

# Некоторые особенности солнечных протонных событий и длительных гамма- вспышек в 24-м цикле солнечной активности

Г.А.Базилевская<sup>1\*</sup>, Ю.И.Логачев<sup>2</sup>, Е.И.Дайбог<sup>2</sup>, Н.А.Власова<sup>2</sup>,  
Е.А.Гинзбург<sup>3</sup>, В.Н.Ишков<sup>4,5</sup>, Л.Л.Лазутин<sup>2</sup>, М.Д.Нгуен<sup>2</sup>,  
Г.М.Сурова<sup>2</sup>, О.С.Яковчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИАН, <sup>2</sup>НИИЯФ, <sup>3</sup>ИПГ, <sup>4</sup>ИЗМИРАН, <sup>5</sup>ГЦ РАН

## **ДЛЯ ЧЕГО НУЖНЫ КАТАЛОГИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ**

Солнечные космические лучи (СКЛ) связаны с процессами на Солнце, в межпланетной среде, в земной атмосфере. В каждой из этих сред на частицы действуют разнообразные условия, которые накладывают отпечаток на наблюдаемые характеристики СКЛ. Поэтому события СКЛ отличаются разнообразием свойств. Наша задача – связать эти свойства с конкретными процессами ускорения и распространения частиц. Это фундаментальная задача. Кроме того, СКЛ влияют на космическую и даже земную погоду, поэтому понимание физики СКЛ – важная прикладная задача.

**Продвинуться в понимании связей между наблюдаемыми свойствами СКЛ и лежащими в их основе процессами можно только на основе изучения большого количества событий СКЛ, которые собираются в Каталоги. Первый Каталог под редакцией Z. Svestka & P.Simon охватывал события 1955-1969 гг. и был опубликован в 1975 г. и продолжен серией Каталогов под редакцией Ю.И. Логачева.**

## **КАТАЛОГ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ 24-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ является продолжением каталогов**

1. Каталог солнечных протонных событий. **1970 – 1979** гг. Ред. Ю.И. Логачев. М.: ИЗМИРАН, 184 с. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>. 1982.
2. Солнечные протонные события. Каталог, **1980 – 1986** гг. Ред. Ю.И. Логачев. М.: МГК АН СССР, 160 с. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>. 1990.
3. Каталог солнечных протонных событий. **1987 – 1997** гг. Ред. Ю.И. Логачев. М.: МГУ, 246 с. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>. 1998.
4. Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996 – 2008 гг.). М. Ред. Ю.И. Логачев [http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog\\_SPS\\_23\\_cikla\\_SA.pdf](http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog_SPS_23_cikla_SA.pdf)

В настоящее время подготовлен

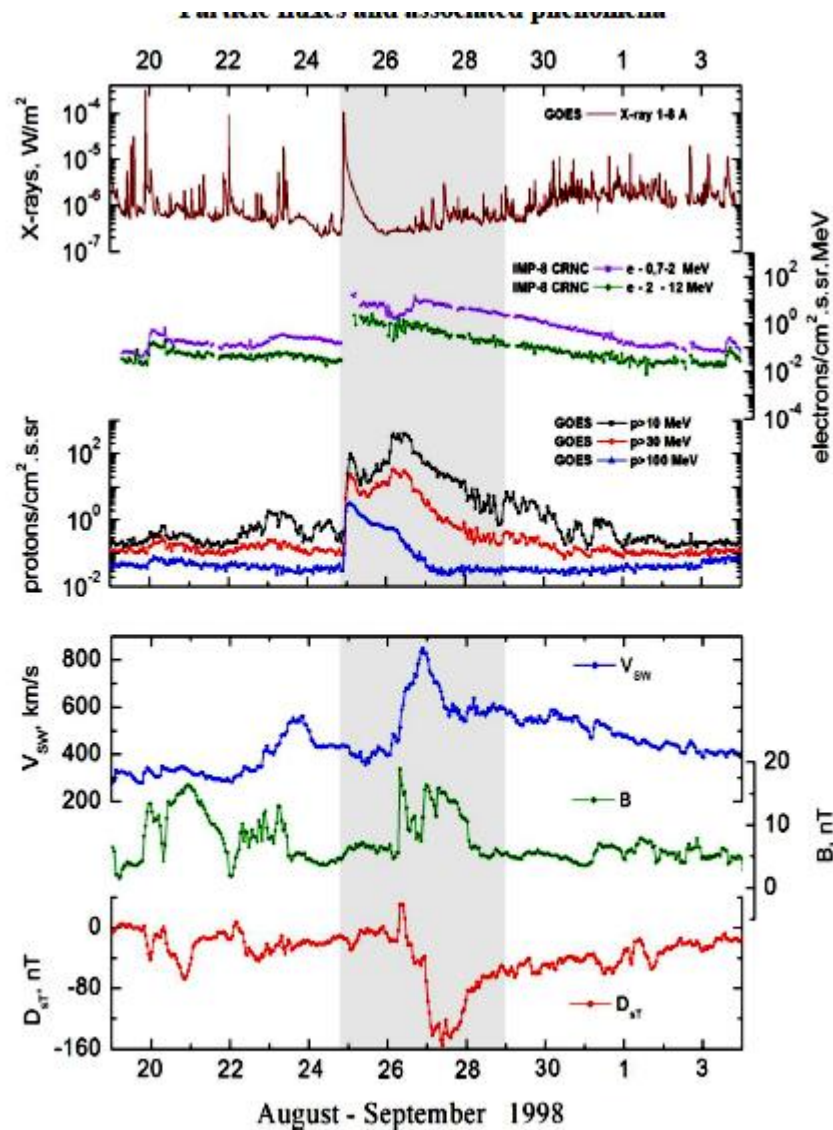
**Список солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности (2009 – 2019)**

doi: <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-007> [http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_proton\\_events.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_proton_events.ru.html)

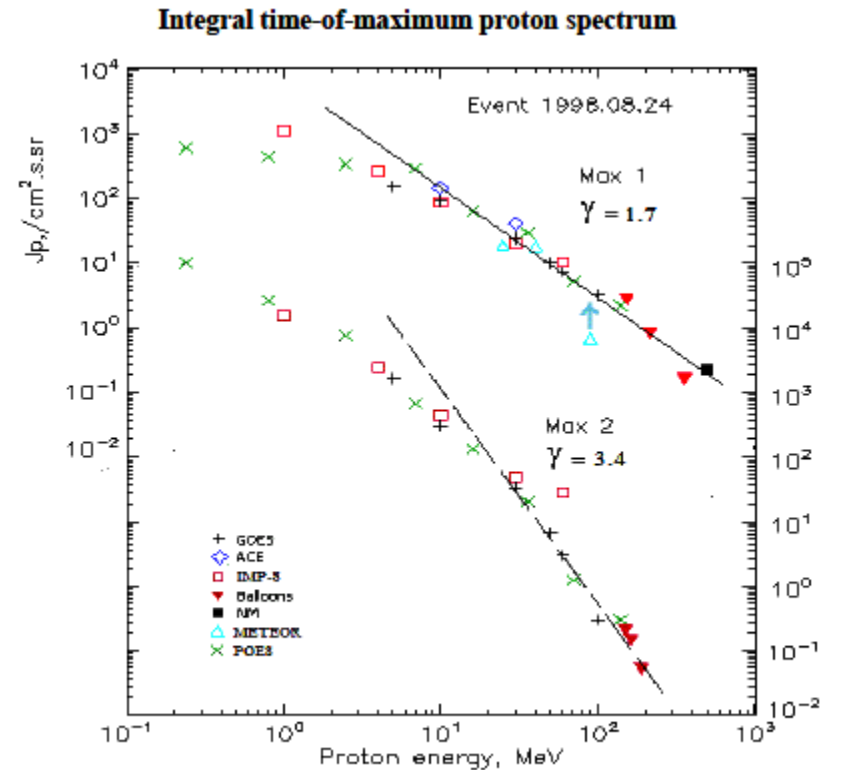
**Суммарно в Каталоги под редакцией Ю.И. Логачева входит более 550 солнечных протонных событий (1970-2017 гг.)**

## Содержание Каталогов

- Включены солнечные события с потоком протонов с энергией выше 10 МэВ в максимуме временного профиля,  $J_{10} \geq 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$  (p.f.u.), по измерениям на спутниках METEOR, GOES, ACE, SOHO, POES, CORONAS-F, PAMELA и др., а также по измерениям на баллонах и нейтронных мониторах.
- Показан временной ход потоков протонов, рентгеновских вспышек, скорости солнечного ветра, индукции межпланетного магнитного поля, Dst-индекса до начала и во время события СКЛ.
- Построены энергетические спектры потоков протонов в максимуме временного профиля события.
- Указаны источники ускоренных частиц – вспышки и корональные выбросы вещества (ВКВ, СМЕ), а также внезапные начала магнитных бурь (SC), знаменующие приход ударных волн. Дана информация о солнечном радиоизлучении.



Временной профиль мягкого рентгена, потоков электронов и протонов, скорости солнечного ветра, индукции ММП и Dst индекса



Интегральный энергетический спектр в максимуме временного профиля события **8 августа 1998 г.** по данным GOES, ACE, IMP-8, METEOR, POES, баллонов и нейтронного монитора

## Event 2006.12.14 – (2006-348) № 476

**Particle event:** To( $E_p > 10 \text{ MeV}$ ) – 14d23 h

Tmax( $E_p > 10 \text{ MeV}$ ) – 15d00 h , Jmax ( $E_p > 10 \text{ MeV}$ ) –  
160 /cm<sup>2</sup> .s.sr

