

ДИНАМИКА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА,  
ПРОИЗВОДЯЩИХ МОЩНЫЕ ВСПЫШКИThe Dynamics of Active Regions of the Sun  
That Produce Powerful Flares

**Abstract.** It is shown that solar activity increasing of a complex active region is associated with the development of the active-region magnetic flux. The results were obtained by processing SOHO and SDO magnetic field line-of-sight component measurements. The normal magnetic field component is calculated in the potential approximation. X class solar flares appear when the magnetic flux reaches  $\sim 3 \times 10^{22}$  Mx. This is a necessary but not a sufficient condition. Big flares are observed only above very complicated active regions with singular lines, where current sheets can appear. A simple bipolar region does not produce a flare. The active region magnetic field does not demonstrate a considerable change during a flare. The presented results support the flare model based on the concept of flare energy accumulation in the magnetic field of a coronal current sheet.

## 1 Введение

Рентгеновские фотографии, полученные на аппарате RHESSI (Lin R.P., et al. ApJ, 2003, **595**, L69) показали, что энергия вспышки выделяется в короне над активной областью (АО), а жёсткое рентгеновское излучение возникает на поверхности Солнца при бомбардировке пучками электронов, ускоренных в короне. Трёхмерные численные МГД-эксперименты, выполненные при использовании начальных и граничных условий в АО, взятых из измерений магнитного поля в предвспышечном состоянии реальных вспышек, показали образование в короне токового слоя (ТС). Установлено, что при существовании над АО особой линии магнитного поля фотосферные возмущения могут вызывать образование ТС в окрестности этой линии. В магнитном поле слоя происходит аккумуляция энергии для вспышки (Подгорный А.И. и Подгорный И.М. Геомагн. Аэрон., 2012, **52**, 163; 2012, **52**, 176).

ТС является единственным обнаруженным в космической плазме объектом, способным аккумулировать и быстро выделять энергию. Связь ТС с магнитосферными бурями обнаружена только благодаря измерениям на космических аппаратах, траектории которых пересекали геомагнитный хвост. Трудно надеяться на получение подобной информации для солнечных вспышек в ближайшее время. До появления систематических публикаций карт фотосферного магнитного поля условия на фотосферной границе задавались с использованием изображений солнечных пятен и распределение поля аппроксимировалось полями магнитных зарядов или диполей, что даёт слишком грубое приближение. В современном численном эксперименте граничные и начальные условия

в расчёте задаются из карт фотосферных измерений перед реальной вспышкой, и никаких предположений о механизме вспышки не делается. ТС образуется в окрестности особой линии магнитного поля за счёт возмущений, поступающих от фотосферы в предвспышечном состоянии. Энергия возмущений аккумулируется в магнитном поле ТС.

Если происхождение вспышки связано с ТС, то большая вспышка может произойти только над АО с сильным магнитным полем, а конфигурация поля в АО должна быть достаточно сложной, чтобы в короне над такой АО существовали особые линии. В АО, состоящей из двух солнечных пятен (ведущего и ведомого), когда все линии магнитного поля в короне имеют форму арок, вспышки не должны возникать.

## 2 Метод определения нормальной составляющей поля в АО

Для вычисления распределения магнитного поля и магнитных потоков в АО перед вспышками использовались данные космических аппаратов SOHO и SDO (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>). Наиболее распространённым методом анализа магнитных полей над активными областями в предвспышечном состоянии и во время вспышек до последнего времени служила аппроксимация полями зарядов или диполей. Источниками сильных магнитных полей ( $\sim 3000$  Гс) в АО являются солнечные пятна, однако их фотографии, полученные в видимой области спектра, дают слишком грубое представление о распределении поля в АО. Магнитный поток за пределами пятен может превосходить поток пятен, и форма пятна лишь приблизительно отражает распределение в нём поля. На рис. 1 показаны фотография АО 11176 и 11178 29 марта 2011 г. в видимом свете ( $H_\alpha$ ) и магнитограмма этих АО.

