

УДК 523.985.3-337

## Солнечные космические лучи

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

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая, 48, Москва, Россия  
*podgorny@inasan.ru*

<sup>2</sup>Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

**Аннотация.** Столетнее исследование космических лучей многочисленными коллективами астрофизиков не привело к пониманию физики ускорения регистрируемых частиц. Наиболее популярные механизмы ускорения связываются с ударными волнами. Однако возможные механизмы ускорения космических лучей в ударных волнах остаются только гипотезами. Регистрация нейтронными мониторами протонов с энергией до 20 ГэВ, обнаруженных на Солнце, вселяет надежду на получение новой информации о механизме генерации космических лучей. Ряд явлений, связанных с ускорением и распространением приходящих на Землю ускоренных частиц, стал доступен для наблюдения. В настоящей работе проведен анализ измерений протонов с энергией ~100 МэВ на аппаратах GOES. Установлена связь зарегистрированных протонных событий с конкретными вспышками и конкретными активными областями.

SOLAR COSMIC RAYS, *by I.M. Podgorny, A.I. Podgorny.* The centennial investigations of cosmic rays by numerous research teams of astrophysicists have not led to an understanding of the physics of acceleration of the detected particles. The most popular acceleration mechanisms are associated with shock waves. However, possible acceleration mechanisms of cosmic rays in shock waves are only hypotheses. The neutron monitors demonstrate the proton spectrum with energies up to 20 GeV, generated by the Sun, and give the opportunity to clarify the mechanism of cosmic ray generation. A number of phenomena, associated with acceleration and propagation to the Earth of the accelerated particles, become available for observation. In this paper we analyze the proton flux with energy of ~ 100 MeV measured with GOES devices. The connection of proton events with specific flares and specific active regions is demonstrated.

**Ключевые слова:** солнечные космические лучи, солнечная вспышка, ударная волна, спектр протонов

---

## 1 Введение

При солнечной вспышке происходит взрывное выделение энергии в солнечной короне над активной областью. За несколько минут энергия, запасенная в магнитном поле токового слоя (Хюрфорд и др., 2003; Подгорный, Подгорный, 2012а, б), переходит в тепло и энергию ускоренных частиц. Облачко плазмы в короне с концентрацией  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  нагревается до температуры 3–5 кэВ. Основные проявления вспышки: импульсы теплового и пучкового ( $h\nu \sim 100 \text{ кэВ}$ )

рентгеновского излучения, выбросы корональной массы, вызывающие ударную волну, видимое, ультрафиолетовое и микроволновое излучение в различных частотах, импульсные потоки релятивистских протонов (солнечные космические лучи) и др. В отдельных вспышках генерируются некоторые из этих явлений, а другие явления могут отсутствовать. Измерения мировой сети нейтронных мониторов показывают спектры протонов с энергией до 20 ГэВ (Подгорный и др., 2010а, б). Открытие солнечных космических лучей позволяет получать новую информацию об ускорении заряженных частиц в космосе, недоступную при исследовании космических лучей, приходящих из далеких областей пространства.

Наиболее популярным в настоящее время механизмом ускорения классических космических лучей являются ударные волны. Ускорение в ударных волнах рассматривается также рядом авторов в качестве механизма происхождения солнечных космических лучей (Римс, 1999; Соколов и др., 2004; Тылка и др., 2005). Однако все оценки основаны на ряде произвольных предположений. Ускорение в ударной волне рассматривается (Дроеге, 2000; Козарев и др., 2013) в предположении диффузии за счет рассеяния на неоднородностях поля, при которых длина свободного пробега составляет 0.03–0.1 АЕ. Однако протоны от вспышек, возникших на западной части солнечного диска, приходят к орбите Земли без столкновений с запаздыванием (~15–20 сек), равным пролетному времени (неоднородности, на которых происходит рассеяние частиц, еще не успели появиться). Столкновения должны приводить к диффузионному распространению и к появлению запаздывающей компоненты ускоренных протонов. Появления неоднородностей, на которых происходит рассеяние частиц, могло быть вызвано только пучковой неустойчивостью протонов, которые должны были быть ускорены ранее. До появления пучка протонов, по-видимому, отсутствовали неоднородности, на которых могли рассеиваться ускоренные протоны, поэтому первые протоны пришли к Земле без рассеяния за пролетное время. Ускорение этих “быстрых (prompt)” протонов, приходящих к Земле от вспышки и распространяющихся вдоль линии межпланетного магнитного поля без столкновений, не может быть связано с ударной волной. Рассматривается также ускорение протонов типа Ферми (Тулупов и др., 2012). Однако измерения мировой сети нейтронных мониторов (Балабин и др., 2005; Подгорный, Подгорный, 2016) показали, что фронт импульса релятивистских протонов от вспышек, происшедших на западной части солнечного диска (“быстрая” компонента), начинает регистрироваться через время  $\Delta t \sim 15$  мин после появления импульса теплового рентгеновского излучения вспышки. Эта задержка обусловлена временем пролета частицы вдоль линий межпланетного магнитного поля спирали Архимеда.

Не все ускоренные протоны уходят в межпланетное пространство. Часть их попадает на поверхность Солнца, вызывая ядерные реакции с выходом  $\gamma$ -излучения. Длительность импульса  $\gamma$ -излучения, как правило, не превышает десяти минут, т. е. длительность генерации релятивистских частиц также не превышает десяти минут. Однако нейтронные мониторы демонстрируют потоки релятивистских протонов на орбите Земли с длительностью, измеряемой сутками. Такие запаздывающие протоны не могут принадлежать к прямому потоку от области вспышки. Они могут приходить к Земле от вспышки с солнечным ветром и в результате диффузии поперек магнитного поля.

