

37 ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ

27 ИЮНЯ – 2 ИЮЛЯ 2022 г., НИИЯФ

ПОИСКИ ИСТОЧНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОБЫТИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Базилевская Г.А.¹, Дайбог Е.И.², Логачев Ю.И.²

¹ФИАН, Россия, г. Москва bazilevskayaga@lebedev.ru

²НИИЯФ, Россия, г. Москва, daibog@srd.sinp.msu.ru, logachev@srd.sinp.msu.ru

Не удастся однозначно найти определенный источник для $\sim 35\%$ солнечных протонных событий ($J \geq (10 \text{ МэВ}) \geq 1$). Большинство этих событий – слабые.

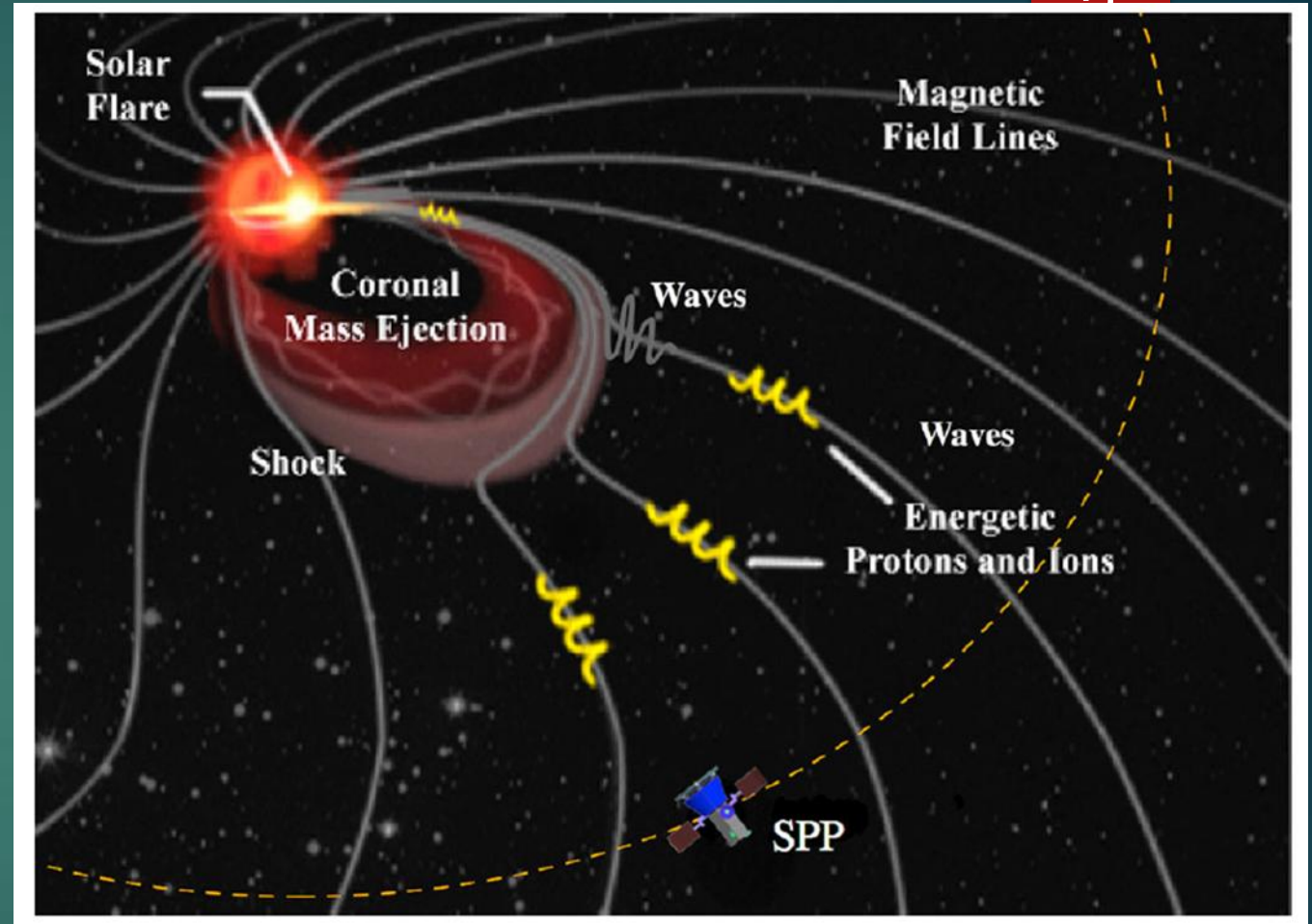
Среди них есть события, потоки которых коррелируют с вариацией межпланетных параметров: B , V , температурой и плотностью плазмы солнечного ветра.

Задача данной работы: Могут ли слабые СПС быть частицами, ускоренными в межпланетной среде (Energetic Storm Particles, ESP)?

Что такое ESP? (энергичные штормовые частицы)

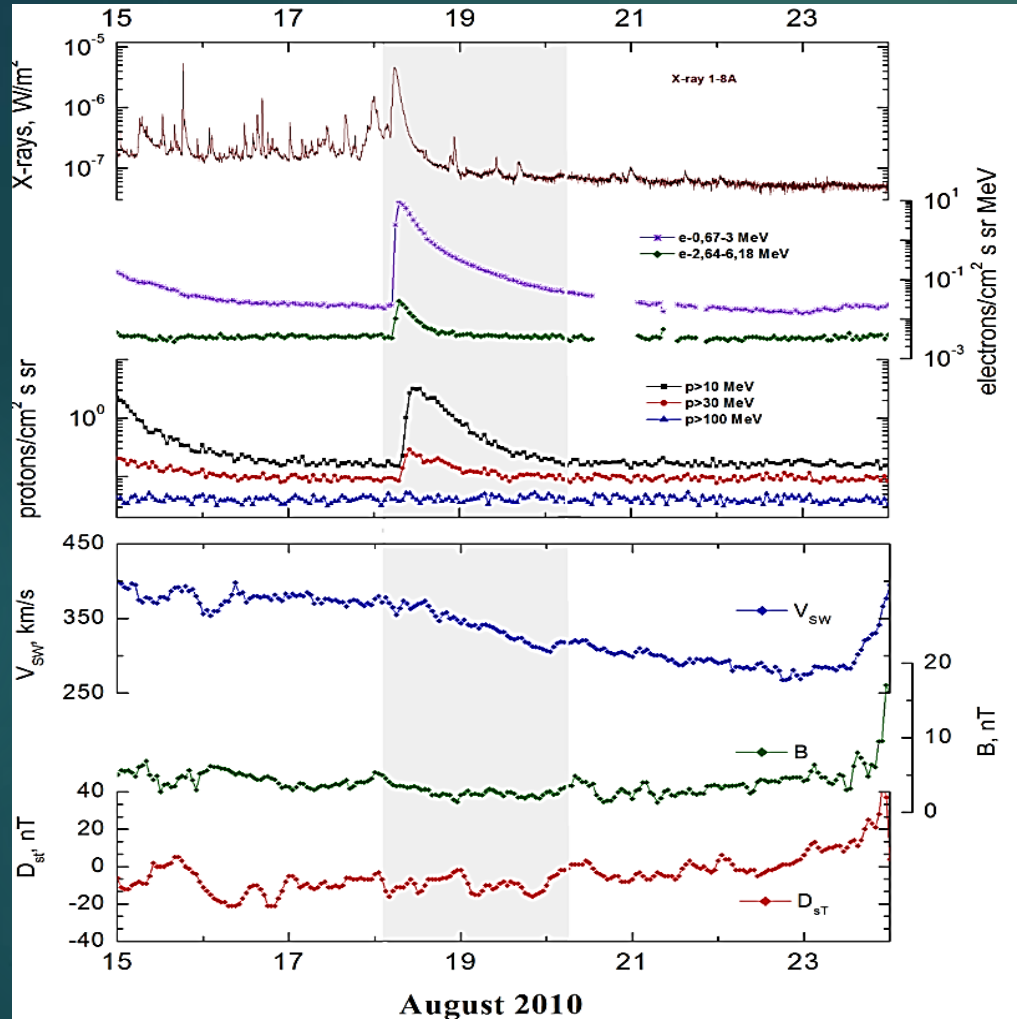
Межпланетная ударная волна, движущаяся от Солнца, ускоряет частицы, некоторые из которых убегают вперед и могут быть зарегистрированы наблюдателем.