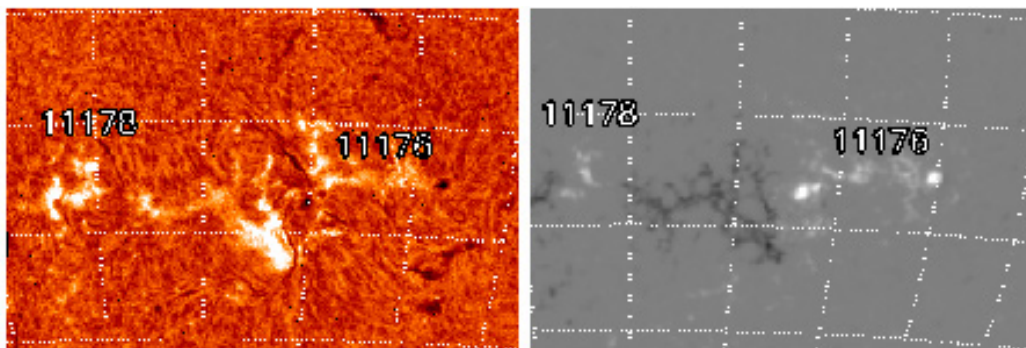


Рис. 1: Фотография АО в линии  $H_\alpha$  и магнитограмма.

В рассматриваемой здесь серии работ для анализа поля АО использовались измерения SOHO и SDO вектора магнитного поля на фотосфере, направленного вдоль луча зрения. Угол между лучом зрения и нормалью к поверхности Солнца меняется по мере передвижения АО по диску Солнца на десятки градусов, поэтому измеряемая величина поля сильно зависит от положения АО на диске.

Для исключения зависимости измеряемого поля от угла зрения использовалась нормальная составляющая поля, вычисленная из потенциального поля, которое получалось решением уравнения Лапласа с наклонной производной в качестве граничного условия (Подгорный А.И. и Подгорный И.М. Геомагн. Аэрон. 2012, **52**, 176). Для задания начальных и граничных условий на фотосфере использовались данные SOHO MDI.

Использование потенциального поля правомерно, если возникновение вспышки связано с появлением ТС в короне, когда ТС ещё не образовался или расположен достаточно высоко, чтобы его поле не оказывало существенного возмущения на фотосферные источники.

На рис. 2 показан пример распределений компоненты магнитного поля по данным SOHO и нормальной компоненты вблизи лимба, полученное из вычисления потенциального поля. Расчёт выполнен для АО 10720, для положения N12 W49. Величины магнитных потоков северной  $\Phi_N$  и южной  $\Phi_S$  компонент магнитного поля показаны на рисунке. Нормальная компонента поля в АО вблизи края диска значительно превосходит компоненту, измеренную вдоль луча зрения. В центре диска Солнца эти компоненты поля практически совпадают.

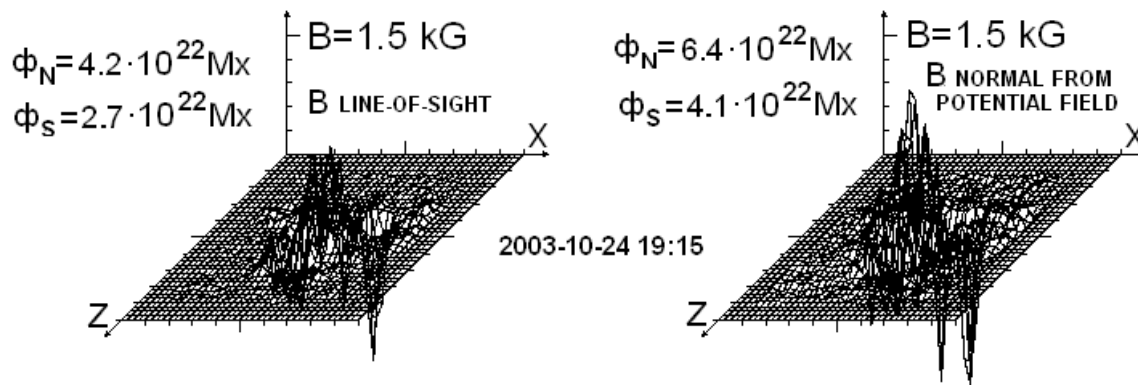


Рис. 2: Измеренное распределение магнитного поля в АО и распределение нормальной составляющей.

### 3 Магнитный поток активной области перед вспышкой

В работе (Ishkov V.N., Astron. Ap. Trans., 2001, **20**, 563) сообщалось, что появлению большой вспышки предшествует возрастание магнитного потока до некоторого критического значения. Использование распределения нормальной составляющей магнитного поля позволило авторам настоящей работы получить систематические данные о поведении магнитного потока АО перед большими (класса X) вспышками.