Главным результатом исследований на нейтронных мониторах (Балабин и др., 2005; Подгорный, Подгорный, 2016) является принципиальное различие спектров потоков протонов быстрой и запаздывающей компонент. Быстрая компонента поступает на орбиту Земли только от вспышек, возникающих на западной части солнечного диска. Быстрая компонента состоит из частиц, приходящих вдоль линий межпланетного магнитного поля с малыми питч-углами без столкновений, она обладает экспоненциальным спектром  $\sim \exp(-W/W_0)$ . В процессе бесстолкновительного распространения энергетический спектр не должен изменяться, т. е. регистрируемый спектр “быстрых” протонов должен совпадать со спектром частиц, вышедших из источника. Через 15–20 мин распределение скоростей, регистрируемых на орбите Земли, становить-

ся изотропным, по-видимому, из-за развития пучковой неустойчивости, и спектр становится степенным. Этот запаздывающий поток длится несколько суток и его распространение носит диффузионный характер. Спектры диффузионного потока демонстрируют степенную зависимость  $\sim W^{-\gamma}$ . Наличие двух компонент однозначно продемонстрировано измерениями на нейтронных мониторах, при этом значения  $W_0$  и  $\gamma$  не сильно отличаются для различных событий.  $W_0$  чаще всего лежит в пределах 0.5–1 ГэВ,  $\gamma$  находится в пределах 3–4 (Подгорный, Подгорный, 2012а, б).

Условия для генерации релятивистских частиц солнечных космических лучей создаются в токовом слое в окрестности особой линии магнитного поля (Подгорный, Подгорный, 2012а, б). Электрическое поле  $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  в токовом слое возникает при втекании плазмы в токовый слой и пересоединении линий магнитного поля. Здесь  $\mathbf{V}$  – скорость втекания плазмы в слой, т. е. скорость магнитного пересоединения.  $\mathbf{B}$  – магнитное поле токового слоя. Заряженные частицы могут ускоряться вдоль особой X-линии в ее окрестности. Частица, отклонившаяся от X-линии и попавшая в область дрейфа, выходит из режима ускорения. Эффективность ускорения частиц электрическим полем  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , направленным вдоль особой линии магнитного поля, известна из экспериментов с мощным импульсным разрядом (Лукиянов, Подгорный, 1958).

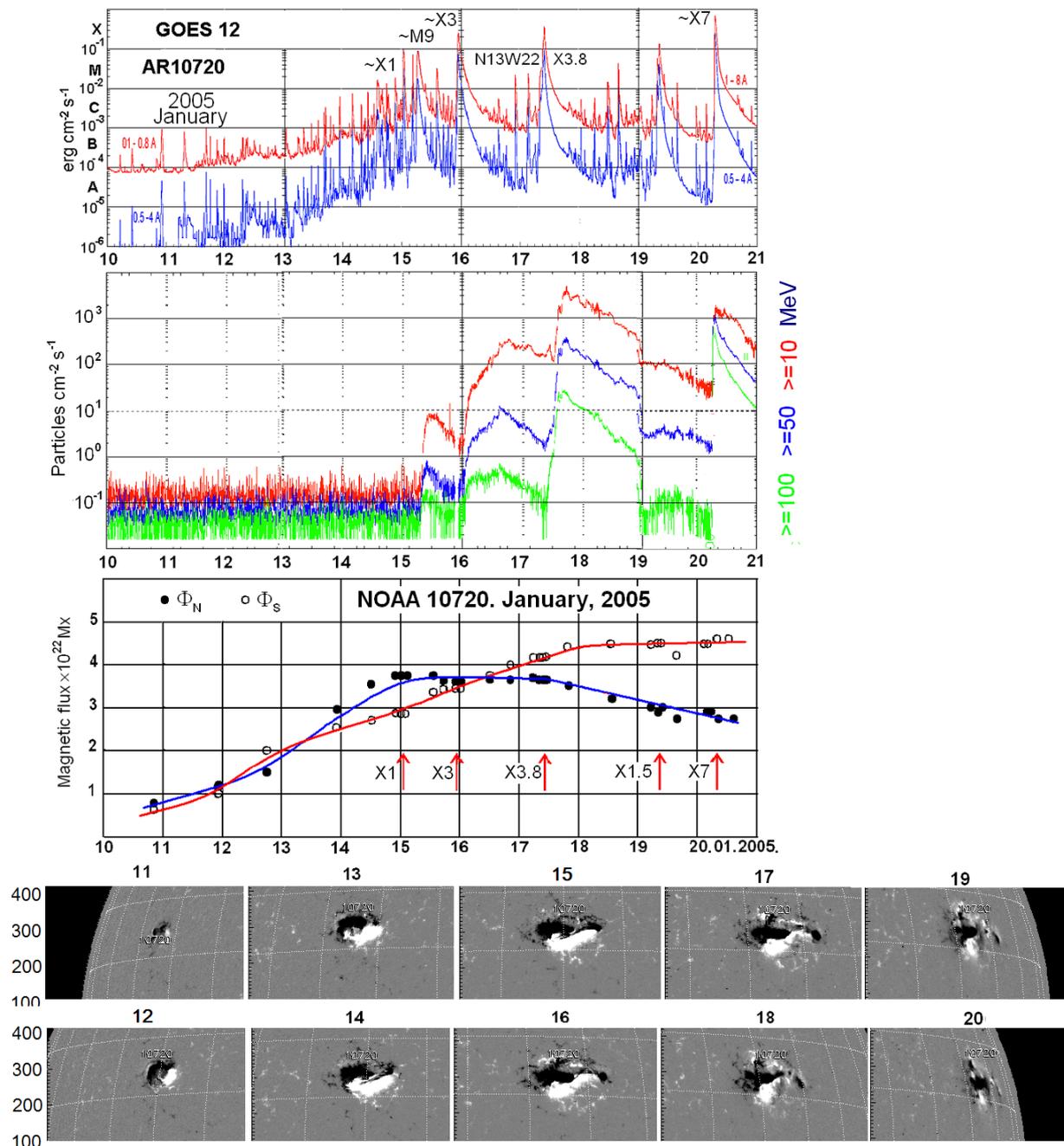
Механизм ускорения протонов во вспышечном токовом слое был показан методом пробных частиц (Подгорный и др., 2010а, б), в котором использовалась конфигурация полей, рассчитанная в трехмерном численном МГД-эксперименте, где начальные и граничные условия задавались из измерений магнитного поля в активной области. Показано, что ускоренные в токовом слое протоны действительно обладают экспоненциальным спектром, который при скорости магнитного пересоединения  $2 \times 10^7$  см/с совпадает со спектром, измеренным сетью нейтронных мониторов на фронте потока протонов от западной вспышки. Таким образом, в первые 10–20 мин на орбиту Земли приходит быстрая компонента – частицы, ускоренные в токовом слое вспышки и распространяющиеся с пролетным временем без столкновений. Они могут свободно распространяться только вдоль магнитных линий спирали Архимеда, соединяющих вспышку с регистратором протонов.