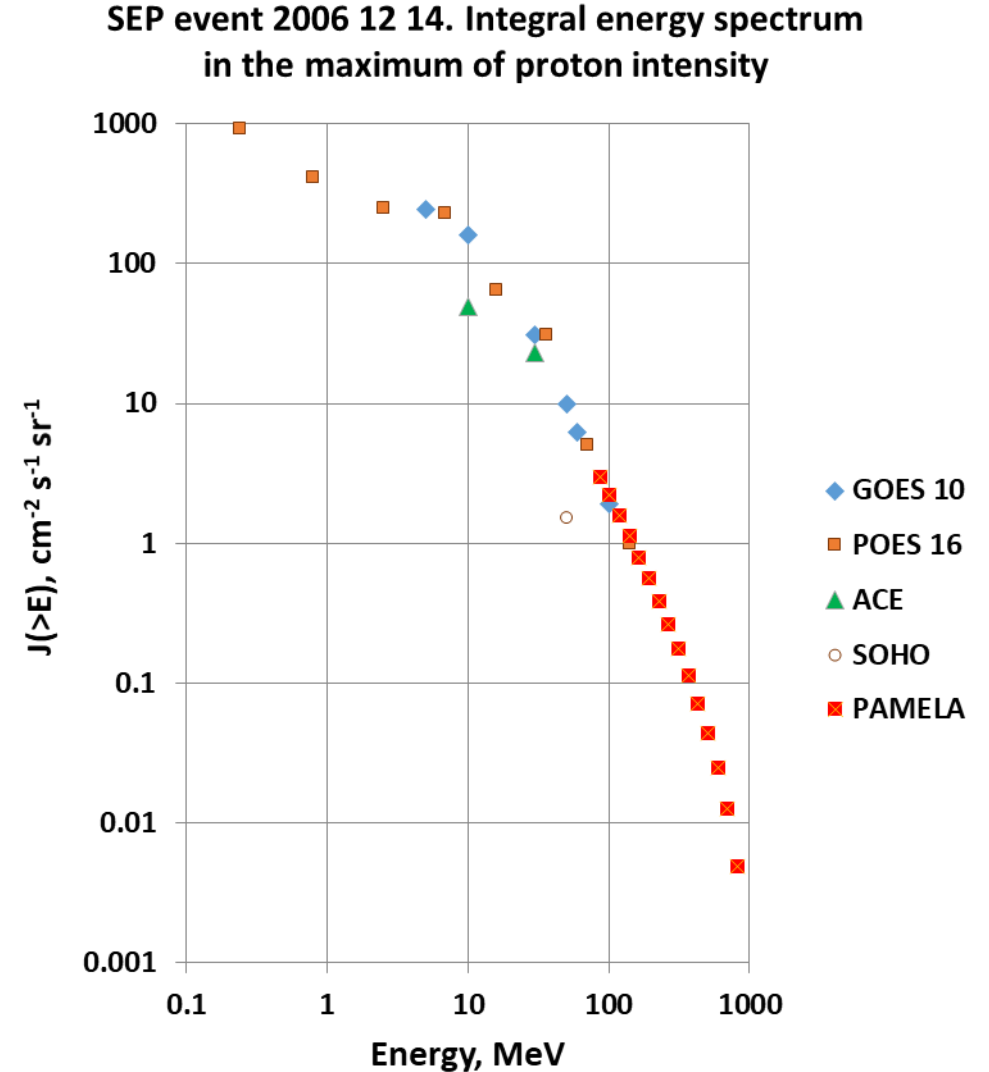
Duration of the event – 3 days ( $E_p > 10 \text{ MeV}$ )

Quasimaximal energy of protons in the event –  
 $E_{qm} \geq 500 \text{ MeV}$

**Solar sources:** ● solar flare 14d21 h 07 m ,  
X1.5/2B, S06W46, AR10930

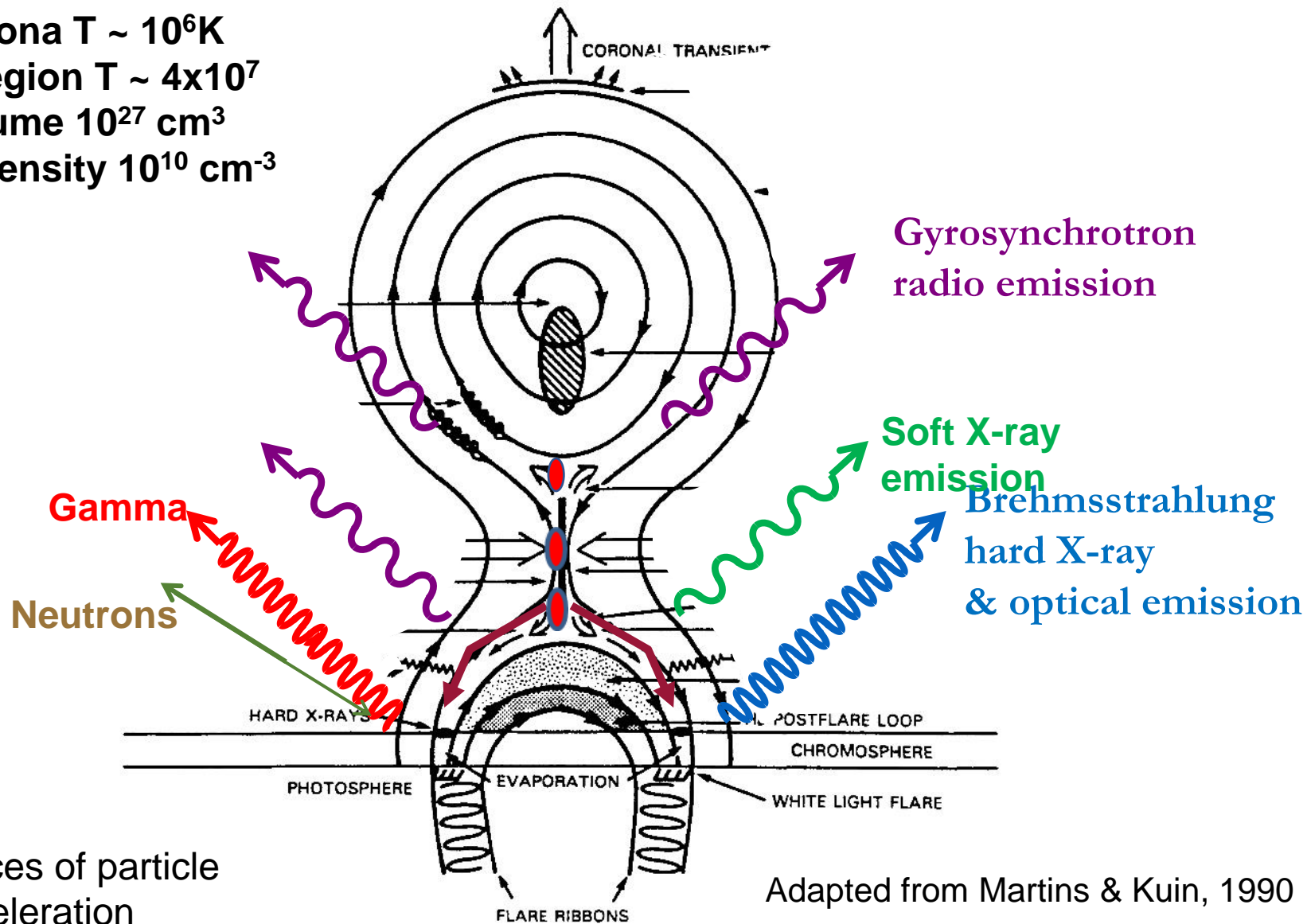
Main X-ray burst 1-8 Å: onset – 14d21 h 07 m ,  
max – 14d22 h 15 m ,  $\Phi = 0.12 \text{ J/m}^2$


CME: 14d22 h 30 m ,  $V = 1042 \text{ km/s}$ ,  $\Delta\phi = 360^\circ$  ,  
 $dA = 248^\circ$ ; ▲ SC 16d17 h 55 m



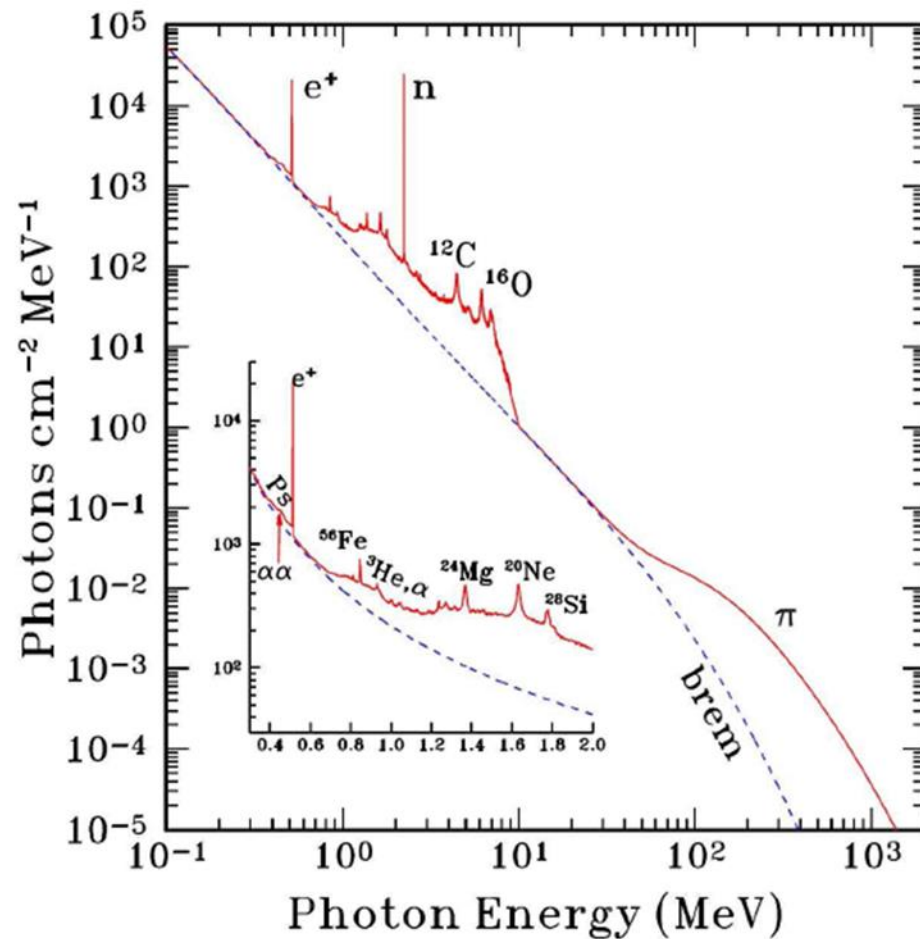
# Модель солнечной вспышки (не показаны ускоренные протоны и электроны)

Solar corona  $T \sim 10^6 K$   
 Flaring region  $T \sim 4 \times 10^7$   
 Flare volume  $10^{27} \text{ cm}^3$   
 Plasma density  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$