В случае значительных СПС мы наблюдаем ESP как дополнительные потоки частиц на временном профиле СПС.

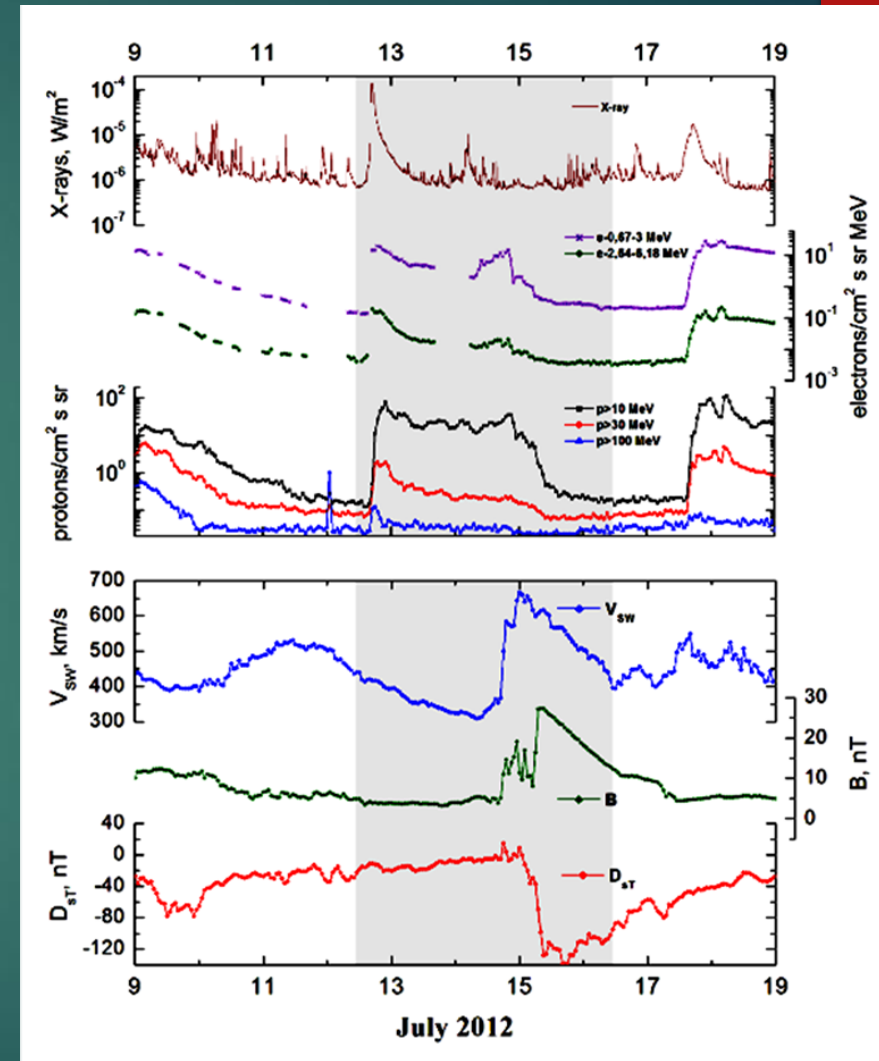


В большинстве случаев ESP наблюдаются на фоне частиц, ускоренных на Солнце. Для краткости мы называем их «эруптивными», или «вспышечными», не вдаваясь в механизм ускорения.

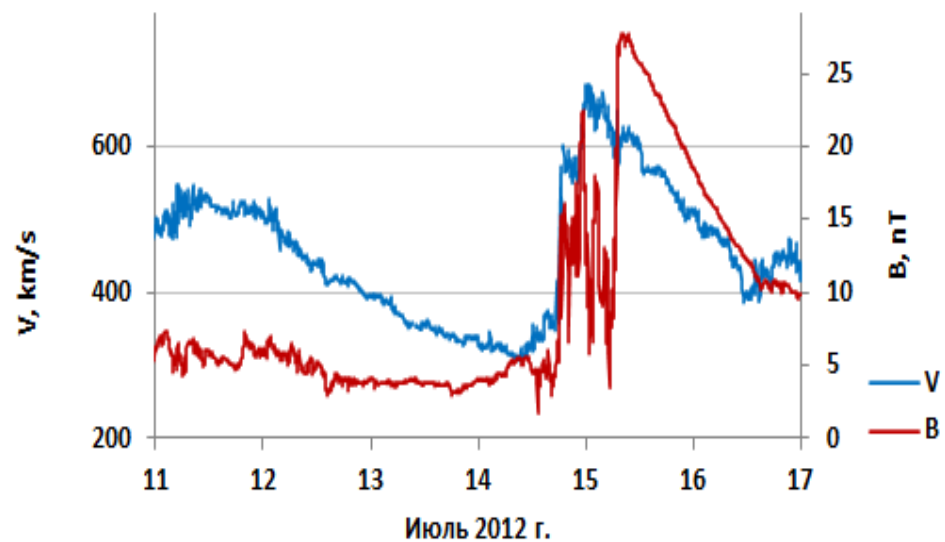
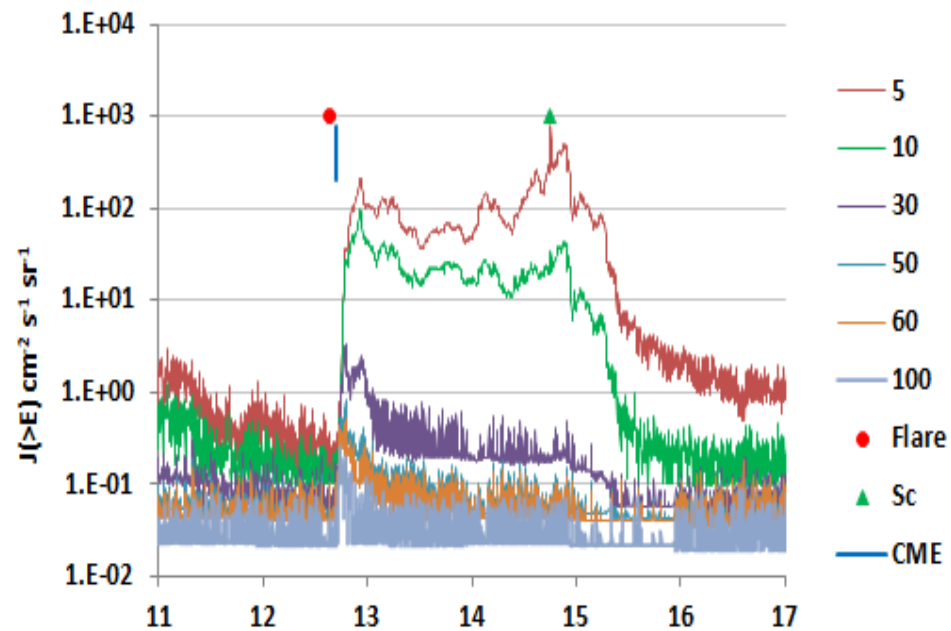
4



