

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.87-90

## О ПРОГНОЗЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ПОВЕДЕНИЮ УФ ЭМИССИЙ

И.М. Подгорный<sup>1</sup>, А.И. Подгорный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия; e-mail: podgorny@inasan.ru

<sup>2</sup>Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва, Россия; e-mail: podgorny@lebedev.ru

**Аннотация.** Анализировалось поведение спектральных линий атомов высокоионизованного железа, включая 193 Å FeXXIV, 94 Å FeXVIII и 131 Å FeXXIII, во время вспышек и в предвспышечном состоянии. Использовались результаты измерений американского аппарата SDO. Показано появление предвспышечных эмиссий, которые могут быть использованы для прогноза вспышек. Структура, излучающая в спектральной линии 94Å (T ~ 6 МК), появляется, когда численное МГД моделирование демонстрирует формирование токового слоя и накопление энергии в короне над активной областью. Во время вспышки происходит локальное нагревание облачка плазмы до температуры не менее 20 МК, в том месте, где наблюдалось предвспышечное свечение. Редкое сложное явление наблюдалось 4 – 10 сентября 2017 г. Вспышка X8.2 произошла во время минимума солнечной активности на обратной стороне солнечного диска за западным лимбом, но на Земле наблюдался мощный импульс солнечных космических лучей. Поток протонов пришел с крутым фронтом (~10 мин.) с запаздыванием равным времени пролета протонов. Эти протоны могли прийти к Земле вдоль линий магнитного поля спирали Архимеда, не испытывая столкновений. Обнаружение гигантских вспышек на карликах класса G можно рассматривать, как новый независимый аргумент в пользу генерации космических лучей во вспышках, а не в ударных волнах.

### Введение

Солнечная вспышка представляет собой взрывное выделение энергии в короне над активной областью. При большой вспышке (класса X) за 20 – 30 минут выделяется  $\sim 10^{32}$  эрг. Большие вспышки возникают над активными областями со сложным распределением источников магнитного поля, при магнитном потоке АО больше  $10^{22}$  Мкс [1, 2]. Замечательным свойством солнечной вспышки является отсутствие сколько-нибудь значительных изменений магнитного поля АО во время вспышки [3]. Это происходит из-за того, что энергия вспышки выделяется при диссипации токов в короне, образующих в предвспышечном состоянии токовый слой. Численное МГД моделирование для начальных и граничных условий, взятых из предвспышечного состояния конкретных вспышек, показало образование токового слоя над АО и аккумуляцию в его магнитном поле энергии для вспышки [4 - 6]. При вспышке наблюдается тепловое рентгеновское излучение коронального источника с температурой ~40 МК, излучаемого облачком плотной плазмы ( $n \sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup>), возникшим в токовом слое. Солнечная вспышка сопровождается выбросом корональной плазмы, вызывающим мощные возмущения магнитосферы Земли – магнитные бури, аварии в сети энергоснабжения, нарушения радиосвязи. Некоторые большие солнечные вспышки сопровождаются импульсами солнечных космических лучей с энергией не менее десятков ГэВ. Анализ вычисленного и измеренного спектров солнечных космических лучей показал, что ускорение протонов происходит во вспышке вдоль особой линии магнитного поля токового слоя [7, 8].

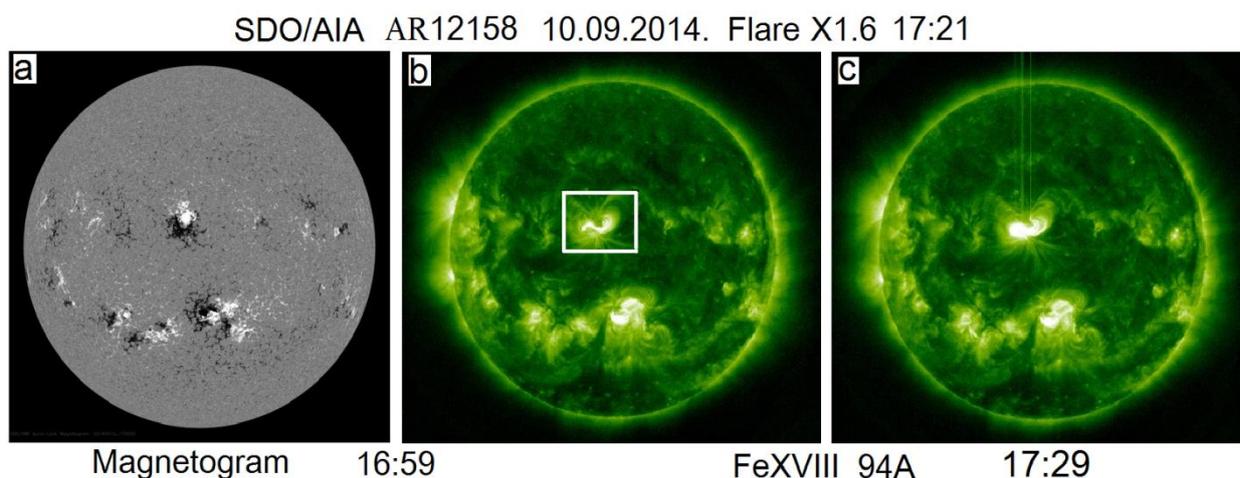
Существует явный соблазн объяснить ускорение галактических и солнечных космических лучей одним и тем же механизмом [9]. Процессы, вызывающие ускорение частиц космических лучей, уже более ста лет остаются не выясненными. Наиболее популярной, но ничем не доказанной, гипотезой является ускорение протонов в межзвездных ударных волнах. Солнце представляет собой единственный объект, генерирующий импульсы космических лучей с энергией не менее 20 ГэВ, происхождение, которых доступно непосредственным исследованиям. Нет никаких оснований полагать, что механизмы ускорения частиц на Солнце и других звездах имеют различную природу. Однако, энергия галактических космических лучей на несколько порядков величины превышает максимальную энергию протонов, ускоренных на Солнце.