 Places of particle acceleration

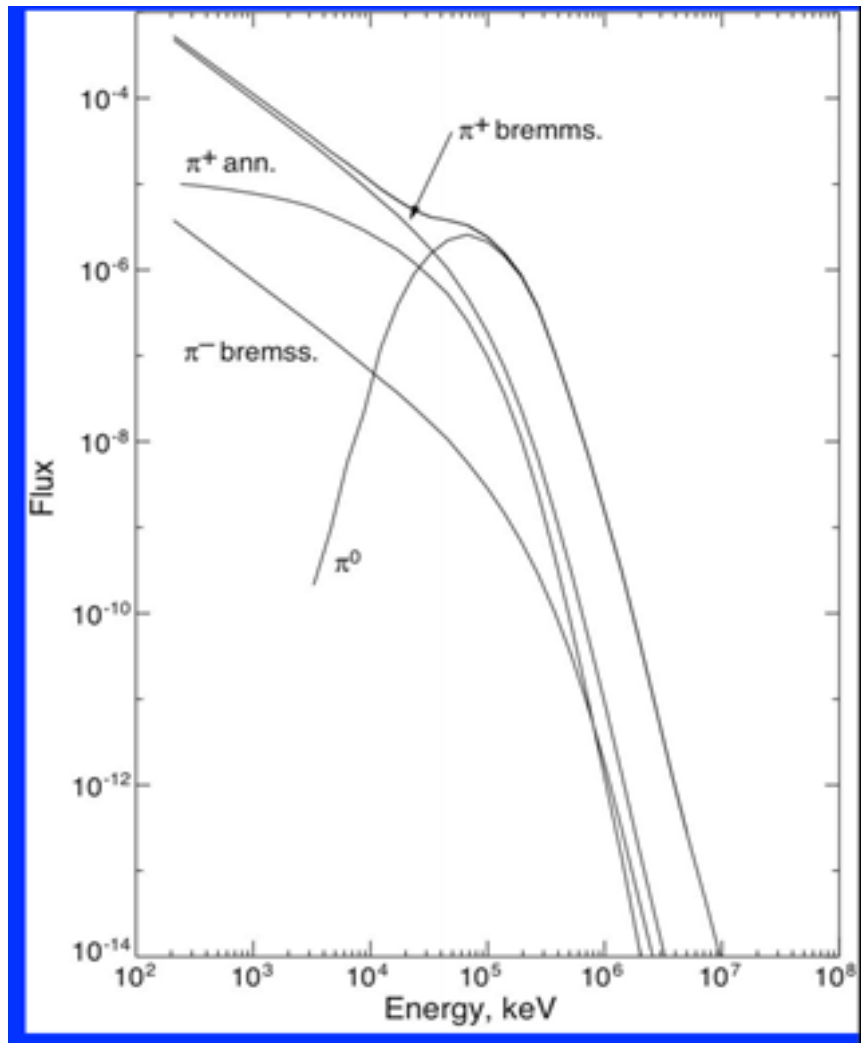
Adapted from Martins & Kuin, 1990



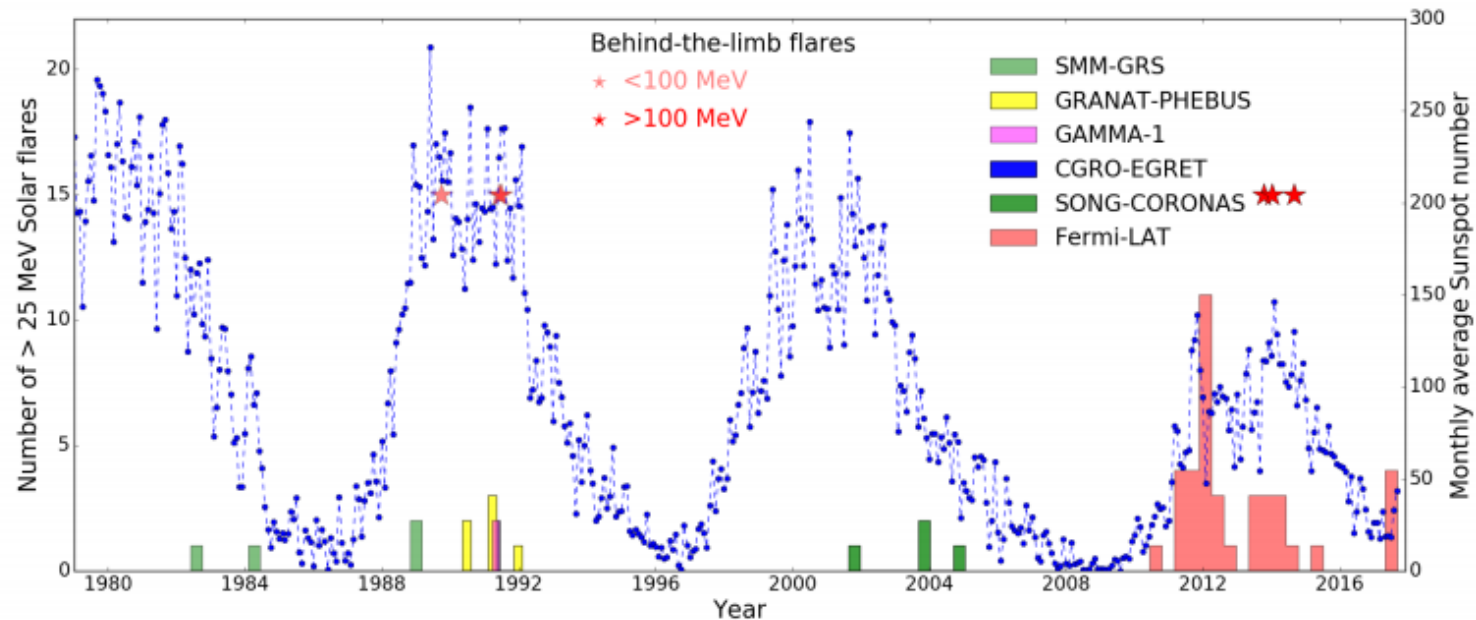
Гамма-излучение в солнечных вспышках образуется при взаимодействии высокоэнергичных частиц с окружающей плазмой в следующих процессах: тормозное излучение высокоэнергичных электронов (10 кэВ – 100 МэВ), в ядерных реакциях (~ 0.5 – 8 МэВ) и при распаде пионов (>10 МэВ)

Sako, 2007





Расчетный спектр гамма-излучения от взаимодействия (P, H),  $E \geq 300$  МэВ ( $\alpha$ , H),  $E \geq 200$  МэВ (Murphy & Ramaty, 1987). При энергиях выше 100 МэВ доминируют гамма-кванты от распада нейтральных пионов.



**Figure 2:** Number of solar flares with observed emission  $>25$  MeV (left axis) together with the monthly averaged sunspot numbers (right axis) from 1980 to present. The light red stars represent the behind-the-limb solar flares detected with emission  $<100$  MeV and the dark stars represent the behind-the-limb solar flares detected with emission  $>100$  MeV. [Pesce-Rollins et al, 2017]

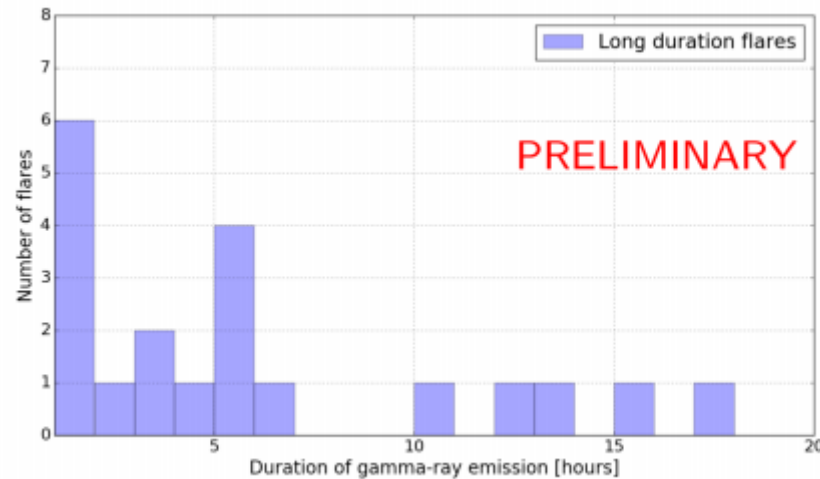
- Forrest, D.J., Vestrand, W.T., Chupp, E.L., Rieger, E., Cooper, J.F., Share, G.H.: 1985, Neutral pion production in solar flares. In:19th International Cosmic Ray Conf.4, 146. ADS.
- Akimov, V.V., Afanassyev, V.G., Belaousov, A.S., Blokhintsev, I.D., Kalinkin, L.F., Leikov, N.G., et al.:1991, Observation of High Energy Gamma-rays from the Sun with the GAMMA-1 Telescope( $E >30$  MeV).Proc ICRC 22.3, 73.
- Kurt Victoria G., Yushkov B. Yu., Kudela K. Galkin V.I. 2009. High-energy gamma-ray emission of solar flares as an indicator of acceleration of high-energy protons. Proc. 31 ICRC

Наблюдения на Fermi подтвердили результаты ГАММА-1 и CGRO (события 1991 г.) о существовании длительных вспышек гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ и показали, что такие события происходят гораздо чаще, чем предполагалось раньше.

В настоящее время зарегистрировано около 40 событий с  $E > 25$  МэВ (2011-2017 гг.).

Названия явления:

- Gamma-ray events temporally **extended beyond the impulsive phase of solar flares** → Long Duration Gamma-Ray Flares (LDGRF)
- Sustained gamma-ray emission (SGRE)

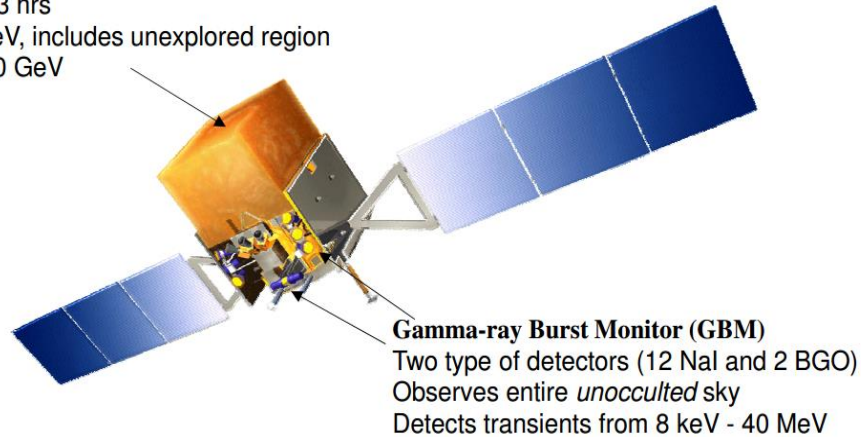


В этой работе называем это явление  
**СОЛНЕЧНЫЕ ГАММА-ВСПЫШКИ**

Распределение гамма-вспышек по длительности.  
Pesce-Rollins\_2017.

### Large Area Telescope (LAT)

Observes 20% of the sky at any instant, views entire sky every 3 hrs  
20 MeV - 300 GeV, includes unexplored region between 10 - 100 GeV

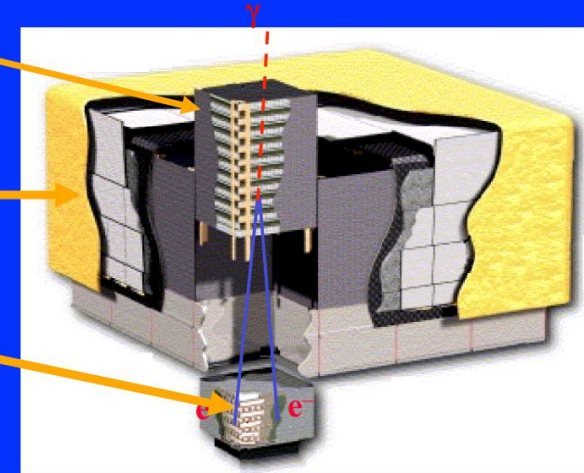


**Gamma-ray Burst Monitor (GBM)**  
Two type of detectors (12 NaI and 2 BGO)  
Observes entire *unocculted* sky  
Detects transients from 8 keV - 40 MeV

**Precision Si-strip Tracker**

**Segmented Anticoincidence Detector**

**CsI Calorimeter**



Запущен в июне 2008 г. Орбита: 550 км,  
28.5 град., 96 мин.