Событие СПС без ESP



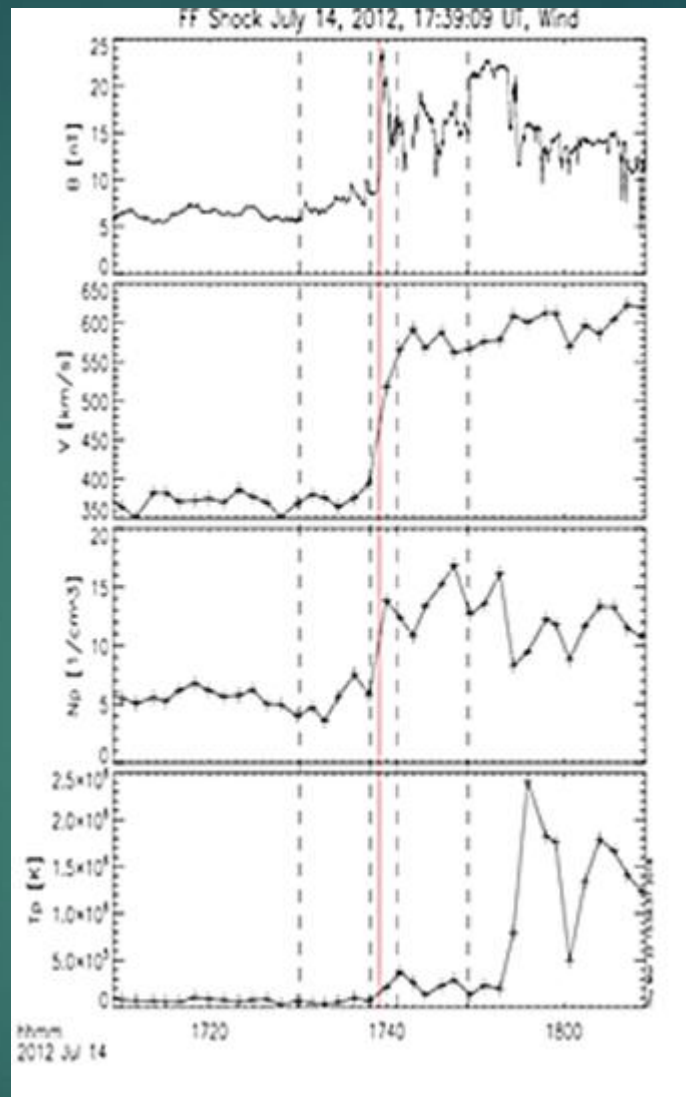
Событие СПС с ESP



Flare 12d15h18m, 2B/X1.4, S14W01

CME: 12d16h48m, V= 0885 km/s, $\Delta\phi = 360^\circ$, dA= 158°

▲ SC 14d18h09m



Особенности ESP

- Рост потоков частиц до SC
- Наличие ударных волн, сопровождающих вариации профиля СПС.
- Максимум потока частиц совпадает с временем прихода ударной волны, инициированной КВМ в энерговыделении на Солнце за десятки часов до этого.
- После прихода ударного фронта начинается быстрое падение потоков частиц типа Форбуш-эффекта

37 ВКЛ, 27 июня - 2 июля 2012 г. ИНИИФ МГУ

Процедура обработки данных

6

- Отбор изолированных СПС, коррелирующих с параметрами B , V , Dst
- Поиски ударных волн, зарегистрированных во время СПС
- Поиски КВМ и вспышек на Солнце, связанных с найденными ударными волнами

Event 1999.06.25

Event 1999.06.25 –

Particle event: $T_0(E_p > 10 \text{ MeV})$

– 25d10h

$T_{\text{max}}(E_p > 10 \text{ MeV})$ – 26d12h,

$J_{\text{max}}(E_p > 10 \text{ MeV})$ – 1.7

/cm².s.sr (data from IMP-8)

Sources: ○ solar flare

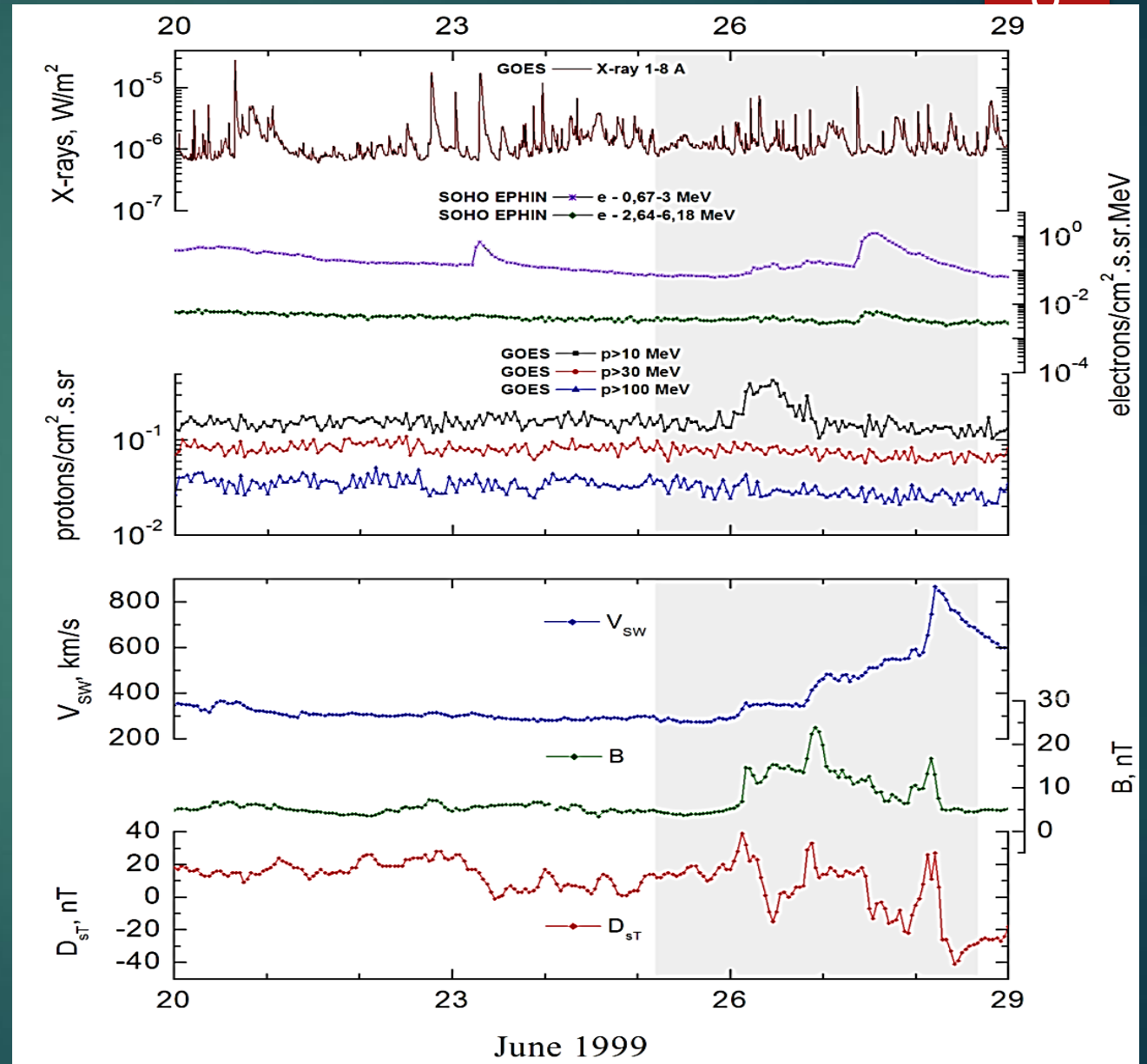
24d12h04m, C4.1/1F, N29W13,
solar flare 26d05h08m, M2.3/2B,
N24E02, AR8598