Обнаружение гигантских вспышек на карликах класса G можно рассматривать, как новый независимый аргумент в пользу генерации галактических космических лучей во вспышках, а не в ударных волнах. Возникновение "супервспышек" с энергией значительно большей, наблюдаемой при солнечных вспышках, обнаружено на различных звездах карликов класса G, некоторые из которых вращаются быстро, а некоторые со скоростью порядка скорости Солнца [10]. В работе [10] сообщается о 365 зарегистрированных сверхвспышках на звездах, вращающихся с угловой скоростью меньшей угловой скорости Солнца. Всего на аппарате Кеплер было исследовано 83000 звезд в течении 120 дней. Значительное различие максимальных

энергий галактических и солнечных космических лучей ранее не способствовало представлению об их одинаковых механизмах происхождения, однако обнаружение superflares сделало гипотезу об ускорении космических лучей в токовых слоях более основательной. Данные работы [11] показали, что энергия звездной вспышки может превосходить  $10^{36}$  эрг, т. е. превосходить энергию большой солнечной вспышки на 3 – 4 порядка величины, а, по-видимому, энергия протонов, ускоренных в этих звездных вспышках, может значительно превышать энергию частиц, регистрируемых от вспышек на Солнце. Таким образом имеются все основания полагать, что вспышка является универсальным астрономическим процессом, ответственным за ускорение протонов в галактике и на Солнце.

### Предвспышечная эмиссия спектральной линии 94 Å из активной области

Одна из активных областей, находящаяся вблизи центра диска (AR12158), вызвала вспышку X1.6 10 сентября 2014 года в 17:21. На рис. 1b показана фотография предвспышечного состояния диска, сделанная в спектральной линии 18 раз ионизованного железа 94 Å (FeXVIII).