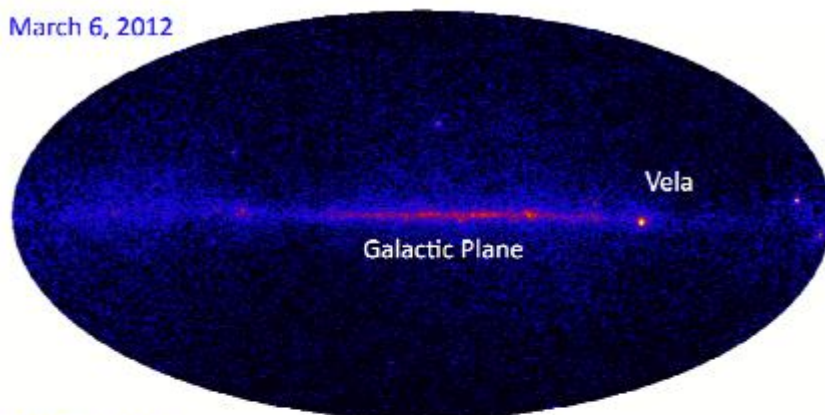
From G. Share, GSFC, Jan. 5, 2017

LAT – широкоугольный телескоп, регистрирующий гамма-излучение с энергией от 20 МэВ до более 300 ГэВ (Atwood et al. 2009). Инструмент состоит из высокоточного трекера с силиконовыми детекторами, расположенного над калориметром из CsI. Антисовпадательный пластиковый детектор обеспечивает защиту от заряженных частиц с эффективностью 0.9997. Каждые 3 часа LAT наблюдает Солнце непрерывно в течение 20-40 мин. Солнце в это время находится под углом не более 60 град. по отношению к оси прибора.

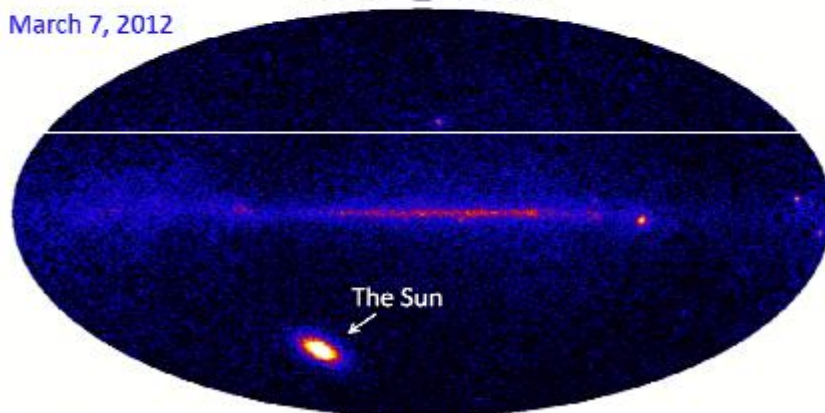
Fermi LAT Событие 7 марта 2016. Из презентации F. Longo  
Fermi Solar Workshop 2012

---

March 6, 2012



March 7, 2012



LAT 1 day all sky data >100 MeV

Излучение от вспышки в диапазоне >100 МэВ до ~4 ГэВ  
длилось ~ 20 часов:

- В 1000 раз выше, чем от спокойного Солнца;
- В 100 раз выше, чем от Vela;
- В 50 раз выше Краба

Из презентации F. Longo  
Fermi Solar Workshop 2012

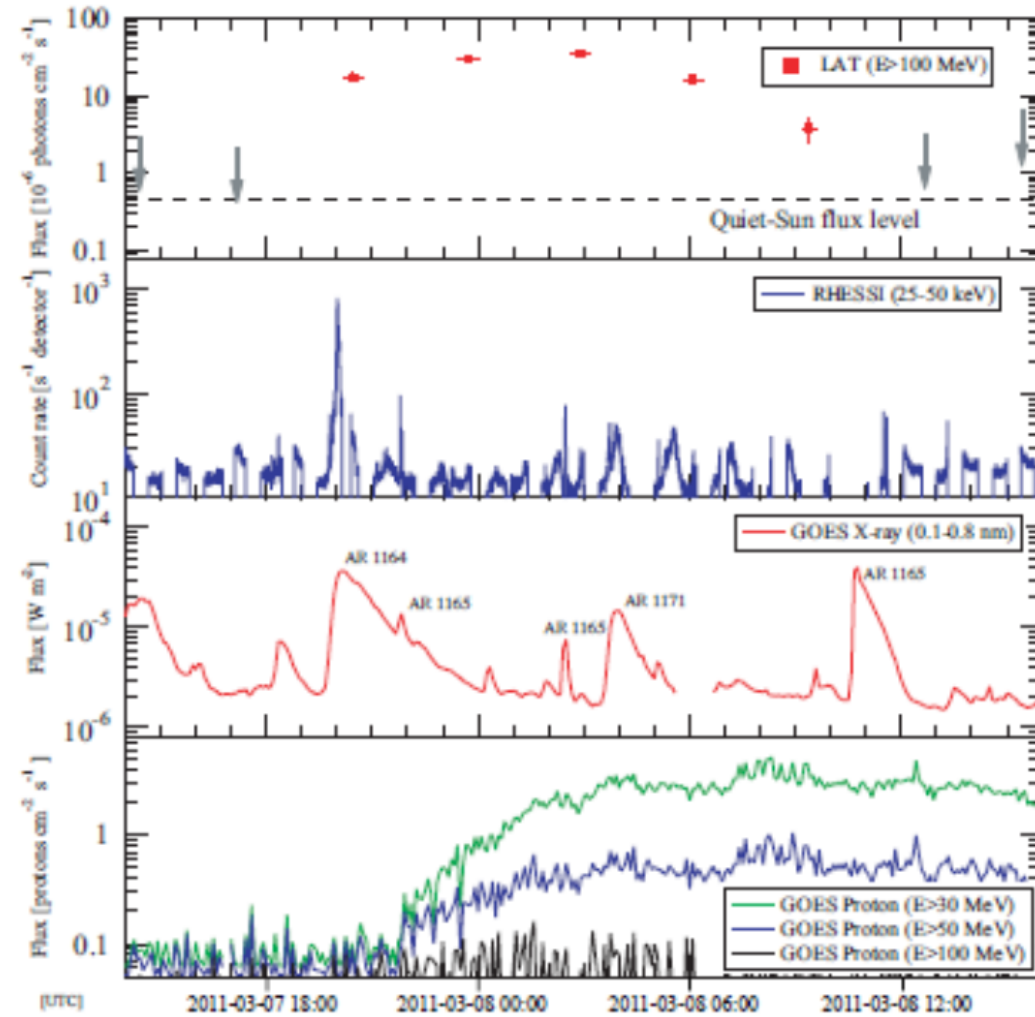
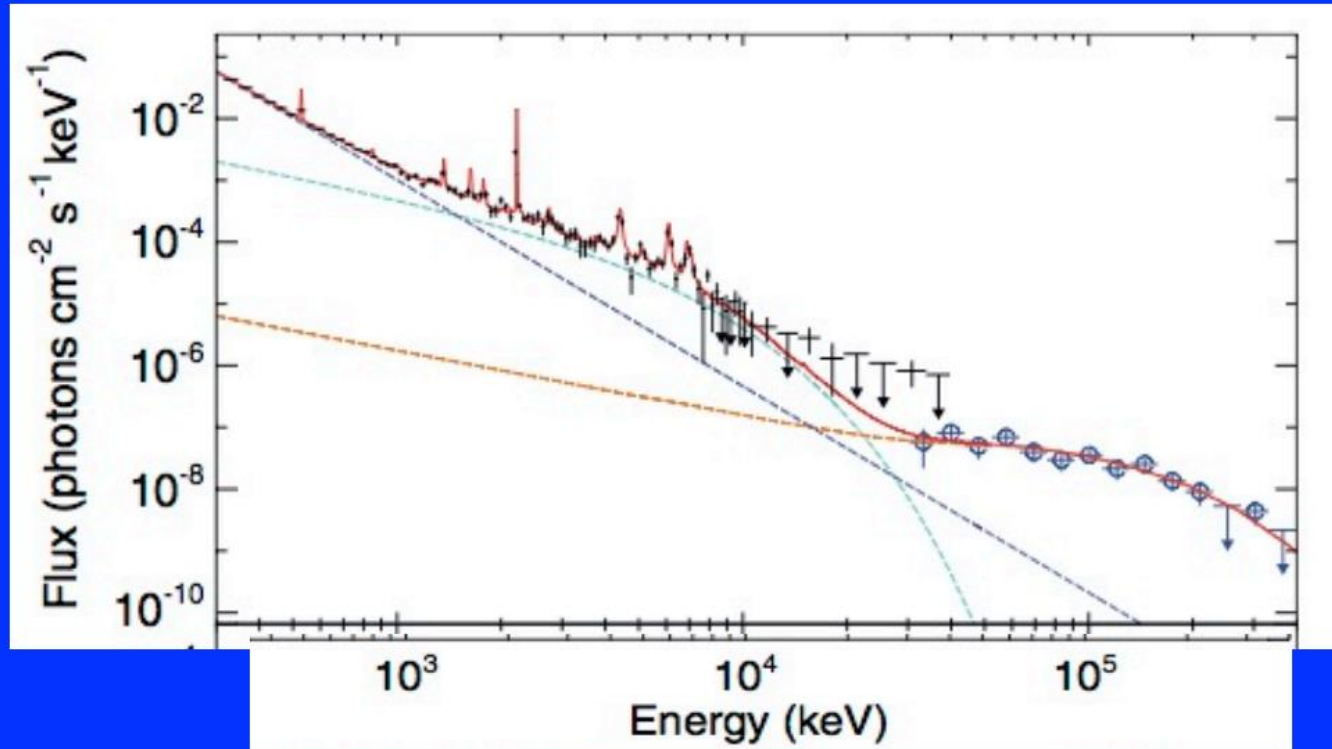


FIG. 1.— Multi-wavelength and proton light curves of GOES M3.7 SOL2011-03-07T20:12. Gamma-ray data are from the *Fermi*-LAT, HXRbs from RHESSI, soft X-rays and protons from GOES. Vertical error bars of LAT data indicate 1 $\sigma$  statistical uncertainties, and gray arrows are 90% upper limits. The horizontal bar for each flux point represents the true duration over which the flux was computed (see Table 1) the Sun below out of the FOV at other times.