Main X-ray burst 1-8 Å: onset –
24d12h04m, max – 24d14h12m, Φ
= 0.004 J/m²

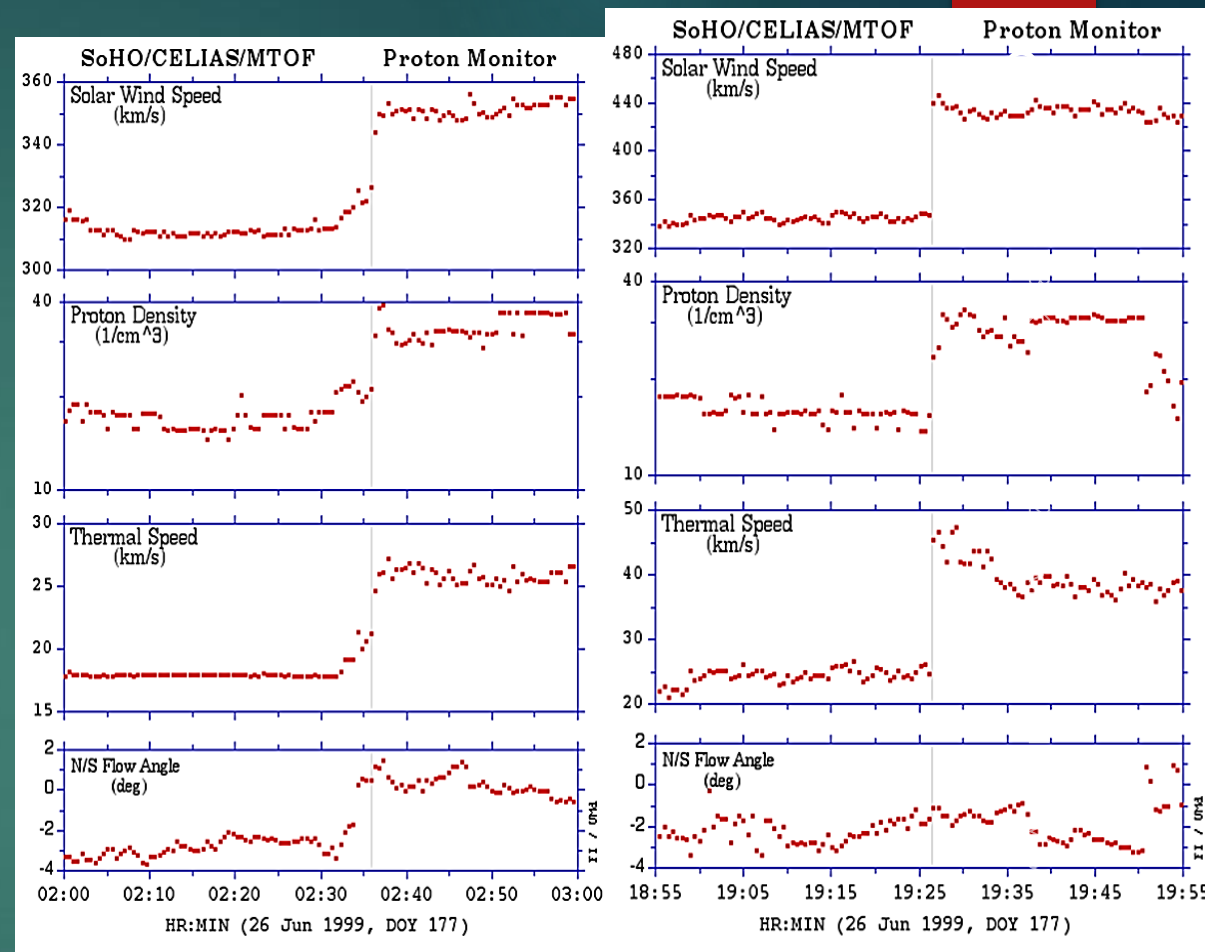
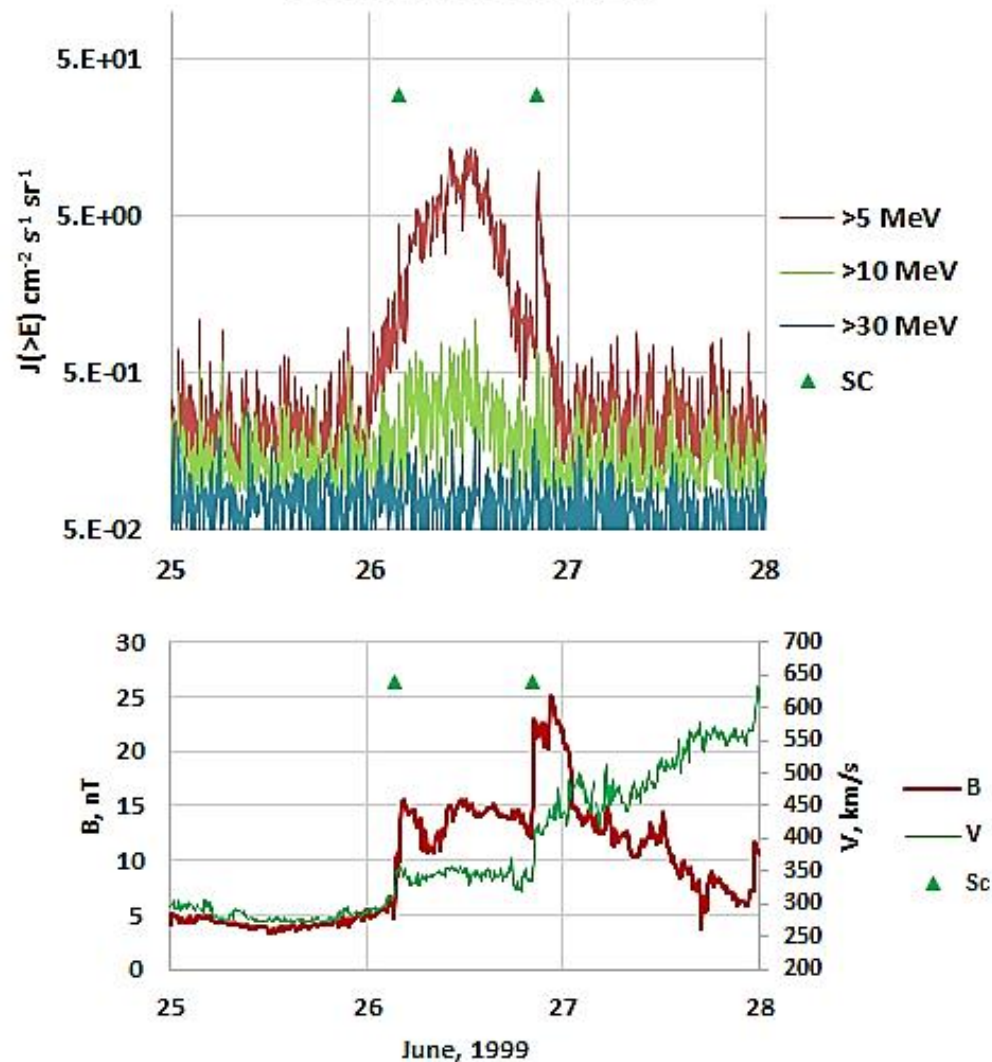
CME: 24d13h31m, $V = 0975 \text{ km/s}$,
 $\Delta\phi = 360^\circ$, $dA = 335^\circ$