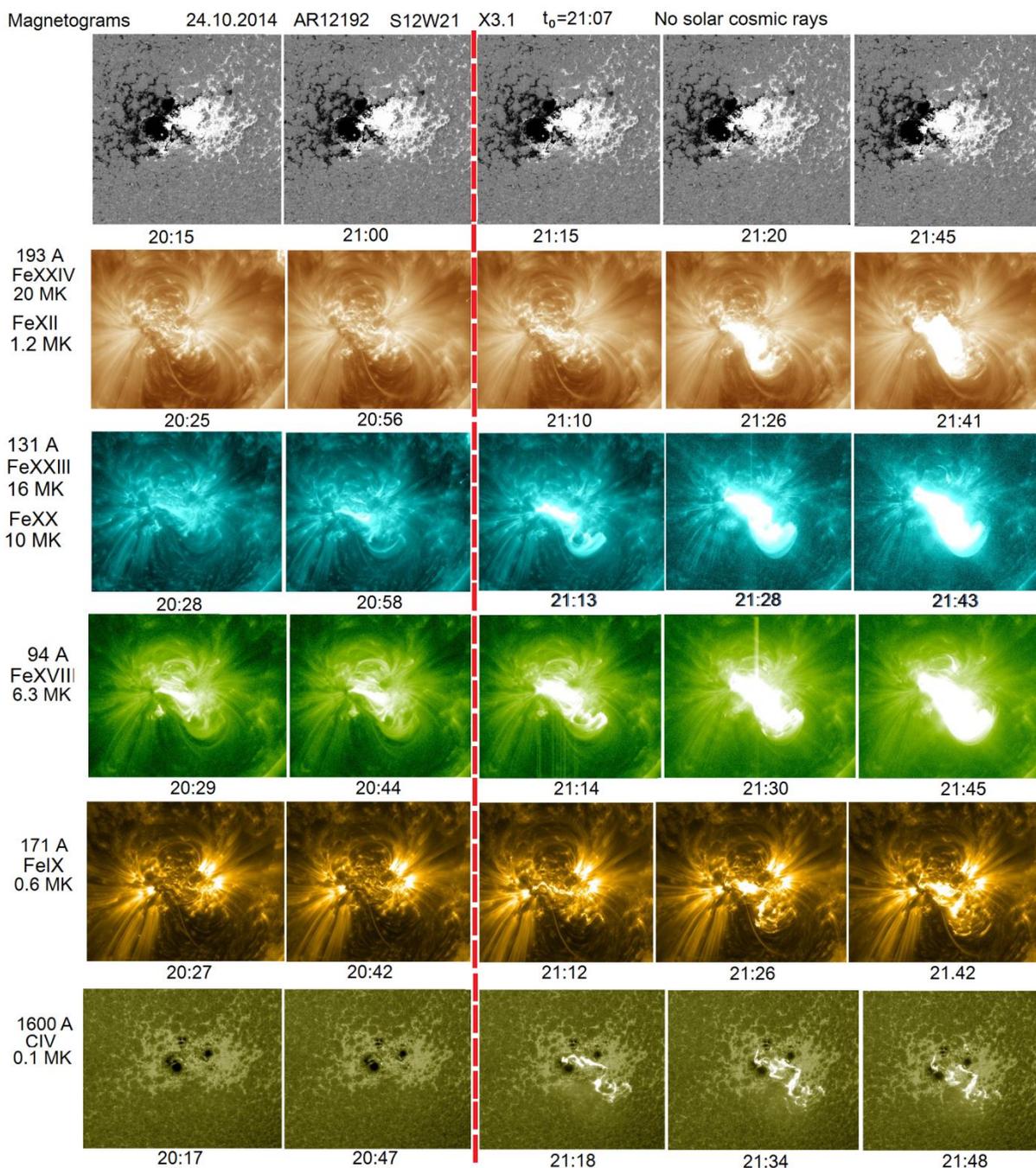


**Рисунок 1.** *a)* Магнитограмма солнечного диска в предвспышечном состоянии. *b)* Фотография солнечного диска в предвспышечном состоянии в спектральной линии 94 Å. *c)* Фотография солнечного диска во время вспышки в линии 94 Å.

В солнечной короне линия 94 Å обладает максимальной яркостью при электронной температуре  $\sim 6.3$  МК, т. е. не может быть очень яркой при типичной температуре короны  $\sim 1$  МК и не должна показывать взрывного возрастания эмиссии при сильном возрастании температуры во время вспышки. На рис. 1c представлена фотография при вспышке. Возрастание эмиссии 94 Å перед вспышкой начинается именно тогда и в том месте, где численное МГД моделирование показывает образование токового слоя, в магнитном поле которого запасается энергия для вспышки [6]. Появление линии 94 Å до начала вспышки (до  $t_0 = 17:21$ ) указывает на накопление магнитной энергии над активной областью, т. е. является признаком возникновения вспышки и может быть использовано для прогноза.

Первая строка Рис. 2 показывает практическое постоянство источников магнитного поля на фотосфере на протяжении часа перед вспышкой и во время вспышки, свидетельствующее о медленном (в течении суток) формировании предвспышечной конфигурации в короне над АО. При этом диссипация токов в короне, сформировавшегося токового слоя, не вызывает заметных возмущений магнитного поля на фотосфере. Практическое постоянство магнитного поля активной области во время вспышки явилось наиболее неожиданным открытием последних лет, доказывающим диссипацию магнитной энергии при вспышке над активной областью.