Быстрая компонента протонов сменяется потоком запаздывающих протонов, по-видимому, из-за развития пучковой неустойчивости. Рассеяние на возникших неоднородностях должно приводить к диффузионному распространению потока протонов вдоль и поперек поля. Численное моделирование показало (Хе и др., 2011), что введение магнитной турбулентности приводит к рассеянию протонов и анизотропное распределение скоростей на более поздней стадии становится изотропным.

## 2 Мощные комплексы протонных событий и отдельные события

Независимая и дополнительная информация о потоке ускоренных протонов, приходящих к Земле, была получена из измерений на аппаратах GOES, находящихся на геоцентрической орбите и регистрирующих потоки протонов в широком угле в трех интервалах энергии >10 Мэв, >50 Мэв и >100 Мэв (Подгорный, Подгорный, 2015а, б; Маландраки, 2015). Измерения на GOES демонстрируют мощные комплексы протонных событий, вызываемые несколькими протонными вспышками, следующими друг за другом с интервалом около суток. В течение 11-летнего периода солнечной активности наблюдается не более двух-трех комплексов. Типичное развитие мощного комплекса протонных событий, происшедшее над активной областью AR10720, представлено на рис. 1. Согласно приведенным на рисунке магнитограммам, слабая активная область появилась у восточного лимба. Вначале рентгеновские импульсы были небольшими, не превышали класса В. Потоки ускоренных протонов от слабой активной области полностью отсутствовали. По мере вращения Солнца северный и южный магнитные потоки активной области возрастали, активная область усиливалась, и конфигурация магнитного поля

становилась сложнее. К 15 июля северный и южный магнитные потоки возросли до  $3 \times 10^{22}$  мкс, распределение поля в активной области стало сложным, и появились вспышки типа X. За одной из них последовало протонное событие.

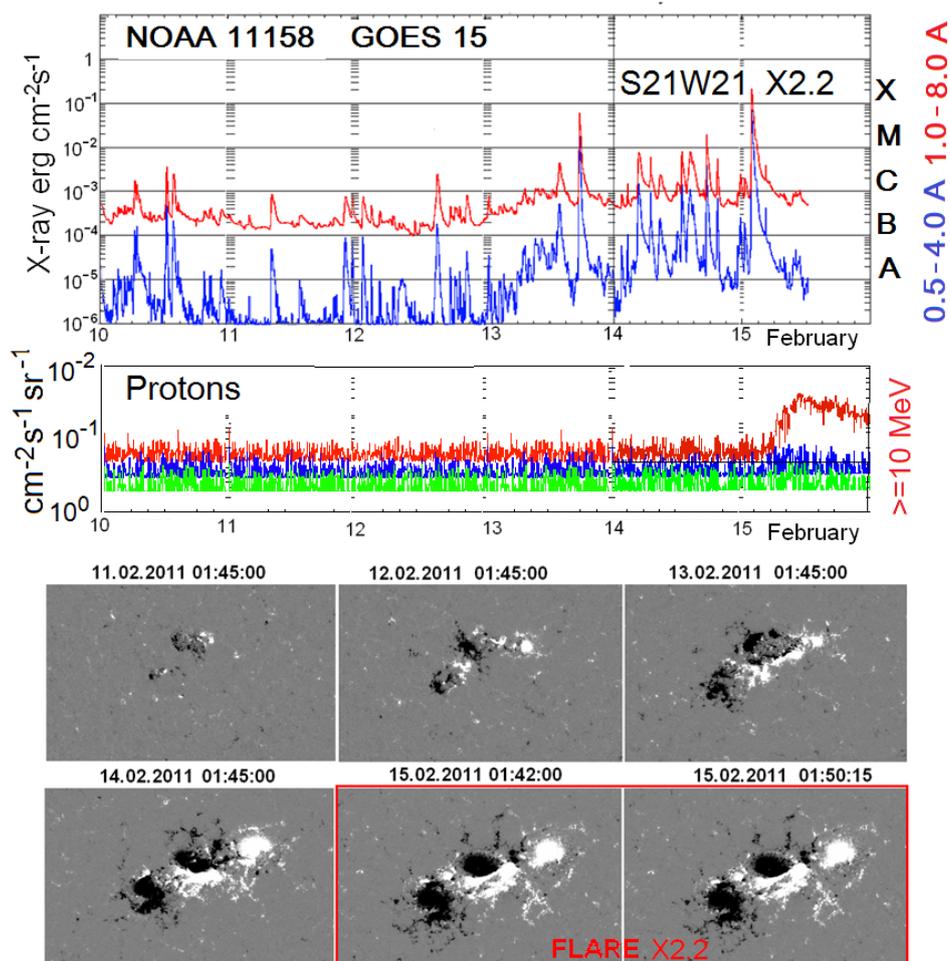


**Рис. 1.** Вверху солнечные вспышки, вызванные областью AR10720, ниже потоки протонов, зарегистрированные аппаратом GOES; северный и южный магнитные потоки AR10720, магнитограммы