▲ SC 26d03h25 m, 26d20h16 m

Вспышка западная. 20 час.
Запаздывание 20 час. ???



Event 1999.06.25



<http://umtof.umd.edu/pm/>
<http://ipshocks.fi/database>

Вверху: 5-мин данные GOES.
 Отмечены моменты вспышки, выхода КВМ и двух SC.
 Внизу: Приход двух ударных фронтов совпадает с SC. Он отмечен скачками скорости солнечного ветра, ростом B и плотности плазмы. https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

Критерии отбора: Рассмотрены все КВМ за 6 суток, предшествовавших приходу к Земле ударной волны. Выбраны те, которые предположительно могли достигнуть Земли в пределах ± 1 сутки относительно зарегистрированной ударной волны (Sc)

CME – candidates

Event 1999 06							
25							
Y	MO	D_CME	H_CME	Min_CME	V	PA	W
1999	6	19	12	30	262	306	65
1999	6	19	19	31	318	278	42
1999	6	19	22	30	274	278	48
1999	6	20	4	21	352	284	46
1999	6	22	18	54	1133	360	360
1999	6	23	6	6	579	264	154
1999	6	23	7	31	1006	360	360
1999	6	24	0	54	503	256	98
1999	6	24	13	31	975	360	360
1999	6	24	22	30	476	347	85