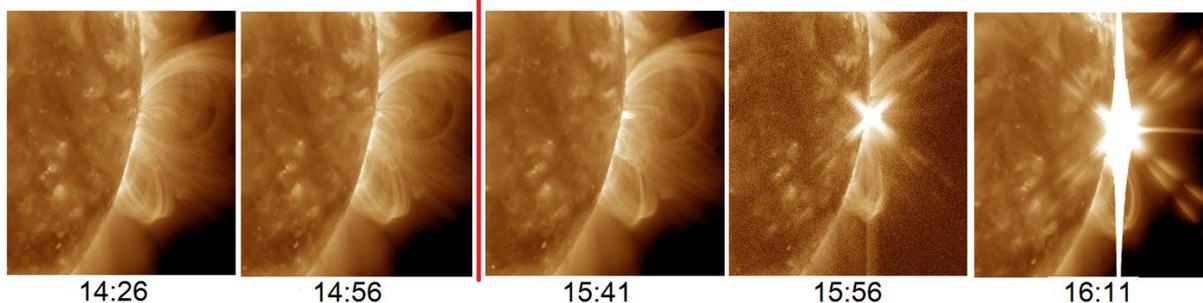
Вторая строка показывает отсутствие изменений в эмиссии линии горячей плазмы 193 Å перед вспышкой, затем происходит резкое возрастание эмиссии при вспышке. Излучение иона FeXII в наблюдаемом диапазоне длин волн не могло дать вклада в это изображение, т. к. при вспышке происходит выделение энергии и сильное нагревание плазмы с выгоранием иона FeXI, о чем свидетельствует эмиссия теплового рентгеновского излучения. Третья строка (линия 131 Å) демонстрирует начало нагревания облачка корональной плазмы во время формирования токового слоя над активной областью и быстрый разогрев вспышечной плазмы. Четвертая строка указывает на предварительный нагрев облачка корональной плазмы и развитие при этом эмиссии линии 94 Å во время вспышки. Эмиссия этой линии появилась более чем за сутки перед началом вспышки и возросла после начала вспышки. Пятая и шестая строки показывают небольшие рваные хромосферные структуры – вспышечные ленты, которые долгое время считались главными проявлениями вспышки.



**Рисунок 2.** Динамика предвспышечного состояния (слева от красной вертикальной линии) и вспышки X3.1 (справа) в эмиссиях ионов, при различных электронных температурах.

Выделение энергии вспышки в короне над активной областью, запасаемой десятки часов в магнитном поле токового слоя, было показано в численном МГД моделировании, реально наблюдаемых вспышек [4]. В этих работах граничные и начальные условия для магнитного поля задавались непосредственно из измерений эволюции поля на фотосфере перед вспышкой. Наблюдение развития эмиссий вспышечных спектральных линий 193 Å FeXXIV и 131 Å FeXXIII отчетливо показало, что во вспышках, происходящих над активными областями Солнца на обратной стороне Солнца вблизи западного и восточного лимбов, энергия выделяется в короне за пределами солнечного диска. Пример такого удачного для наблюдения случая появления за пределами западного лимба яркой эмиссии линии 193 Å показан на рис. 3.

10.09.2017 X8.2 S09W91 AR12673  $t_0 = 15:25$   
193 A FeXXIV 20 MK



**Рисунок 3.** Эмиссия предвспышечного состояния и вспышки, происшедшей на обратной стороне солнечного диска за западным лимбом в спектральной линии горячей плазмы.

### Заключение

Выполнен анализ эмиссий спектральных линий высокоионизованных атомов железа, измеренных в предвспышечных состояниях Солнца и во время вспышек. Использованы измерения на аппарате Solar Dynamic Observatory. Анализ подтвердил выводы численного МГД моделирования реальных вспышек об аккумуляции энергии для вспышки в короне и ее взрывном выделении над активной областью. При медленной аккумуляции энергии в магнитном поле токового слоя происходит предвспышечное нагревание облачка плазмы. Эта предвспышечная эмиссия является признаком появления вспышки в ближайшие часы. Электронная температура вспышечной плазмы превышает 20 МК. Имеются все основания полагать, что вспышка является универсальным астрономическим процессом, ответственным за ускорение космических лучей в галактике и на Солнце.

### Литература

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М. АЖ. **88**, №7, 684–691 (2011).
2. Podgorny I.M., Podgorny A.M. JASTP. **92**, 59–64 (2013).
3. Podgorny I.M., Podgorny A.M., Meshalkina N.S. Sun and Geosphere. **8**, 63 (2013).
4. Podgorny A.I., Podgorny I.M. Proc. of 36 Annual Seminar. Apatity. P. 117 (2013).
5. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Геомагн. и Аэрономия. **52**, 163 (2012).
6. Podgorny A.I., Podgorny I.M. Sun and Geosphere. **8**, 71 (2013).
7. Балабин Ю.В. и др. АЖ. **82**, 940 (2005).
8. Podgorny I.M., Подгорный А.И. Sun and Geosphere. **11**, 85 (2016).
9. Подгорный И.М., Подгорный А.И. Ядерная физика. В печати.
10. Maehara H. *at al.* Nature. **485**, 478 (2012).
11. Shibayama T. *at al.* Ap. J. Suplimento Ser. **209**, 5 (2013).