Далее возникли большие (X-типа) вспышки, и некоторые из них сопровождалась протонными событиями. Однако большое количество вспышек, произведенное одной областью AR10720, и

## Солнечные космические лучи

наложение нескольких протонных событий затрудняет четкое сопоставление протонных событий с конкретными вспышками. Для сопоставления мы использовали протонные события, возникшие на западной и восточной частях солнечного диска. Типичное развитие активной области, давшей вблизи центра солнечного диска одиночную вспышку с потоком ускоренных протонов, представлено на рис. 2.

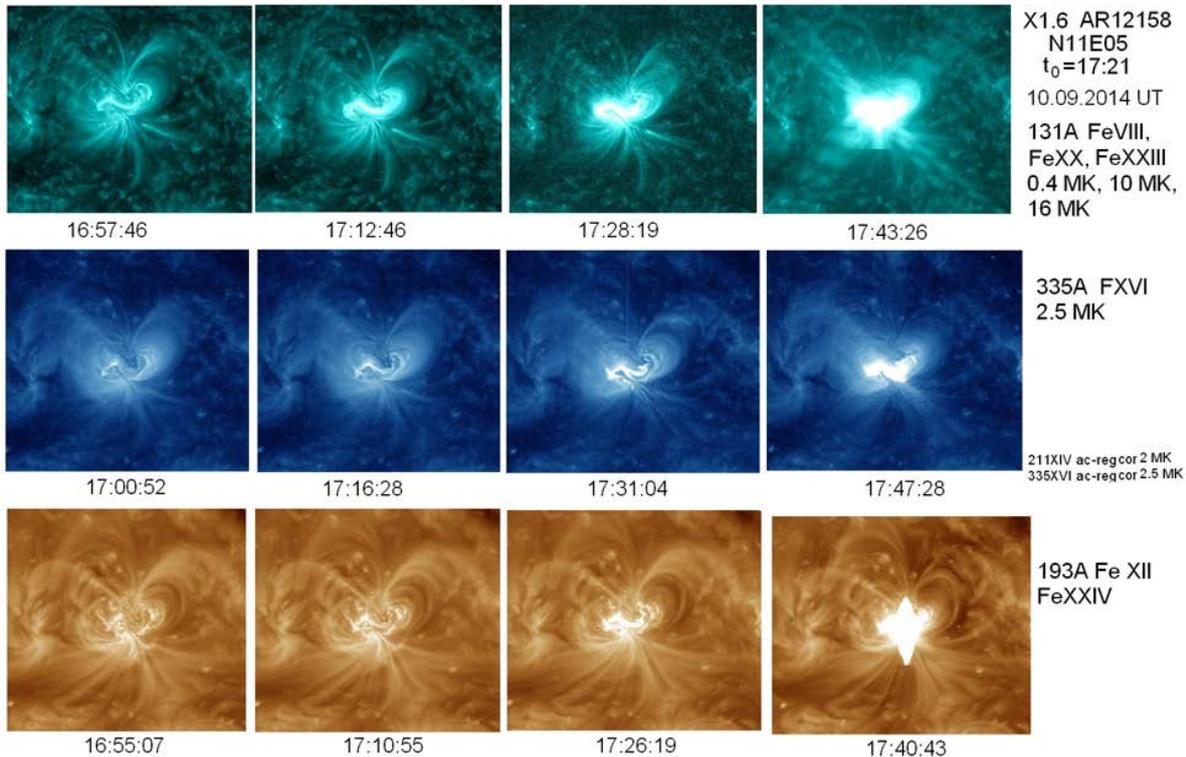


**Рис. 2.** Одиночное протонное событие возникло над активной областью после увеличения магнитного потока. Во время вспышки никаких изменений распределения магнитного поля в активной области не наблюдалось

Вспышка произошла после возрастания магнитного потока над активной областью со сложной конфигурацией. Важной особенностью магнитного поля активной области во время вспышки является его постоянство (Подгорный, Подгорный, 2012a). Магнитограммы, снятые вблизи максимума вспышки с интервалом 8 минут (01:42:00 – 01:50:15), неразличимы. Это значит, что диссипация магнитной энергии происходит в короне вследствие затухания тока над активной областью. Затухание тока в короне практически не возмущает поля активной области.

### 3 Вспышка в короне или в хромосфере

В литературе и на семинарах не прекращается дискуссия (Лившиц и др., 2012) о месте выделения энергии солнечной вспышки — происходит ли вспышка в короне или в относительно холодной плазме хромосферы. По-видимому, наиболее четкий ответ на этот вопрос дают уникальные фотографии вспышки аппарата SDO. На рис. 3 представлены данные SDO для вспышки X6 10.09.2014.