https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

Вспышка: M1.7 1999 06 22, 17:37-18:54 UT, **N22E37**

Type II 1999 06 22, 18:24-18:40 UT

Start: 3000 kHz, End 2000 kHz,

CME 1999 06 22, 18:54 UT, $V=1133$ km/s, Halo

Вспышка: M 1.7 1999 6 23, 06:49-07:35 UT

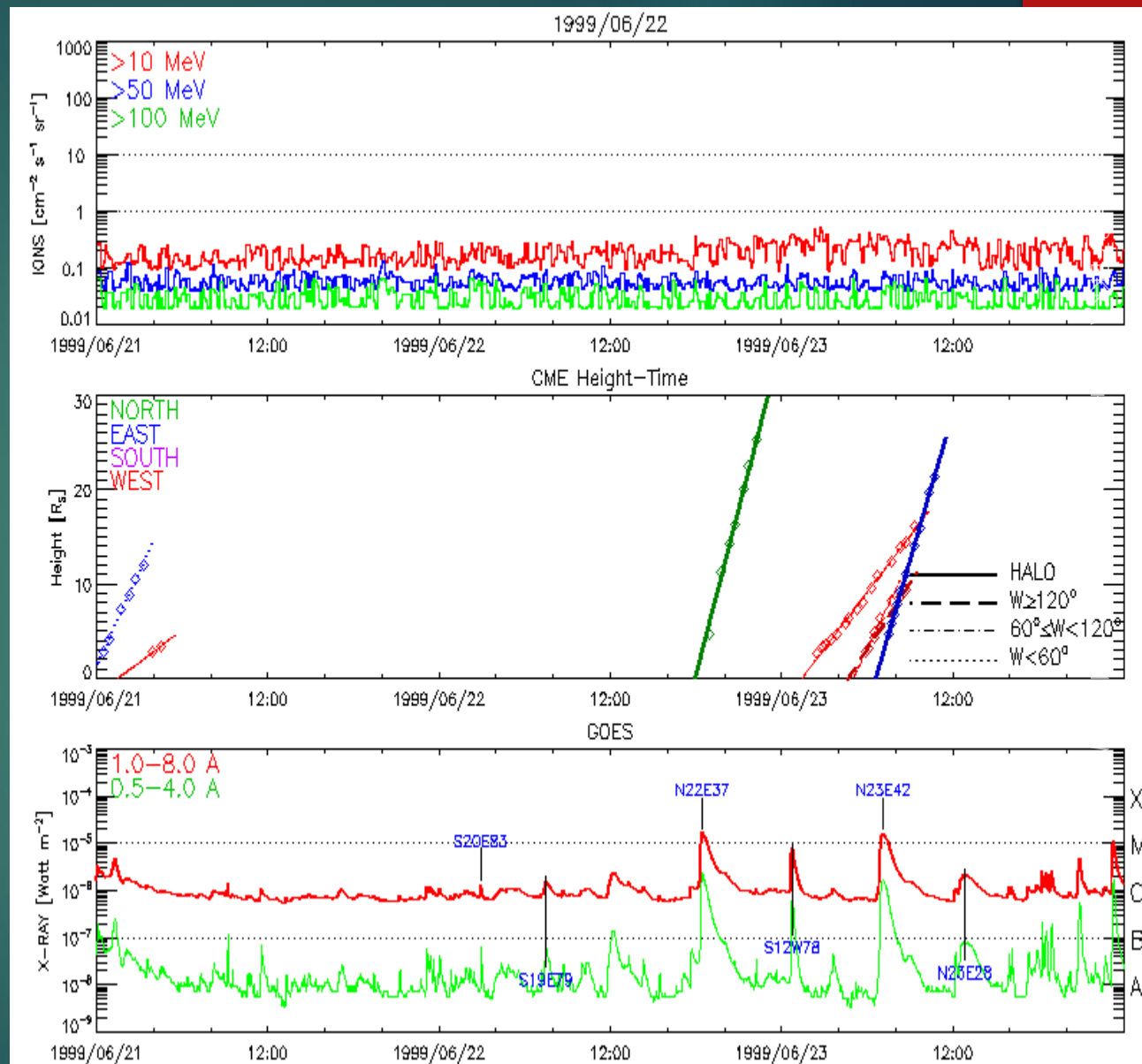
N23E42

Type II: 1999 06 23 07:07 - 07:14

Start: 14000 kHz, End 2000 kHz,

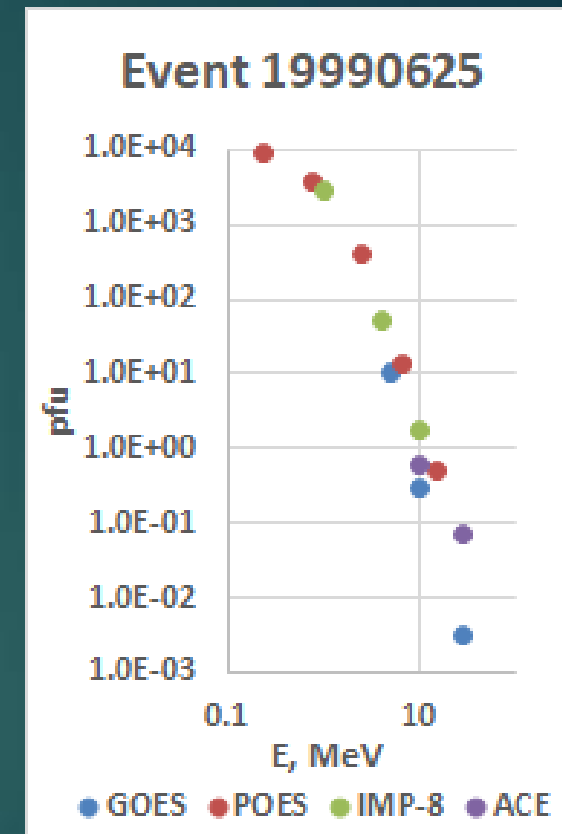
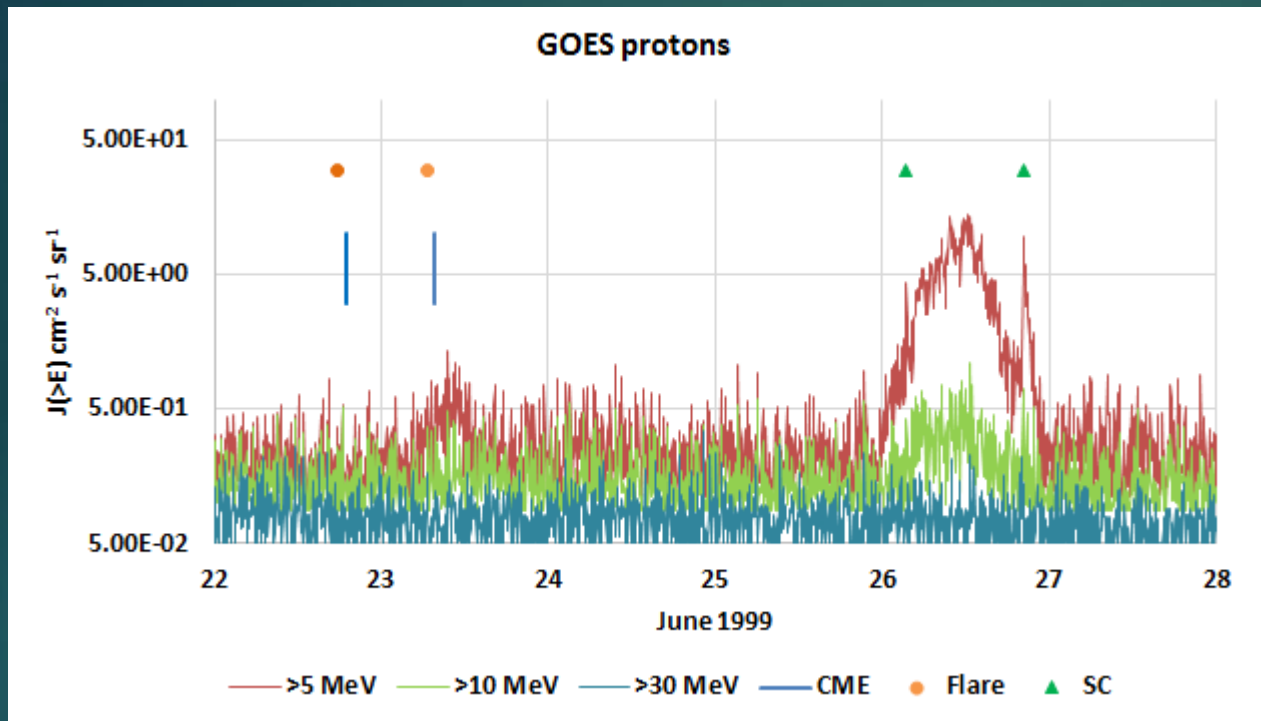
CME: 1999 06 23, 07:31 UT, $V=1006$ km/s, Halo.

https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/



Event 1999.06.25Particle event: $T_0(E_p > 10 \text{ MeV}) - 25\text{d}10\text{h}$ $T_{\text{max}}(E_p > 10 \text{ MeV}) - 26\text{d}12\text{h}$

12

**Вывод:** Событие представляет собой ESP.

КВМ 22 июня, 18:54 и 23 июня, 07:31 образовали 2 ударных фронта - структуру, ограничивающую область, занятую ускоренными частицами. **Время распространения фронтов до Земли ~70-84 час**. Вспышка: 23 июня 06:23 UT, **N22E37** дала слабое возрастание потоков частиц на орбите Земли, не вошедшее в Каталог. Предыдущая вспышка **N23E42** тоже сопровождалась КВМ и межпланетной ударной волной и, по-видимому, еще более слабым возрастанием частиц.