Анализ магнитных потоков активных областей, включая NOAA 10486, 10720, 10365 и др. (Подгорный А.И. и Подгорный И.М. АЖ, 2011, **88**, 684; Podgorny I.M. and Podgorny A.I. JASTP. 2013, **92**, 59; Phys. Auroral Phen. Proc. 35 Apatity. P. 88, 2012; Подгорный И.М. и др. Солн. Солн.-Земная Физ.-2012. Пулковое С. 309, 2012.), показал, что большие вспышки (класса X) возникают при магнитных потоках, больших  $10^{22}$  Мкс. Анализировались активные области, давшие мощные вспышки, при этом выбирались те области, которые появлялись очень слабыми около восточного края солнечного диска так, чтобы можно было проследить эволюцию АО перед вспышкой. Во всех без исключения событиях вспышки класса X возникали после возрастания магнитного потока до величины  $(2 - 4) \times 10^{22}$  Мкс.

Типичная связь изменения магнитного потока АО и появления вспышек класса X над АО отчётливо видна на рис. 3. Импульсы рентгеновского излучения класса C,

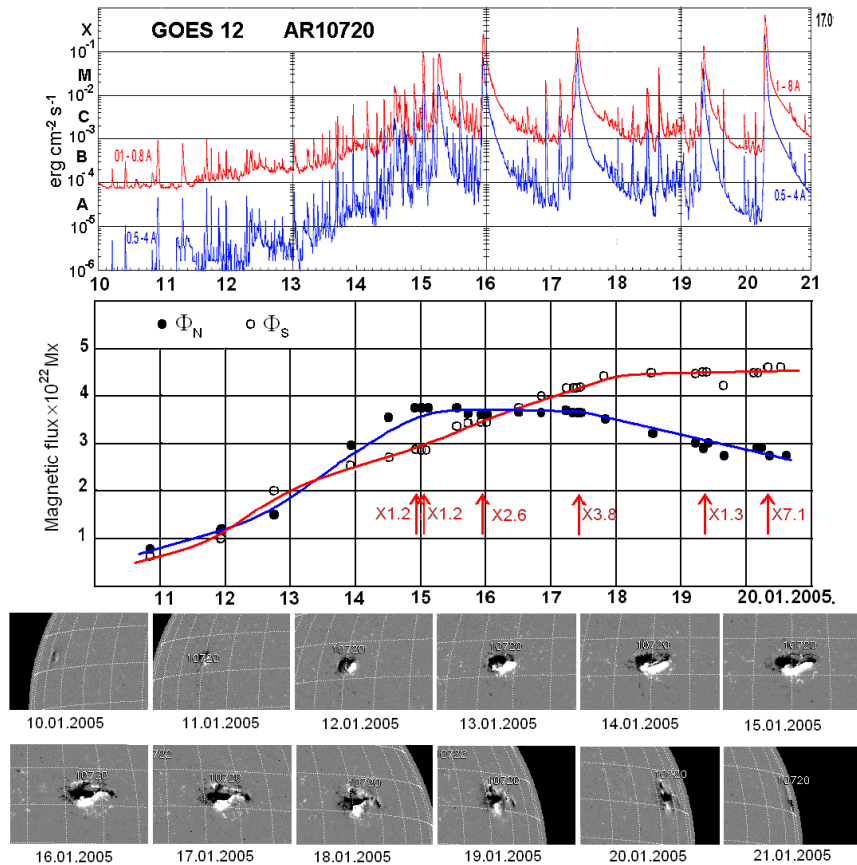


Рис. 3: Эволюция магнитного поля активной области 10720, давшей серию больших вспышек.

зарегистрированные 11 января 2005 г., были генерированы АО 10718 и 10719. В это время только что возникшая область 10720 вспышек не давала. В дальнейшем АО 10720 быстро наращивала магнитный поток и с 13.01 по 16.01 дала серию вспышек, класс которых к 16.01.2005 г. возрос до X. Северный и южный магнитные потоки возросли до  $4 \times 10^{22}$  Мкс. Далее южный поток оставался на уровне  $4.5 \times 10^{22}$  Мкс, а северный несколько упал (до  $3 \times 10^{22}$  Мкс).

#### 4 Магнитное поле активной области во время вспышки

В течение ряда лет вспышка рассматривалась как хромосферное явление, происходящее на поверхности Солнца, а выброс корональной массы объяснялся выталкиванием плазмы при быстром всплывании из-под фотосферы магнитного потока. Однако попытки обнаружить поток энергии  $\sim 10^{29}$  эрг/с из АО во время вспышки, предпринятые в ряде работ, не подтвердили такую гипотезу. В работах (Wang J. et al. ApJ, 2009, **690**, 862; Jiang Y. et al. ApJ, 2011, **744**, 50) показано, что в некоторых вспышках в отдельных точках наблюдались локальные флуктуации поля  $\sim 100$  Гс длительностью  $\sim 10$  с. Эти флуктуации продолжаются и после вспышки, не обнаруживая каких-либо особенностей, характерных для вспышки.