Ackermann et al., 2014



## Gamma-ray Spectrum of an Impulsive Flare



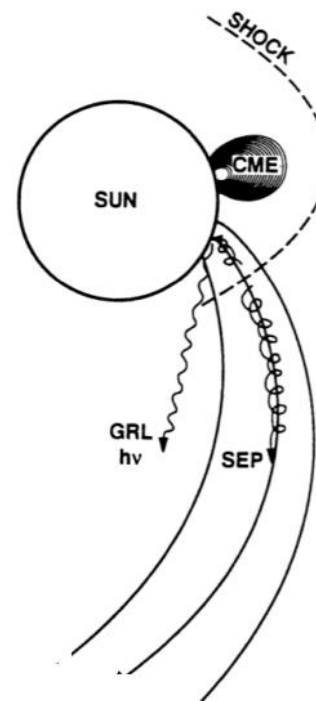
Composite GBM/LAT spectrum of the impulsive phase of the 2010 June 12 flare (Ackermann et al. 2012). The flare proton spectrum is consistent with a series of power laws with indices  $\sim 3.2$  from 3-50 MeV,  $\sim 4.3$  from 50-300 MeV, and softer than 4.5  $>300$  MeV. No time-extended second stage was observed.

From G. Share, GSFC, Jan. 5, 2017

## Сценарии

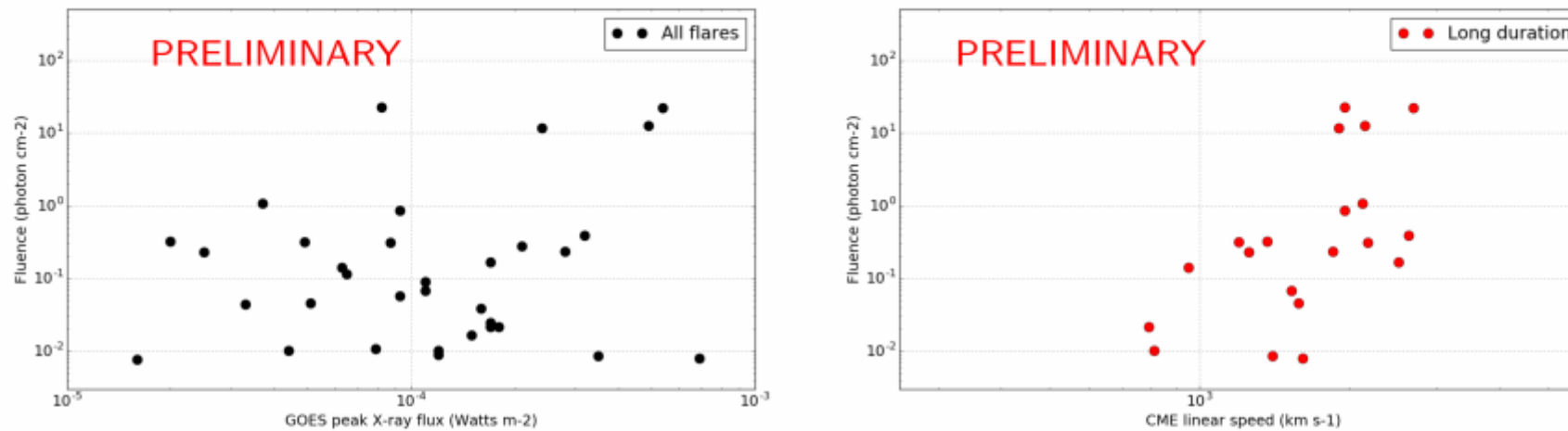


Стохастическое ускорение  
на МГД турбулентности  
внутри вспышечных петель



Высыпание на Солнце протонов,  
ускоренных ударной волной  
коронального выброса вещества  
(КВВ).



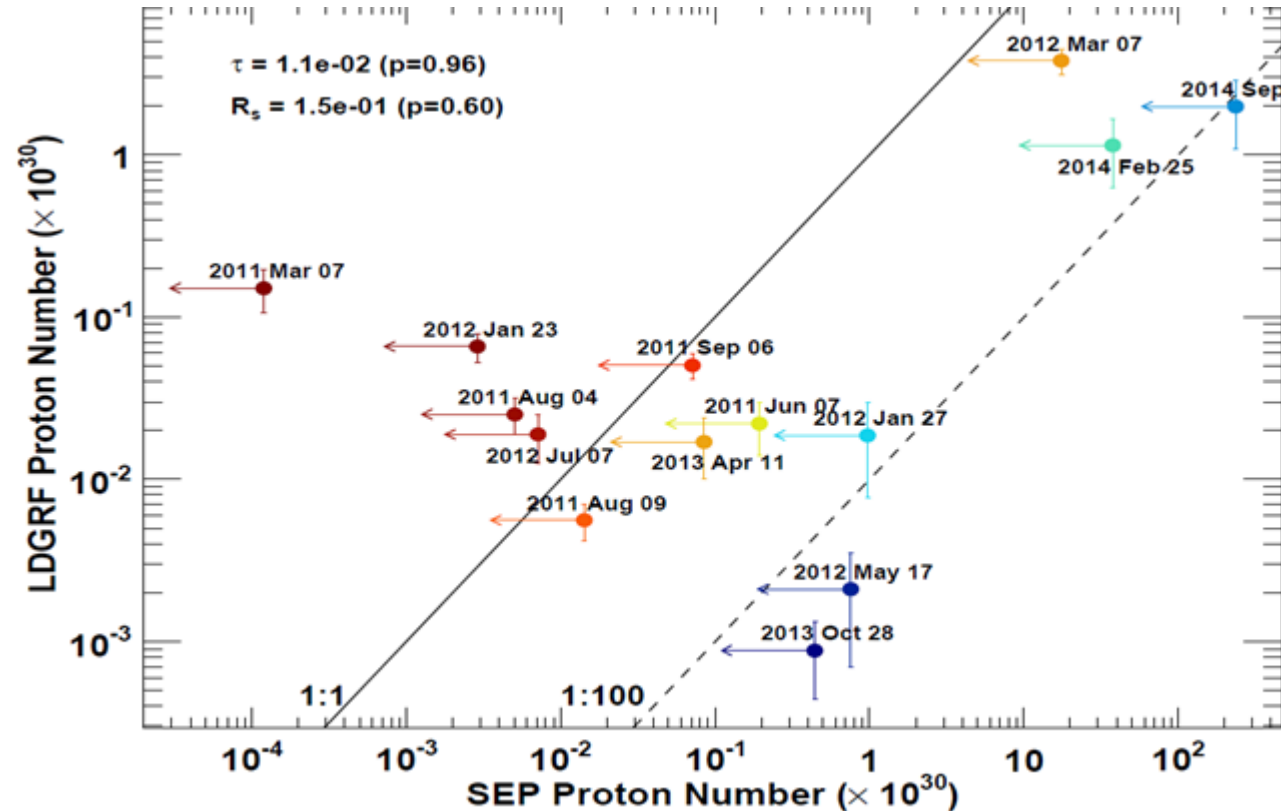


**Figure 4:** Correlation between the  $>100$  MeV fluence of the *Fermi*-LAT detected flares versus the GOES peak X-ray flux (left panel) and the correlation between  $>100$  MeV fluence versus the Coronal Mass Ejection (CME) linear speed (right panel). A Pearson's correlation of 0.24 is found for data sample in the left panel and 0.60 for the sample in the right panel.

Pesce-Rollins et al, 2017]

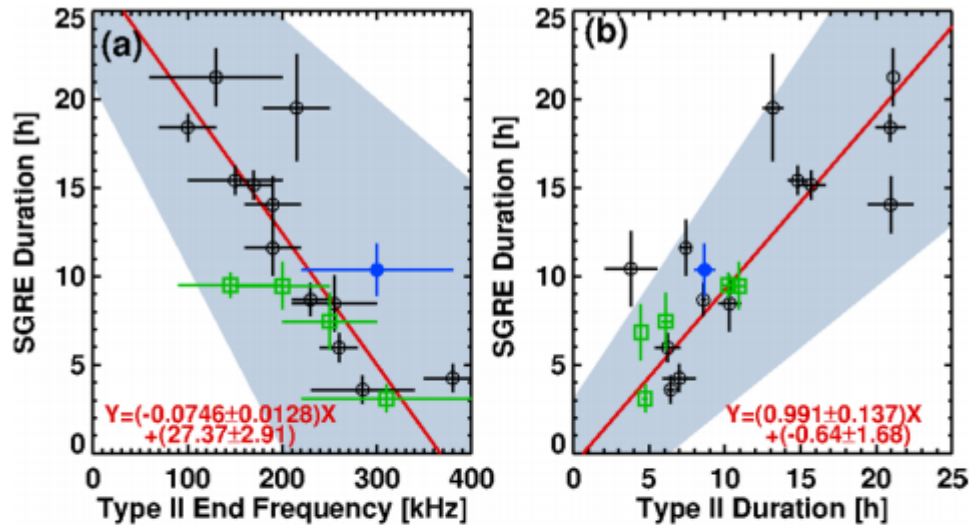
Флюенс  $>100$  МэВ гамма-излучения плохо коррелирует с рентгеновским излучением вспышки (CC=0.24) и коррелирует со скоростью CME (CC=0.6).

# Lack of Correlation between # protons in SEP events and inferred from SGRE De Nolfo et al., 2019



Солнечные протоны, зарегистрированные PAMELA & STEREO A/B, ( $> \sim 100$  МэВ) и протоны, генерировавшие гамма-излучение, имеют разные источники

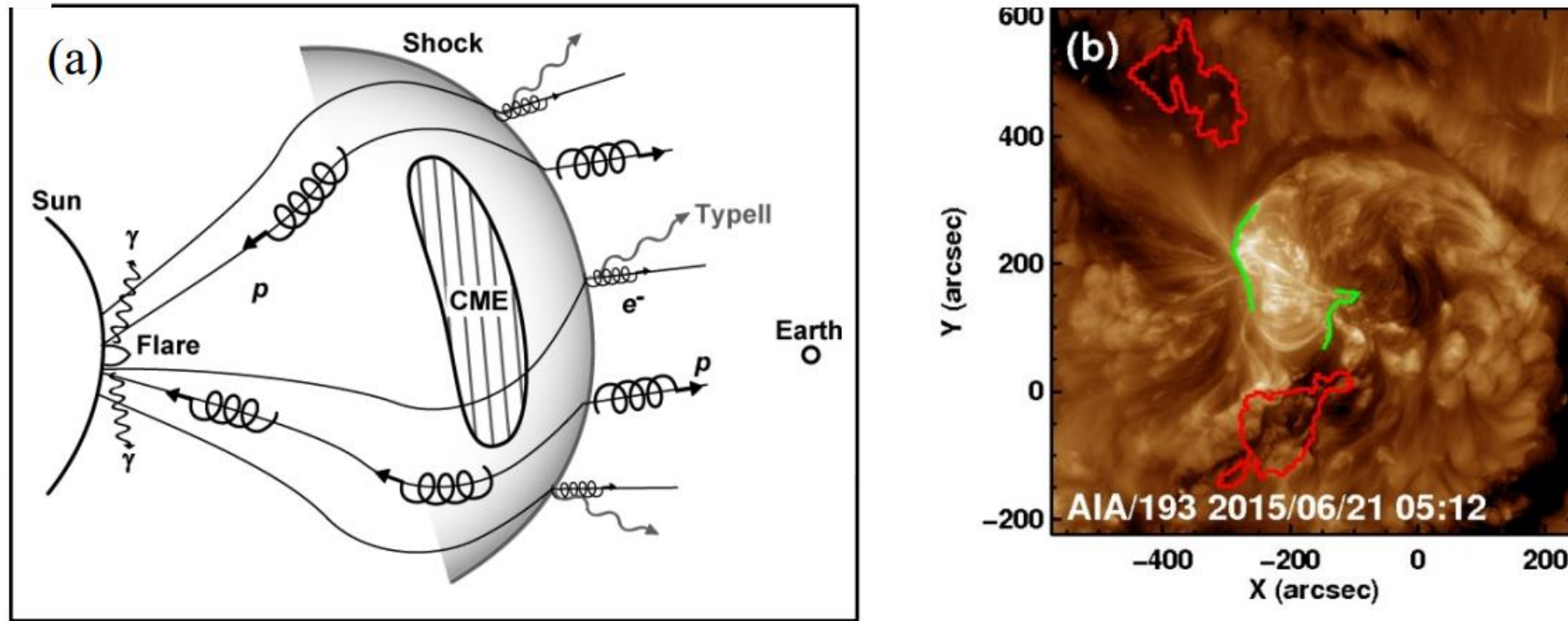
Gopalswamy, 2018



**Figure 3.** SGRE durations plotted against the type-II ending frequency (a) and type II duration (b) for 13 events with duration exceeding ~5 hours extracted from [5], but the durations were determined using the criteria mentioned in the previous section. The red lines are the best-fit lines obtained using the Orthogonal Distance Regression method. The equations of the best-fit lines are shown on the plots. The shaded area represents 95% confidence interval of the fit. The blue (1991 June 11 EGRET event) and green (events in Table 1) points are excluded in the fit.