$$\gamma = -3$$

Event 2000.07.13

Event 2000.07.13

Particle event: To($E_p > 10$ MeV)
– 13d06h

Tmax($E_p > 10$ MeV) – 13d10h

Sources: ◉ solar flare

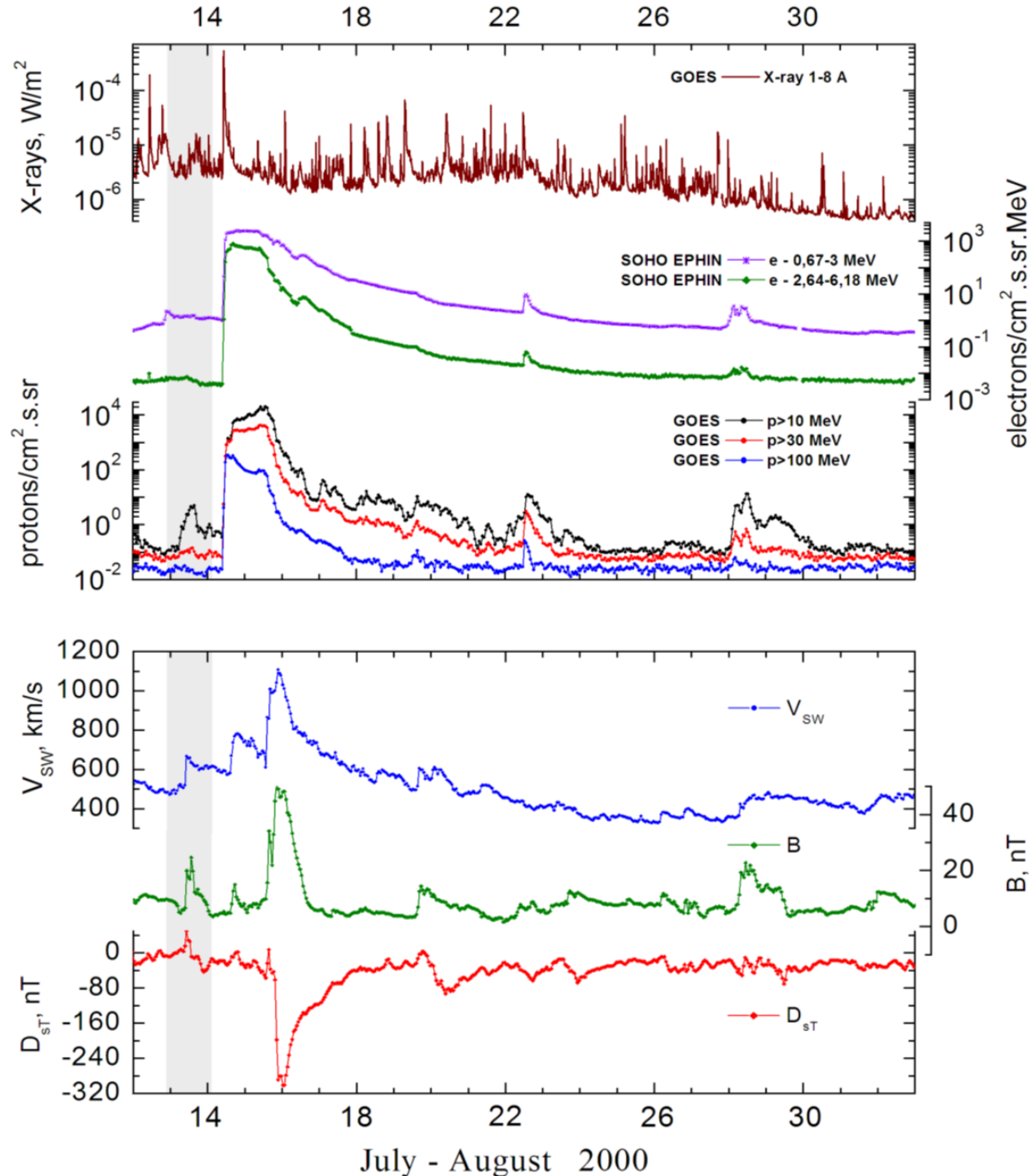
12d18h41m, M5.7/2F, N16W64,
AR9070

Main X-ray burst 1-8 Å : onset –
12d18h41m, max –
12d18h47m, $\Phi = 0.063$ J/m²

CME: 12d20h30m, $V = 820$
km/s, $\Delta\phi = 101^\circ$, $dA = 281^\circ$

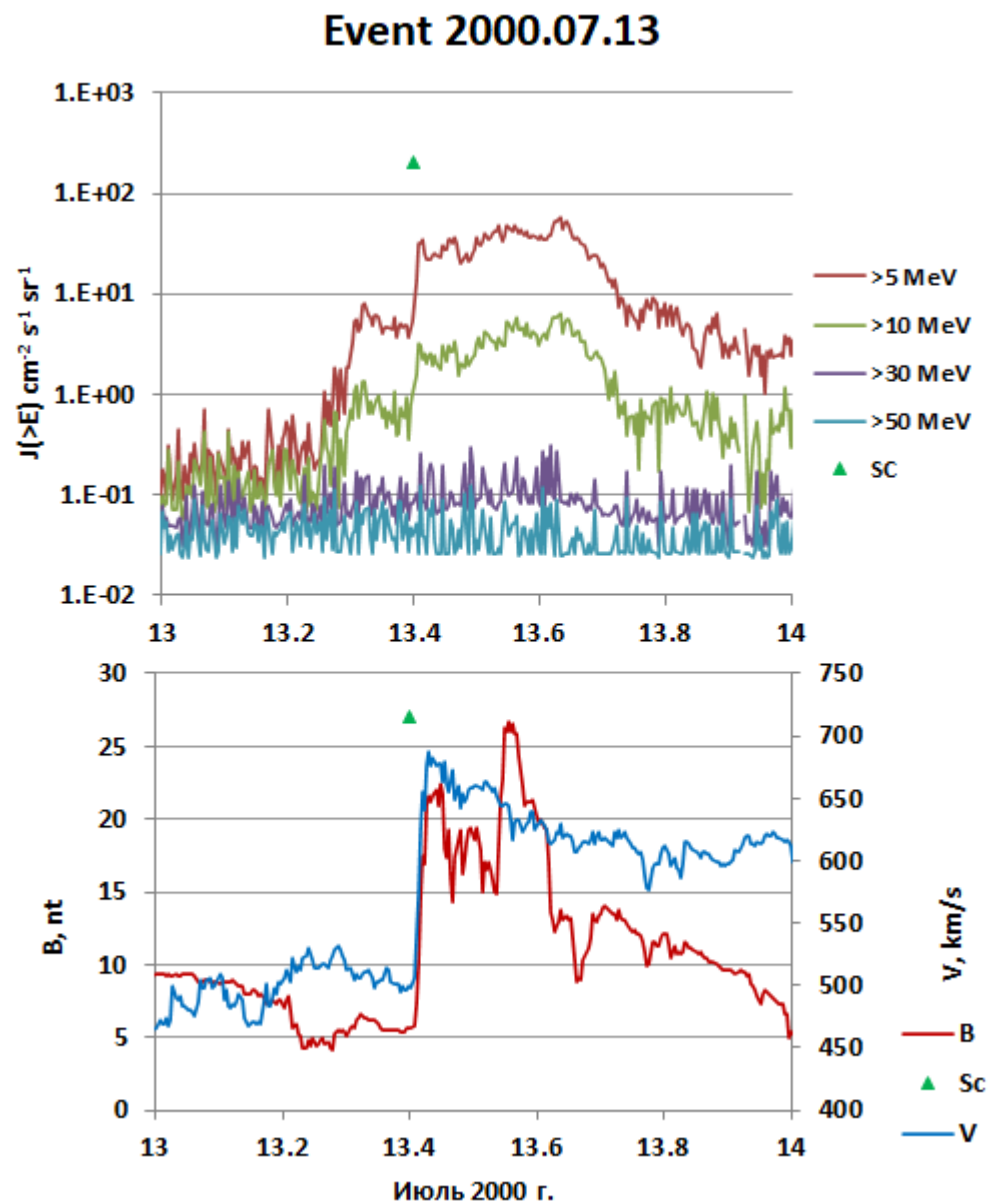
▲ SC 13d09h42m

Время запаздывания прихода
частиц от западной вспышки
11.3 час. – СЛИШКОМ велико



Shocks

2000-07-13 09:19:16 ACE
 2000-07-13 09:43:48 Wind
 2000-07-13 09:52:30 OMNI



CME – candidates

16

Event	2000 07 13		H_CM				
Y	MO	D_CME	E	Min_CME	V	PA	Wide
2000	7	8	17	42	506	57	18
2000	7	9	11	26	507	169	173
2000	7	9	17	28	512	94	146
2000	7	9	18	50	524	294	10
2000	7	9	18	50	683	294	10
2000	7	9	21	50	562	83	19
2000	7	10	2	26	597	285	12
2000	7	10	21	50	1352	67	289
2000	7	11	11	6	745	256	43
2000	7	11	13	27	1078	360	360
2000	7	12	2	50	708	96	90
2000	7	12	20	30	820	281	101