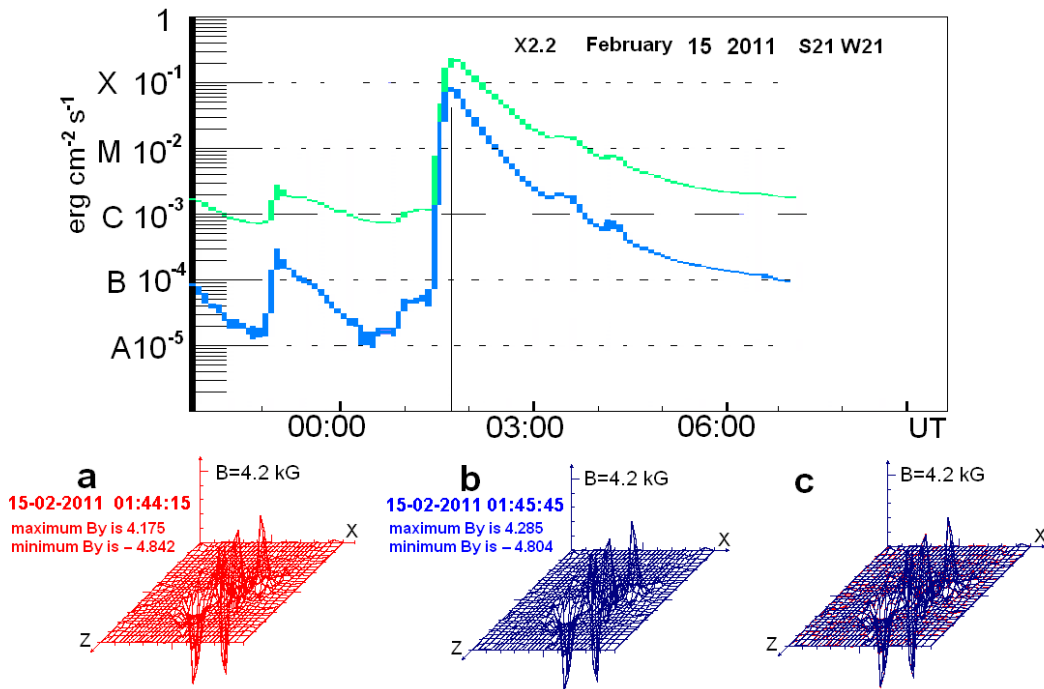


Рис. 4: Совмещение распределений (с) магнитного поля для двух моментов времени (а и b) показывает высокое постоянство магнитного поля во время вспышки.

Анализ магнитных полей АО во время вспышек класса X, зарегистрированных на аппаратах SOHO и SDO, показал их удивительную стабильность. Стабильность наблюдается независимо от того, в каком месте на диске зарегистрирована вспышка. На рис. 4 показаны типичные распределения магнитного поля АО во время вспышки. Представлены два момента времени с интервалом  $\Delta t = 1.5$  мин в окрестности максимума рентгеновского излучения X2.2. Распределения показаны красным и синим цветами. Справа синее изображение наложено на красное. Только небольшое количество точек оказывается не совпадающими, т.е. в максимуме энерговыделения вспышки никаких заметных изменений распределения магнитного поля в АО не произошло. Это типично даже для самых мощных вспышек. Во время вспышки с точностью до 1% сохраняется магнитный поток и остаётся неизменным распределение поля в АО. Следует отметить, что длительность вспышек обычно не превышает двух десятков минут, а следовательно, угол между лучом зрения прибора и нормалью к поверхности Солнца сохраняется за это время с точностью, лучшей 1%. Это значит, что сохранение во время вспышки компоненты магнитного поля вдоль луча зрения позволяет утверждать, что во время вспышки с высокой точностью сохраняется распределение как нормальной, так и тангенциальной компонент магнитного поля АО.

Самое большое изменение поля АО наблюдалось во время гигантской вспышки X17 (рис. 5). Пятно ( $B_{\max} = 2650$  Гс), отмеченное стрелкой, приобрело  $\delta$ -конфигурацию с потоком противоположного знака  $\sim 10^{19}$  Мкс. Никаких других особенностей в динамике магнитных полей во время этой и других вспышек не обнаружено.