The close relationship between SGRE and type II burst durations provides the strongest evidence that the same shock is responsible for accelerating the underlying particles (electrons for type II bursts and protons for SGRE)

**All the well-connected events were associated with large SEP events and intense >100 MeV proton events.**



**Figure 4.** (a) Schematic model showing the propagation of protons ( $p$ ) and electrons ( $e^-$ ) from the CME-driven shock toward and away from the Sun. Low-energy electrons ( $\sim 10$  keV) produce type II bursts in the vicinity of the shock. Energetic protons and electrons can be observed as SEP events when the observer is connected to the field line on which these particles propagate. A representative flare loop is shown at the Sun. (b) Two types of magnetic structures during the eruption associated with the 2015 June 21 SGRE event: the post eruption arcade (feet marked in green) and the CME flux rope (feet marked by the red contours). The feet of the flux rope correspond to the core dimmings in the 193 Å EUV image obtained by SDO's Atmospheric Imaging Assembly (AIA).

## **Вопросы, поставленные в данной работе:**

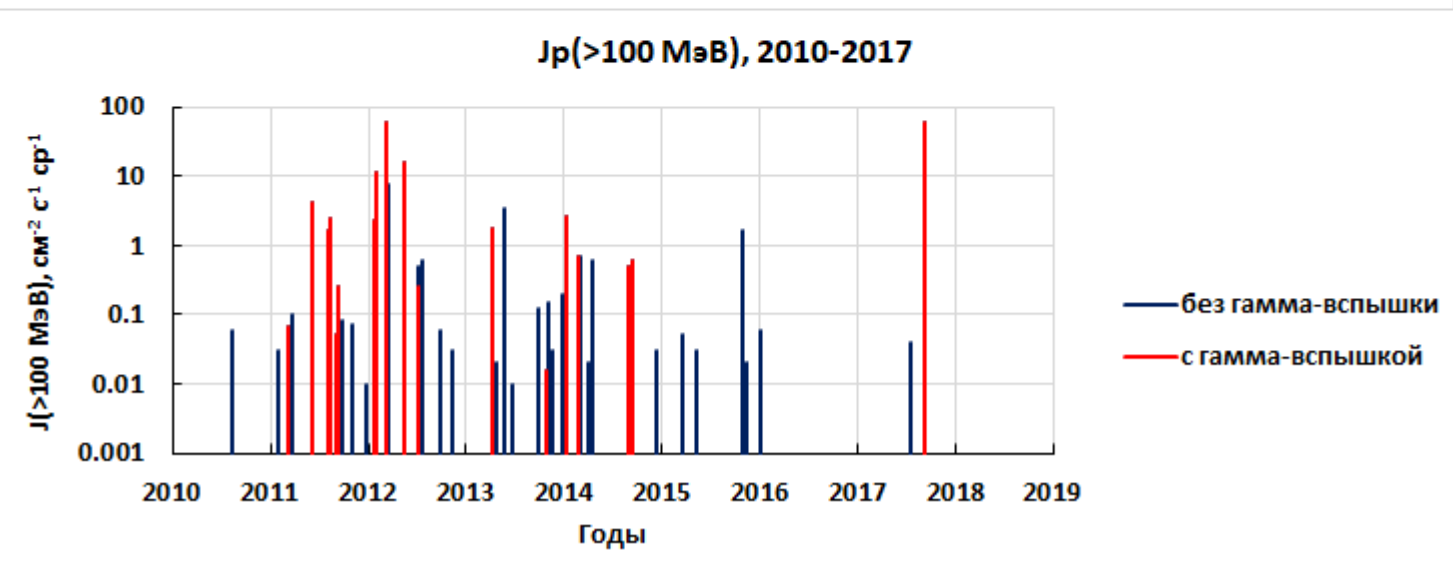
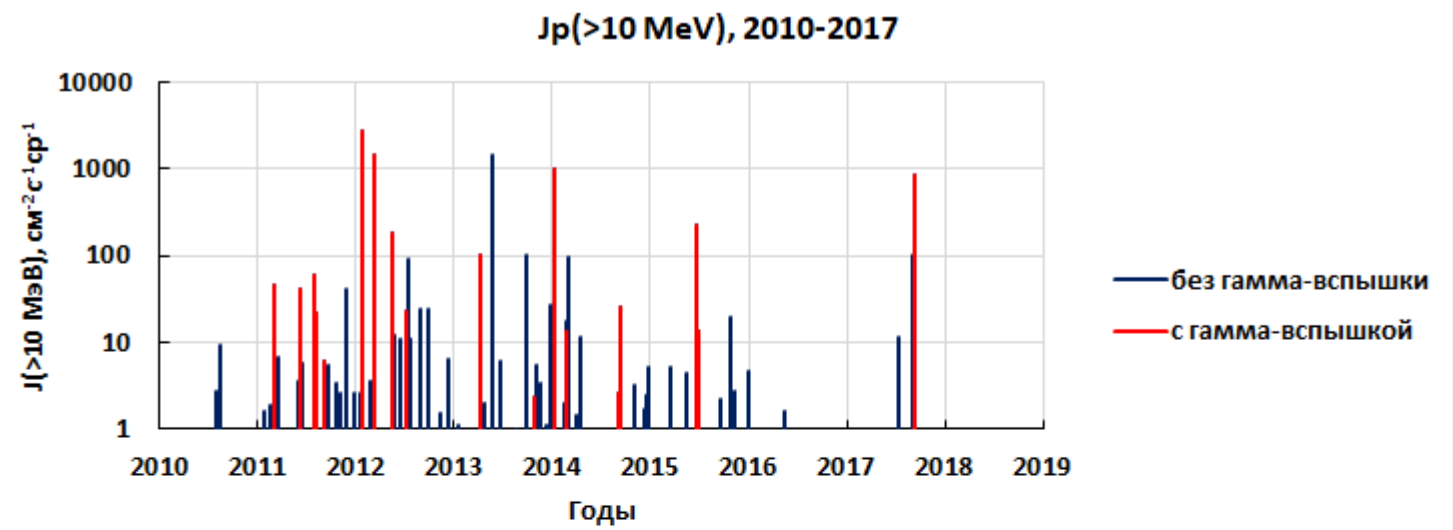
- Чем отличаются солнечные протонные события, сопровождаемые и не сопровождаемые гамма-вспышками?
- Чем отличаются гамма-вспышки, сопровождаемые и не сопровождаемые солнечными протонными событиями?

## Список солнечных гамма-вспышек был получен с использованием работ:

- N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Yashiro, et al., 2019. On the Shock Source of Sustained Gamma-Ray Emission from the Sun. Journal of Physics: Conference Series 1332 (2019) 012004. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1332/1/012004
- G. A. de Nolfo, A. Bruno, J. M. Ryan, et al, 2019. Comparing Long-duration Gamma-Ray Flares and High-energy Solar Energetic Particles. The Astrophysical Journal,879:90(17pp), 2019 July 10 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab258f>
- G. H. Share, R. J. Murphy, S. M. White, et al. Characteristics of Late-phase >100MeV Gamma-Ray Emission in Solar Eruptive Events. 2018. The Astrophysical Journal,869:182(55pp), 2018 December 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaebf7>
- L.M. Winter, V. Bernstein, N. Omodei, M. Pesce-Rollins, A Statistical Study To Determine The Origin Of Long-duration Gamma-ray Flares. 2018. The Astrophysical Journal, Volume 864, Issue 1, article id. 39, 12 pp. DOI:[10.3847/1538-4357/aad3c0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad3c0)



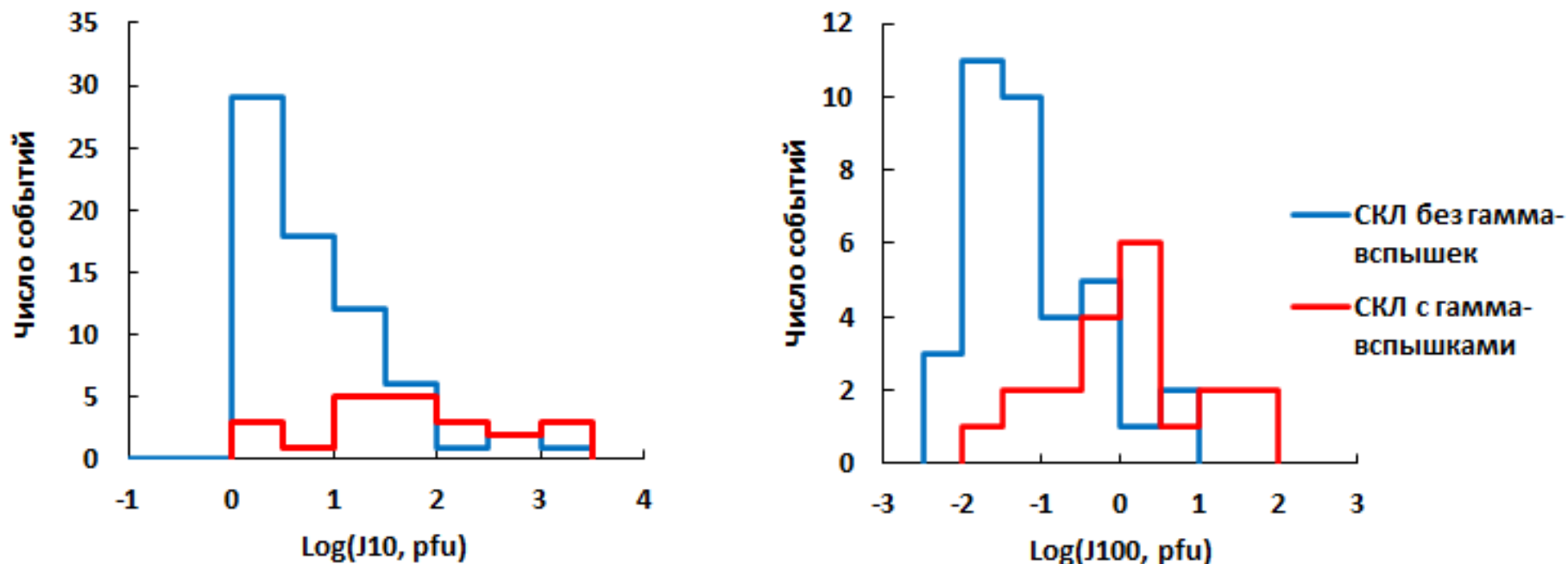
Тип события	Всего	Число совпадений СКЛ и гамма	Число совпадений, %
Все события СКЛ с $E > 10$ МэВ (J10)	93	23	25
Из них с протонами с $E > 100$ МэВ (J100)	56	20	36
Солнечные гамма-вспышки	37	23	62