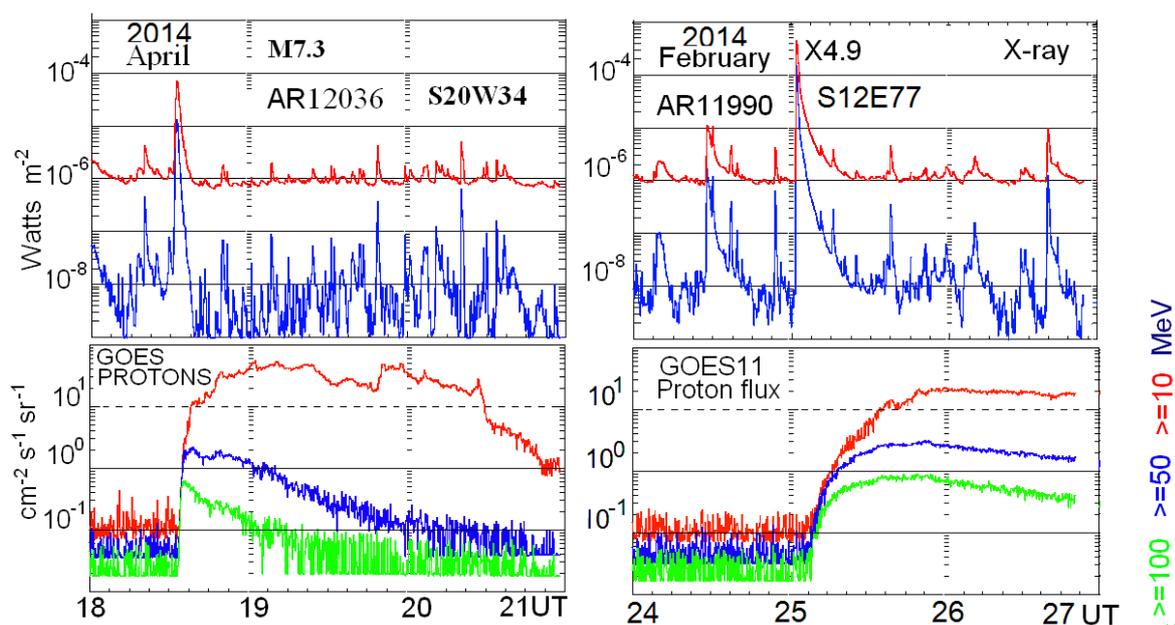
**Рис. 3.** Фотографии развития солнечной вспышки в линиях высокоионизованного железа по данным аппарата SDO, опубликованным на сайте аппарата. Такие линии существуют только в короне. Это значит, что накопление энергии и сам вспышечный процесс происходит не в хромосфере, а в короне

В линиях высокоионизованного железа, излучаемых в короне, перед вспышкой появляется ярко светящаяся структура, не имеющая формы линий магнитного поля, отчетливо видных на фотографиях. Свечение отображает форму проекции токовой системы. Одномерное изображение не позволяет воспроизвести форму свечения, однако отчетливо видно, что сечение не имеет формы магнитной арки. По-видимому, это корональное свечение принадлежит токовому слою. Во время солнечной вспышки свечение катастрофически возрастает. Особенно быстро возрастает поток излучения 23 раза ионизованного иона, свечение которого перед вспышкой было явно слабее, чем свечение других ионов. Во время вспышки, по-видимому, происходит образование этого иона. Такое состояния ионизации может возникнуть только в сильно нагретой короне. Таким образом, выделение энергии произошло не в слабоионизованной плазме хромосферы, а при нагревании короны, как это следует из ранее полученных рентгеновских снимков аппарата RHSSI.

#### 4 Протонные события от западных и восточных вспышек

На рис. 4 показаны типичные одиночные протонные события, сопровождающие западные (вверху) и восточные (внизу) вспышки. Во время одиннадцатилетнего цикла может наблюдаться 10–15 больших протонных событий. Каждому протонному событию предшествует вспышка, обычно класса X или класса M. Не все большие вспышки (классов X и M) вызывают импульсы солнечных космических лучей, лишь около 30 % больших вспышек сопровождается регистрацией солнечных космических лучей.

Фронты импульсов протонов от западных и восточных вспышек (рис. 4) демонстрируют существенно различные структуры. Поток протонов от западных вспышек имеет крутой фронт, длительностью не превышающий 20–30 мин, а регистрация частиц начинается через 10–20 мин после начала западной солнечной вспышки. Такая малая задержка потока протонов от западной вспышки может определяться только пролетным временем к Земле без столкновений вдоль линии магнитного поля спирали Архимеда. Низкая концентрация плазмы в солнечном ветре обеспечивает бесстолкновительный поток протонов в диапазоне энергии, регистрируемом аппаратами GOES. Бесстолкновительное распространение протонов не искажает спектра частиц. Регистрируемый нейтронными мониторами экспоненциальный спектр на фронте (быстрая компонента) потока протонов от западной вспышки совпадает со спектром, вычисленным для ускорения протонов вдоль особой линии магнитного поля в токовом слое (Подгорный и др., 2010a).



**Рис. 4.** Импульсы потока ускоренных протонов от западных (вверху) и восточных (внизу) вспышек, измеренные на аппарате GOES

В редких случаях форма фронта протонного импульса от западной вспышки отличается от формы фронта событий, приведенной на рис. 4, где наблюдается уширение фронта потока протонов. Иногда ширина фронта может достигать нескольких часов. Это случается, когда протонная вспышка произошла непосредственно после других больших вспышек и корональных выбросов, и имело место сильное искажение спиральной структуры магнитного поля Земли.

Бесстолкновительное распространение имеет место только на фронте потока в течение 20–30 минут в западных вспышках. Протоны распространяются в начальный момент времени вдоль линии поля (быстрая компонента на фронте потока протонов) в межпланетной плазме по законам движения частиц в вакууме. Однако через короткий промежуток времени, по-видимому, начинают играть роль плазменные процессы, развивается пучковая неустойчивость и происходит рассеяние протонов в турбулентной плазме. Длина свободного пробега уменьшается, поток становится изотропным, и распространение потока становится диффузионным, а время прохождения протонов к Земле возрастает. Возможность развития неустойчивости протонного пучка в плазме обсуждалась в работе (Истомин, 2012).

Поток протонов от западных и восточных вспышек продолжает регистрироваться часами после окончания вспышки, т. е. направленная скорость потока вдоль линий магнитного поля падает на несколько порядков величины, а скорость перемещения быстрых протонов поперек магнитного поля (от восточных вспышек) возрастает.