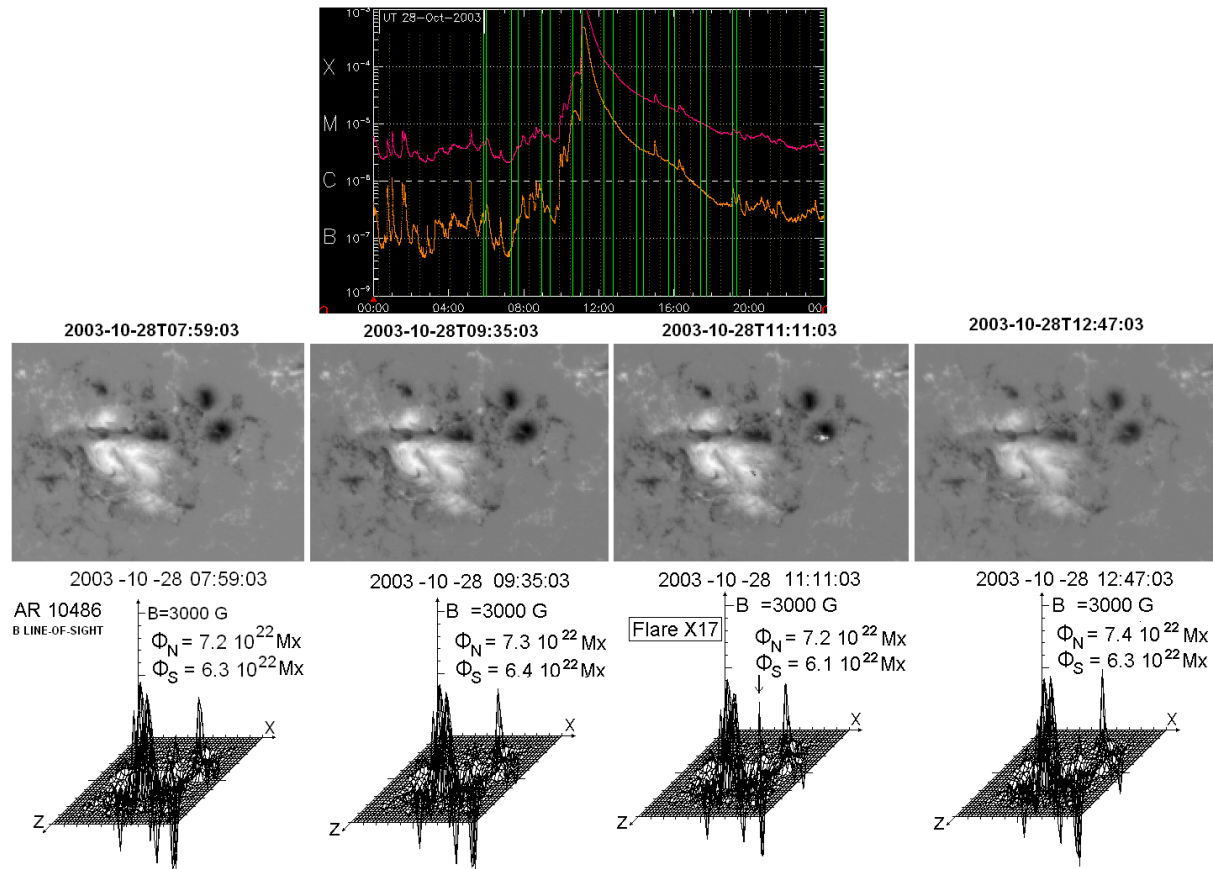


Рис. 5: Магнитограммы и распределение магнитного поля в АО во время вспышки X17.

## 5 Заключение

Солнечные вспышки возникают над АО только после возрастания магнитного потока до некоторого критического значения. Для вспышек класса X  $\Phi = 10^{22}$  Мкс. Анализ магнитного поля АО во время вспышки не обнаруживает каких-либо характерных изменений. Большинство вспышек происходит при высоком постоянстве распределения фотосферного магнитного поля. Эти результаты согласуются с моделью вспышки, основанной на модели коронального токового слоя, диссипация магнитной энергии которого не оказывает заметного влияния на распределение магнитного поля в АО.

Работа поддержана Программой 22 Президиума РАН.

Inst. of Astronomy RAS  
 Pyatnitskaya Str., 48.  
 109017 Russia  
*podgorny@inasan.ru*  
 Lebedev Phys. Inst. RAS  
 Leninsky Prospect 53  
 119991 Russia  
*podgorny@lebedev.ru*  
 Received January 15, 2013

И.М. Подгорный  
 I.M. Podgorny

А.И. Подгорный  
 A.I. Podgorny