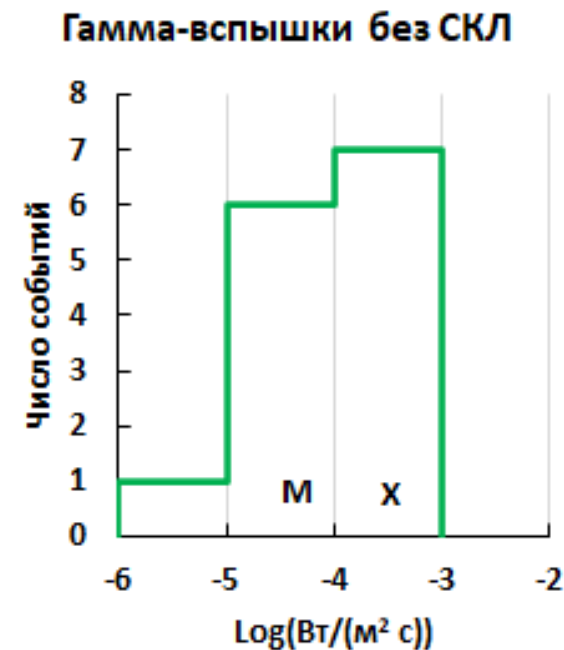
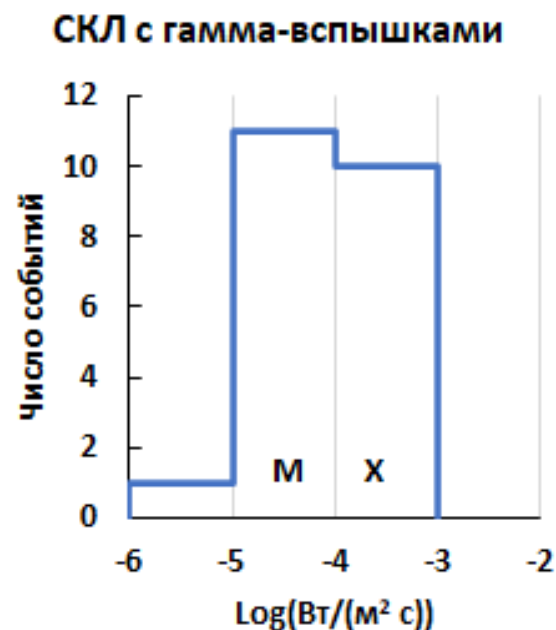
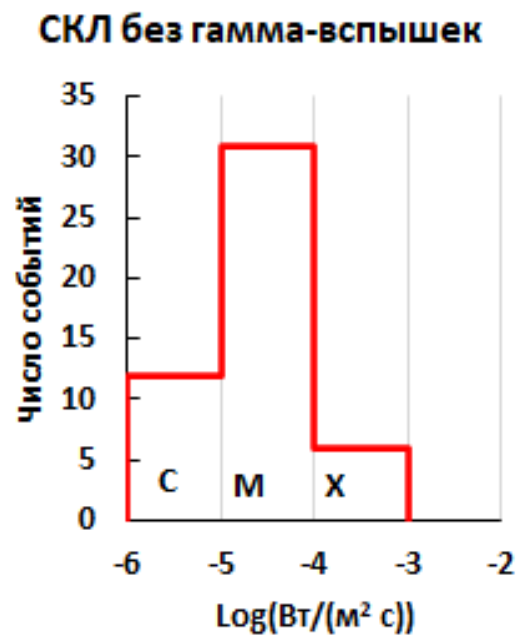
## Распределение по времени солнечных протонных событий 24-го солнечного цикла



## Распределения потоков солнечных протонов в максимуме события



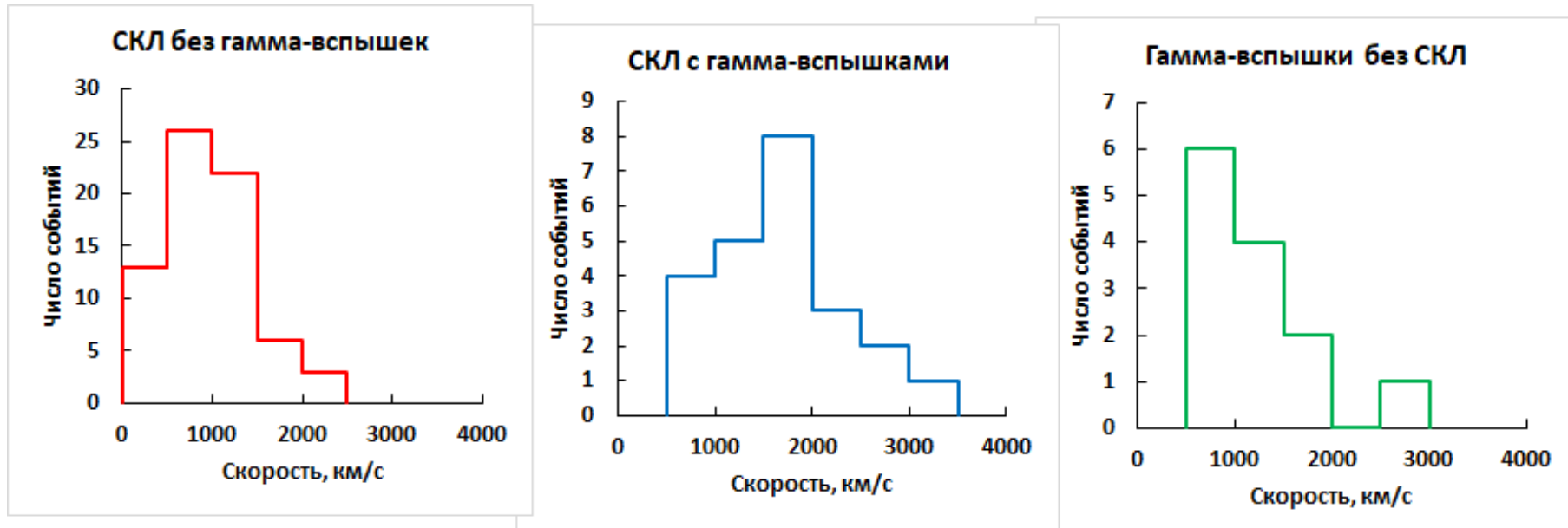
Солнечные протонные события, в которых наблюдались протоны с  $E > 100$  МэВ, но их потоки  $J(>100 \text{ МэВ}) < 0.1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ , с малой вероятностью сопровождаются гамма-вспышками. Гамма-вспышки в основном сопровождают события с потоком  $J(>100 \text{ МэВ}) > 0.3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ .



СКЛ без гамма-вспышек происходят от менее мощных вспышек (M балл) на Солнце. Гамма-вспышки, как сопровождающие, так и не сопровождающие СКЛ, связаны с вспышками на Солнце баллов M и X, причем их распределения очень близки.

**Т.е. гамма-вспышки без СКЛ НЕ связаны с менее мощными вспышками на Солнце.**

Информация о рентгеновских вспышках: flares: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>



События СКЛ без гамма-вспышек связаны с КВВ, имеющими меньшую скорость. Гамма-вспышки с СКЛ имеют более широкое распределение СМЕ по скоростям. Все гамма-вспышки сопровождаются КВВ с высокой скоростью и большинство из них типа гало.

Информация о корональных выбросах вещества: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)