Измерения на нейтронных мониторах показали (Подгорный и др., 2010а), что поток релятивистских протонов на фронте (prompt-компонента) обладает сильной анизотропией (вектор скорости протонов параллелен линиям магнитного поля), а запаздывающая компонента с изотропным распределением скоростей начинает регистрироваться через 20–30 минут. Такой сценарий должен иметь место, если пучок ускоренных протонов вызвал развитие турбулентности и следующие затем частицы рассеиваются на этой турбулентности. Поток становится изотропным и скорость его распространения вдоль поля падает. Ограниченный пучок протонов вызывает развитие турбулентности, резко возрастает рассеяние частиц на флуктуациях. Перенос частиц вдоль поля становится диффузионным, его скорость уменьшается, а скорость диффузии поперек поля возрастает. Скорость распространения поперек поля на протяженном фронте потока от восточных вспышек при этом может возрастать и превзойти скорость солнечного ветра.

Отсутствие линий межпланетного магнитного поля, соединяющих восточную вспышку с Землей, не позволяет протонам достичь регистратора протонов GOES, двигаясь без столкновений вдоль линии поля. При отсутствии турбулентности потоки протонов вдоль линии магнитного поля от вспышки, происшедшей на восточной части диска (рис. 4, справа), не могут достичь расположенного у Земли аппарата. Они могут дрейфовать поперек межпланетного поля в электрическом поле Лоренца, вызванном скоростью солнечного ветра. При распространении протонов в межпланетной среде без столкновений, протоны должны дрейфовать со скоростью солнечного ветра. Следовательно, дрейфовое движение должно привести к задержке прихода фронта протонов от восточной вспышки к Земле ( $1 \text{ a.u.} / V_{\text{sw}}$ ) на 3–4 дня. В действительности (рис. 4) задержка фронта протонов от восточных вспышек по отношению к солнечной вспышке составляет около 3–5 часов. Увеличение скорости перемещения протонов поперек магнитного поля может быть связано с турбулентной диффузией поперек магнитного поля. Поток протонов от восточных вспышек, в отличие от потока от западных вспышек, нарастает медленно, как это должно быть при диффузионном распространении. Длительность потока протонов от восточной вспышки на фронте составляет около суток.

Если частота рассеяний протонов на флуктуациях превышает частоту ларморовского вращения протонов, то скорости диффузии вдоль и поперек магнитного поля становятся малоразличимыми. Одинаковый характер диффузионного распространения запаздывающих протонов от западных и восточных вспышек и различие формы фронтов особенно хорошо видно у очень длительных одиночных вспышек (рис. 5).

Спад потока протонов в течение нескольких суток соответствует времени распространения солнечного ветра от Солнца к Земле. Это значит, что захваченные межпланетным магнитным полем солнечного ветра протоны в основном переносятся со скоростью солнечного ветра. Определенную роль может играть также диффузия, ускоряя перенос протонов и тем самым не-

## Солнечные космические лучи

сколько сокращая длительность регистрируемого на орбите Земли потока протонов. Такое простое представление хорошо согласуется с поведением хвостовой части протонных импульсов.

