магнитного поля (~ 100 Г) при максимальном поле 2000–3000 Г, но они практически не влияют на величину магнитного потока. Такие же флуктуации наблюдаются и в отсутствие вспышек.

Отсутствие изменений распределения магнитного поля и магнитного потока АО во время вспышки является независимым доказательством выделения энергии, запасенным в магнитном поле коронального токового слоя перед вспышкой.

5. Постоянство нормальной и тангенциальной компонент фотосферного магнитного поля при вспышке означает отсутствие изменений магнитной скрученности – вспышка не оказывает влияния на динамику токов и магнитного поля в активной области.

Работа поддержана Программой Президиума РАН № 22, грантом РФФИ № 13-02-00064 и контрактами Министерства образования и науки РФ. 16.518.11.7065 и 02.740.11.0576.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Зайцев В.В., Степанов В.Е.* Корональные магнитные арки // УФН. Т. 178. № 11. С. 1165–1204. 2008.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Образование нескольких токовых слоев над активной областью АО 10365 перед серией вспышек // Астрон. журн. Т. 85. № 8. С. 739–749. 2008.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитный поток активной области и его связь со вспышками // Астрон. журн. Т. 88. № 7. С. 684–691. 2011.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки. 1. Токовый слой в короне // Геомагнетизм и Аэронамия. Т. 52. № 2. С. 163–175. 2012.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки. 2. Модель вспышки и моделирование с использованием магнитных карт активных областей // Геомагнетизм и Аэронамия. Т. 52. № 2. С. 176–189. 2012.
- *Соловьев А.А.* Диссипативный коллапс магнитных жгутов с бессильным внутренним полем // Астрон. журн. Т. 88. № 11. С. 1111–1123. 2011.
- *Степанов В.Е.* Солнечные вспышки. М.: Наука, С. 246. 1982.
- *Bilenko I.A., Podgorny A.I., Podgorny I.M.* The possibility of energy accumulation in a current sheet above the NOAA 9077 active region prior to the flare on 14 July 2000 // Solar Phys. V. 207. № 2. P. 323–336. 2002.
- *Falconer D.A., Moor R.L., Gary G.A.* Magnetic causes of solar coronal mass ejections: dominance of the free magnetic energy over the magnetic twist alone // Astrophys. J. V. 644. P. № 2. P. 1258–1272. 2006.
- *Ishkov V.N.* Evolution and forecast of flare activity in the current solar cycle 23 // Astron. Astrophys. Trans. V. 20. № 3. P. 563–569. 2001.
- *Jiang Y., Zheng R., Yang J., Hong J., Yi B., Yang D.* Rapid sunspot rotation associated with the X2.2 flare on 2011 February 15 // Astrophys. J. V. 744. № 1. P. 500–505. 2012.
- *Leka K.D., Barnes G.* Photospheric magnetic field properties of flaring versus flare-quiet active regions // Astrophys. J. V. 656. № 2. P. 1173–1186. 2007.
- *Lin J.* CME-flare association deduced from catastrophic model of CMEs // Solar Phys. V. 219. № 1. P. 169–196. 2004.
- *Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J. et al.* Vilmer N. RHESSI observations of particles acceleration and energy release in an intense gamma-ray line flare // Astrophys. J. V. 595. № 2. P. L69. 2003.
- *Masuda S., Kosugi T., Hara H., Tsuneta S., Ogawara Y.* A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // Nature. V. 371. № 6497. P. 495–497. 1994.
- *Kusano K., Maeshiro T., Yamamoto T., Sakurai T.* Measurement of magnetic helicity flux into the solar corona // Adv. Space Res. V. 32. № 10. P. 1917–1922. 2003.
- *Kusano K., Bambal Y., Yamamoto T., Iida Y., Toriumi S., Asai A.* Magnetic field structures triggering solar flares and coronal mass ejections // Astrophys. J. V. 760:31 (9pp). 2012.
- *Petrie G.J.D., Sudol J.J.* Abrupt longitudinal magnetic field changes in flaring active regions // Astrophys. J. V. 724. № 2. P. 1218–1237. 2010.
- *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* The active region magnetic flux correlation with flares appearance // Phys. Auroral Phen. Proc. 33 Annual Seminar. Apatity, 02–05 March 2010. P. 87–80. 2010.
- *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Magnetic field distribution in the flareproductive active region NOAA 10720. J. Atmosphere. Solar-Terrest. Phys. V. 92. P. 59–64. 2013.
- *Robbrecht E.* Current standing of space weather forecasting // Rhodes-ESPM-13. Report. RODOS. 2011.
- *Schrijver C.J.* A characteristic magnetic field pattern associated with all major solar flares and its use in flare forecasting // Astrophys. J. V. 655. № 1. P. L117–L120. 2007.
- *Wang J., Zhao M., Zhou G.* Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20 // Astrophys. J. V. 690. № 1. P. 862–874. 2009.