# Почему важно долготное распределение родительских вспышек

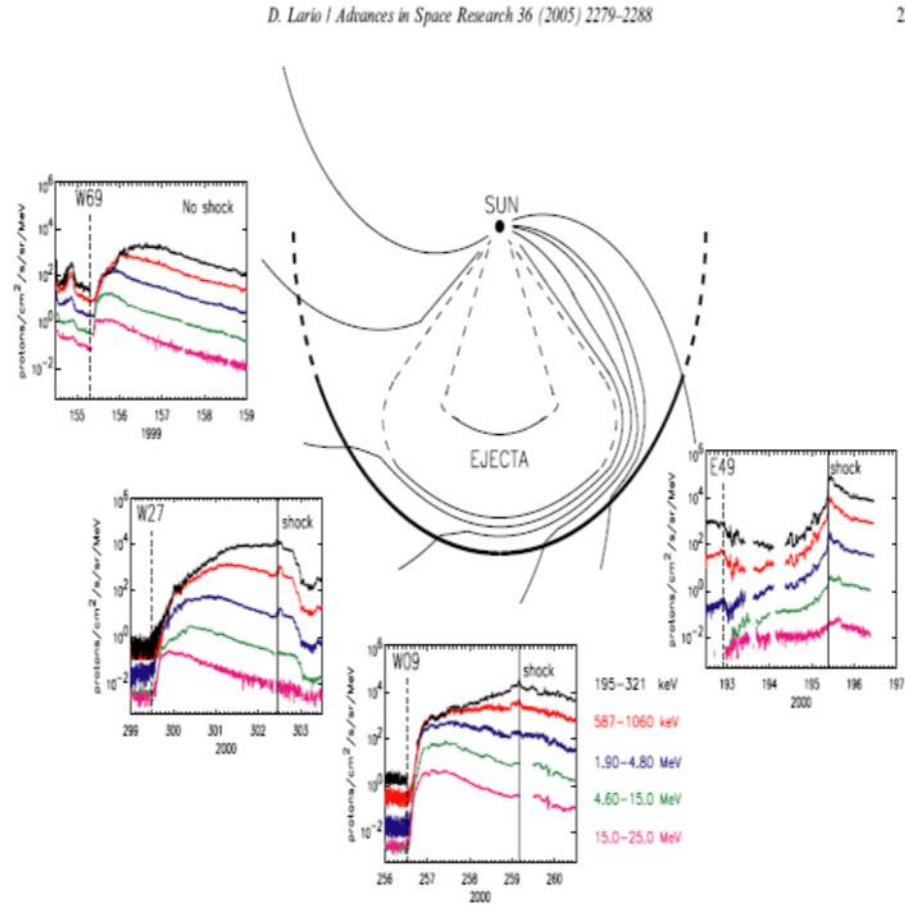
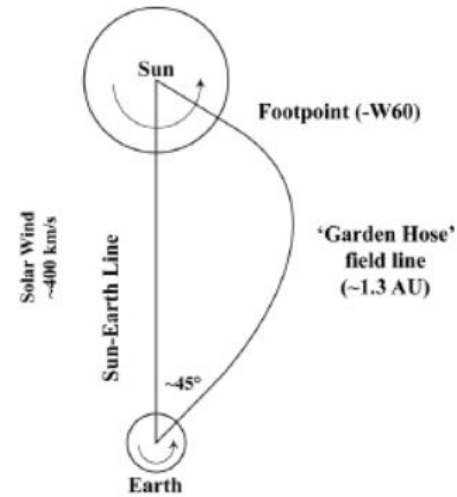
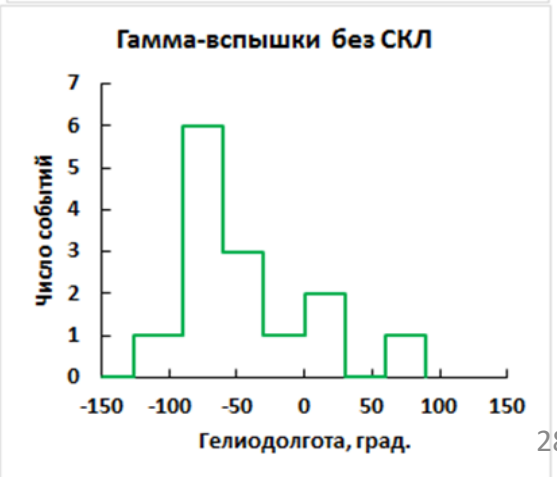
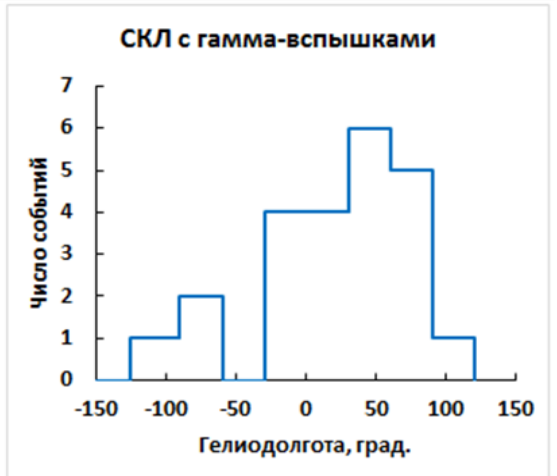
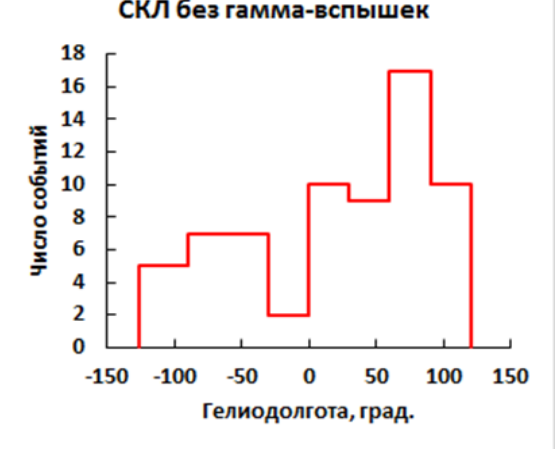


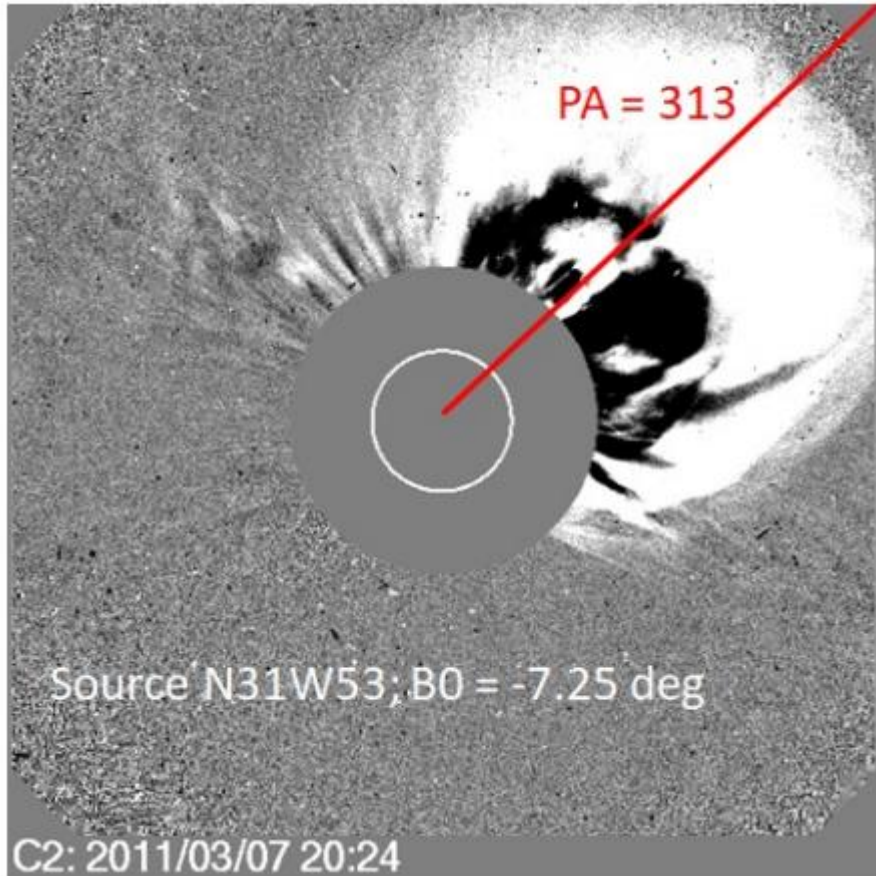
Fig. 2. Ion intensity-time profiles for four different SEP events observed by ACE/EPAM (Gold et al., 1998) and IMP-8/CPME (Sarris et al., 1976). Those profiles are typical of the SEP events generated from different solar longitudes relative to the observer. Dashed vertical lines indicate the occurrence of the parent solar event and solid vertical lines the arrival of CME-driven shocks.

Lario, 2005



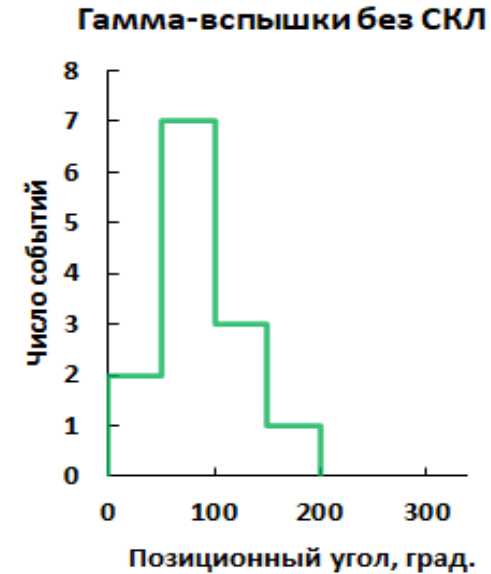
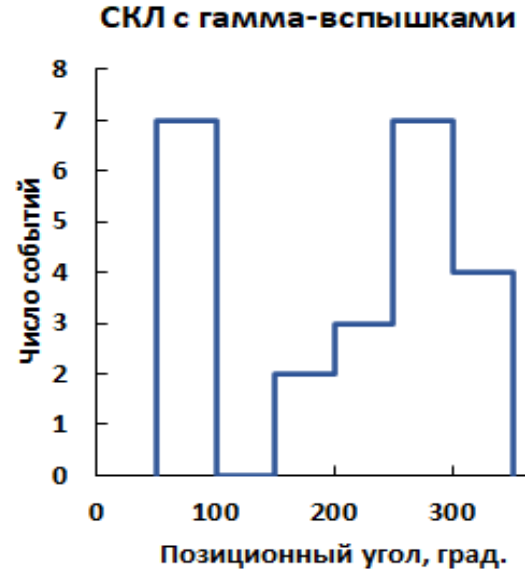
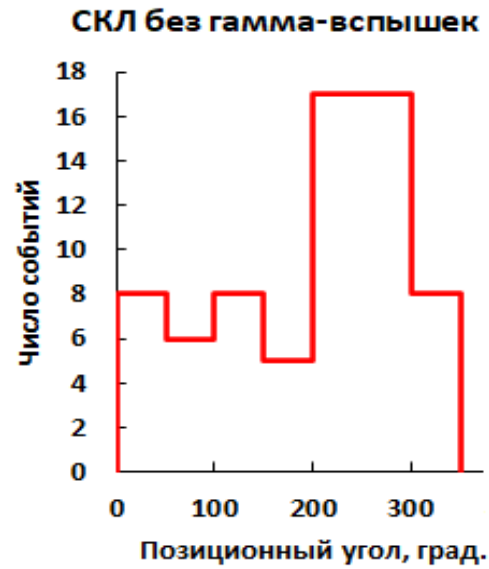
**Гамма-вспышки без СКЛ связаны с родительскими вспышками на долготах, удаленных от долготы соединения с земным наблюдателем.**





Позиционный угол – направление наиболее быстро движущегося сегмента коронального выброса вещества (КВВ). Он определяется даже для КВВ с угловым размером типа гало. Отсчитывается от вертикали против часовой стрелки. Земля попадает преимущественно в интервал углов 180 -360 град.

Gopalswamy, EGU online conference May 2020



**Корональные выбросы вещества гамма-вспышек без СКЛ двигались не в сторону Земли. СКЛ, генерированные в этих событиях, прошли мимо земного наблюдателя.**

## Заключение

**Все события с длительным солнечным гамма-излучением (гамма-вспышки) генерируют высокоэнергичные протоны ( $>100$  МэВ), которые выходят в межпланетную среду и являются солнечными космическими лучами (СКЛ).**

**Те гамма-вспышки, которые не сопровождаются наблюдаемыми СКЛ, происходят в основном в восточном полушарии Солнца и связаны с корональными выбросами вещества, распространяющимися не в направлении Земли. Таким образом СКЛ в этих событиях минуют земного наблюдателя.**

Солнечные протонные события, не сопровождаемые длительным гамма-излучением, являются относительно слабыми: если в них и есть частицы с энергией выше 100 МэВ, потоки их малы – как правило,  $J(>100 \text{ МэВ}) < 0.1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ . В большинстве событий СКЛ, сопровождающихся гамма-вспышками,  $J(>100 \text{ МэВ}) > 0.3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ .

**Работа выполнена на базе Каталога солнечных  
протонных событий 24-го цикла солнечной  
активности и поддержана грантом РФФИ №  
19-02-00264**

**Благодарю за внимание!**