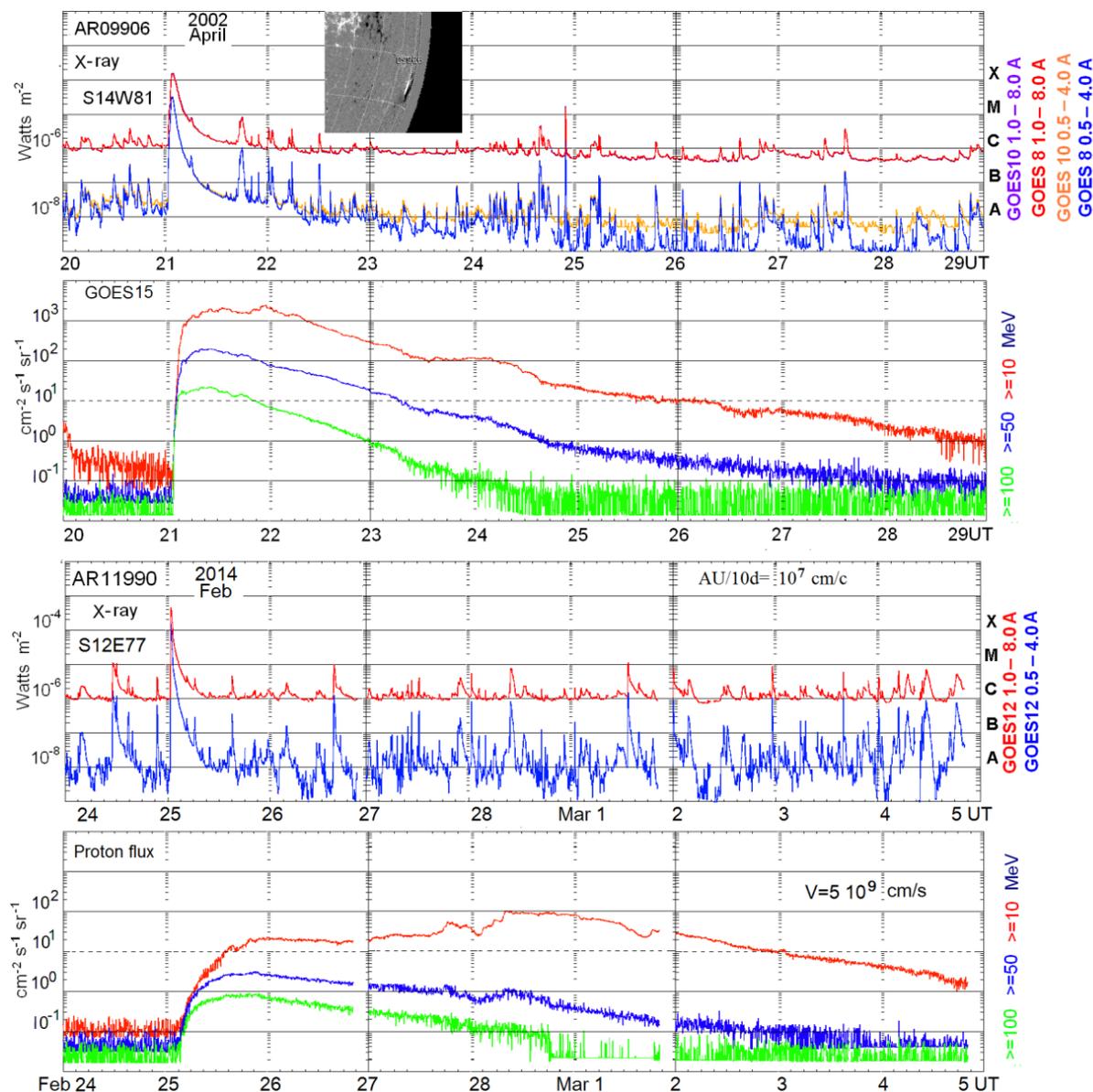


Рис. 5. Длительные протонные события от западной (вверху) и восточной (внизу) вспышек

## 5 Гамма-излучение вспышек

Часть ускоренных во вспышке протонов распространяется в межпланетном пространстве и регистрируется аппаратами GOES на орбите Земли. На рис. 3 и 4 показаны типичные протонные импульсы от одиночных вспышек. Другая часть ускоренных протонов попадает на поверхность Солнца и вызывает ядерные реакции с выходом  $\gamma$ -излучения (Кузнецов и др., 2006; Крукер и др., 2008; Лин и др., 2003; Палшин и др., 2013).

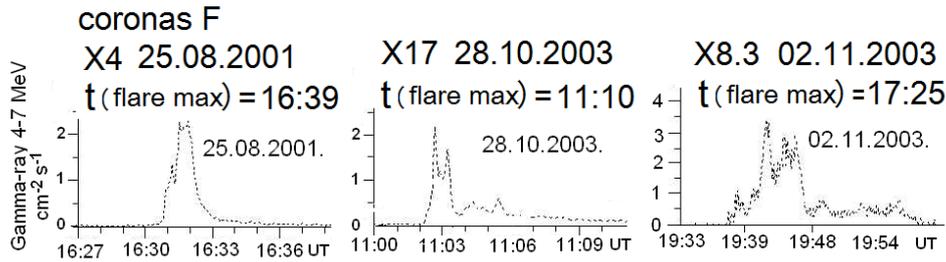


Рис. 6. Импульсы  $\gamma$ -излучения вспышек по данным аппарата КОРОНАС-Ф

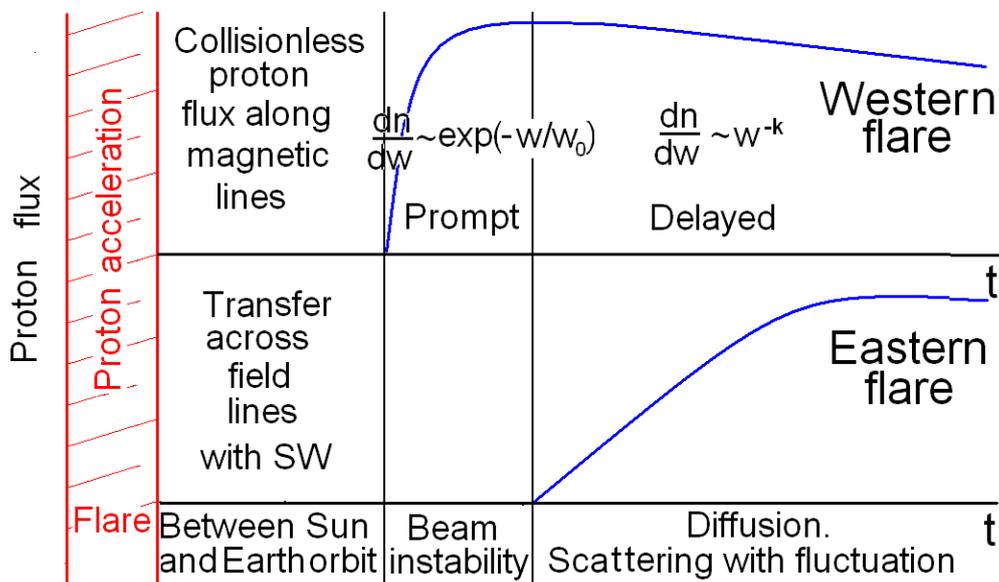


Рис. 7. Схема развития протонного события, регистрируемого на аппаратах GOES

Длительность  $\gamma$ -излучения дает масштаб времени эжекции протонов из источника. Одной из характерных особенностей солнечных космических лучей является значительное различие длительности эжекции потока протонов из источника и длительности регистрации потока протонов аппаратами GOES на орбите Земли. Поток протонов из источника, регистрируемый по  $\gamma$ -излучению, вызванному ядерными реакциями на Солнце, длится около 10 минут, что не превышает длительности энерговыделения вспышки, определенного по длительности импульса теплового рентгеновского излучения. На рис. 6 показаны импульсы  $\gamma$ -излучения, зарегистрированные на аппарате КОРОНАС-Ф (Кузнецов и др., 2006) на орбите Земли. Типичная длительность импульса протонов составляет трое суток. Как отмечалось выше, развитие пучковой неустойчивости должно приводить к переходу потока протонов в режим диффузионного распространения, таким образом скорость распространения потока протонов уменьшается. Ряд авторов показал, что максимумы теплового излучения вспышки достигаются одновременно с максимумами  $\gamma$ -излучения. В обзоре (Крукер и др., 2008) показано совпадение максимумов рентгеновского излучения с энергией  $\sim 15$  КэВ и  $\gamma$ -излучения  $\sim 1$  МэВ во вспышке 23 июля 2002 г. Аналогичные данные приведены в (Лин и др., 2003) для вспышки 23 июля 2002 г и в (Палшин и др., 2013) для  $\gamma$ -линии 2.223 МэВ. Этот факт можно рассматривать как прямое подтверждение

ускорения протонов во вспышке, а не в ударной волне, которая могла образоваться корональным выбросом после вспышки. Однако согласно измерениям на аппарате КОРОНАС-Ф (рис. 6), точное совпадение максимумов  $\gamma$ - и рентгеновского излучений отсутствует. Гамма-излучение, зарегистрированное на КОРОНАС-Ф, даже опережает появление вспышек, но для вспышки 2 октября 2003 г. максимум  $\gamma$ -излучения запаздывает на два часа. Достоверность этих данных аппарата КОРОНАС-Ф требует дополнительного контроля.

## 6 Заключение

Последовательность развития основных эффектов протонных событий показана на рис. 7.

1. Генератором солнечных космических лучей является солнечная вспышка, происходящая над активной областью. Она наблюдается в линиях высокоионизованного железа и в тепловом рентгеновском излучении.
2. Типичная длительность генерации ускоренных протонов, определенная из импульсов  $\gamma$ -излучения, не превышает длительности вспышки (около десяти минут).
3. Время прихода фронта потока протонов от западной вспышки определяется скоростью ускоренных частиц и длиной линии магнитного поля, соединяющей вспышку и регистратор на орбите Земли. Фронт потока протонов приходит к орбите Земли через  $\sim 15$  мин после начала западной вспышки.
4. Бесстолкновительный поток протонов вдоль спиральной линии магнитного поля несет информацию о спектре вспышечных протонов, который по данным нейтронных мониторов имеет экспоненциальный вид.
5. Бесстолкновительный поток протонов в межпланетной плазме должен вызывать пучковую неустойчивость, поток становится диффузионным из-за рассеяния на флуктуациях. Скорость распространения протонов вдоль линий магнитного поля уменьшается и формируется запаздывающая компонента протонов.
6. Протоны от восточных вспышек могут достичь Земли, распространяясь с солнечным ветром поперек магнитного поля, однако распространение их фронта опережает поток солнечного ветра. Это может происходить из-за диффузионного распространения протонов поперек линий магнитного поля при рассеянии на флуктуациях поля, вызванных пучковой неустойчивостью. Фронт потока протонов от восточных вспышек никогда не бывает крутым.
7. Типичная длительность потока ускоренных протонов, регистрируемых на орбите Земли, равна времени распространения солнечного ветра от солнечной короны  $t_{sw} = 1 \text{ а.у.}/V_{sw} \sim 3$  суток. Наиболее запаздывающие протоны оказались захваченными магнитным полем солнечного ветра. Они дрейфуют к Земле поперек магнитного поля со скоростью солнечного ветра.

## Литература

- Балабин Ю.В., Вашенюк Е.В., Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 940.
- Дроеге (Droege W.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 37. P. 1073.
- Истомин (Istomin Ya.N.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 408. P. 1307.
- Козарев и др. (Kozarev K.A., Evans R.M., Schwadron N.A., et al.) // *Astrophys. J.* 2013. V. 778. P. 43.
- Крукер и др. (Krucker S., Battaglia M., Cargill P.J., Fletcher L., et al.) // *Astron. Astrophys. Rev.* 2008. V. 16. P. 55.

- Кузнецов В.Г., Курт В.Г., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю., Кудела К. // *Астрон. Вестник*. 2006. Т. 40. С. 120.
- Лин и др. (Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J., Smith D.M., Hudson H.S., et al.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. L69.
- Лившиц М.А., Григорьева И.Ю., Шаховская А.Н. // Сборник тезисов 17-й международной конференции “Физика солнечной плазмы и активность Солнца”. 4-10.09.2016. Крымская астрофизическая обсерватория РАН. С. 55.
- Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. // *Атом. энерг.* 1958. Т. 1. С. 84.
- Маландраки (Malandraki O.) // *Sun and Geosphere*. 2015. V. 10. P. 21.
- Палшин В.Д., Чариков Ю.Е., Аптекар Р.Л. и др. // *Солнечная и солнечно-земная физика*. С.-Петербург. РАН. 2013. С. 195.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012а. Т. 52. С. 150.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012б. Т. 52. С. 162.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Астрон. журн.* 2015а. Т. 59. С. 888.
- Подгорный И.М., Подгорный А.И. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015б. V. 55. P. 1159.
- Подгорный, Подгорный (Podgorny I.M., Podgorny A.I.) // *Sun and Geosphere*. 2016. V. 11. P. 85.
- Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Вашенюк Е.В., Подгорный А.И. // *Астрон. журн.* 2010а. Т. 87. С. 704.
- Подгорный и др. (Podgorny I.M., Balabin Yu.V., Podgorny A.I. and Vashenyuk E.V.) // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 2010б. V. 72. P. 988.
- Римс (Reams D.V.) // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. P. 413.
- Соколов и др. (Sokolov I.V., Roussev I.I., Gombosi T.I., et al.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 616. P. L171.
- Тулупов В.И., Григоренко Е.К., Власова Н.А., Любимов Г.П. // *Космические исследования*. 2012. Т. 50. С. 397.
- Тылка и др. (Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F., et al.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 625. P. 474.
- Хе и др. (He H-Q., Qin G., Zhang M.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 734. P. 74.
- Хюрфорд и др. (Hurford G.R., Schwariz R.A., Krucker S., Lin R.P., Smith D.M., et al.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. L77.