Вспышка: 2000 07 10d,
21:05-22:27, M5.7,
N18E49

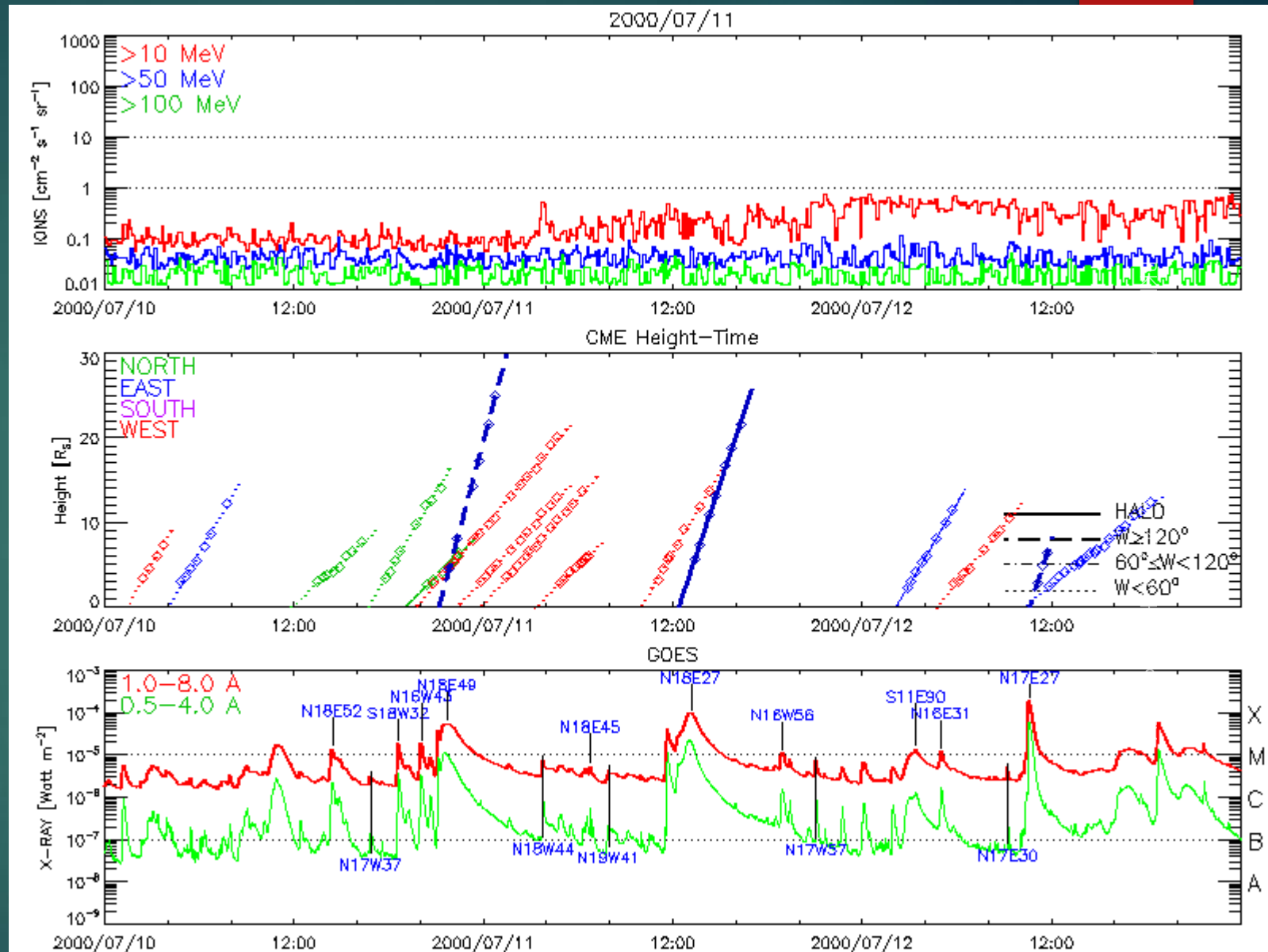
Type II: 10d 22:00-23:30,
14000-1000 kHz

CME 2000 07 10d, **21:50**
UT, $V=1352$ km/s, $PA=67$,
 $W=289$

Вспышка: 2000 07 11d,
12:12-13:35, X1.0, N18 E27

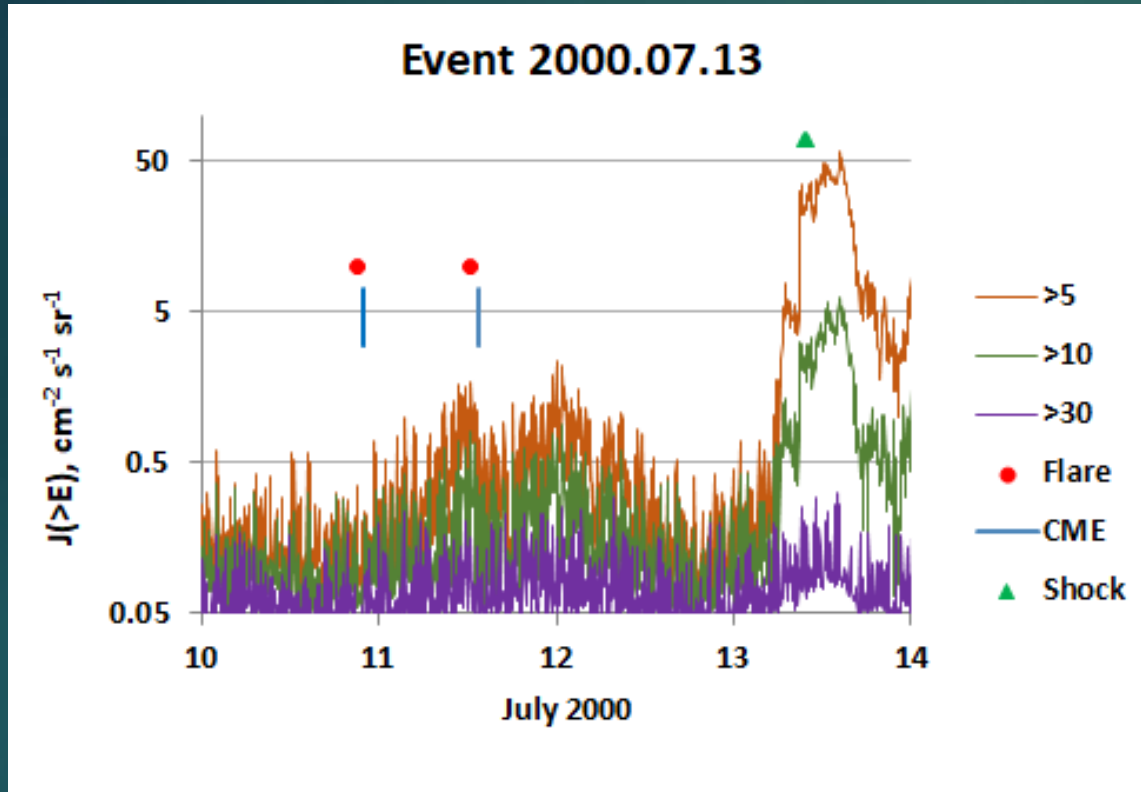
Type II: 11d 13:00 -13:30,
12000-1000 kHz

CME 2000 07 11d, **13:27 UT**,
 $V=1078$ km/s, $PA=63$, $W=$
360



Event 2000.07.13 Summary

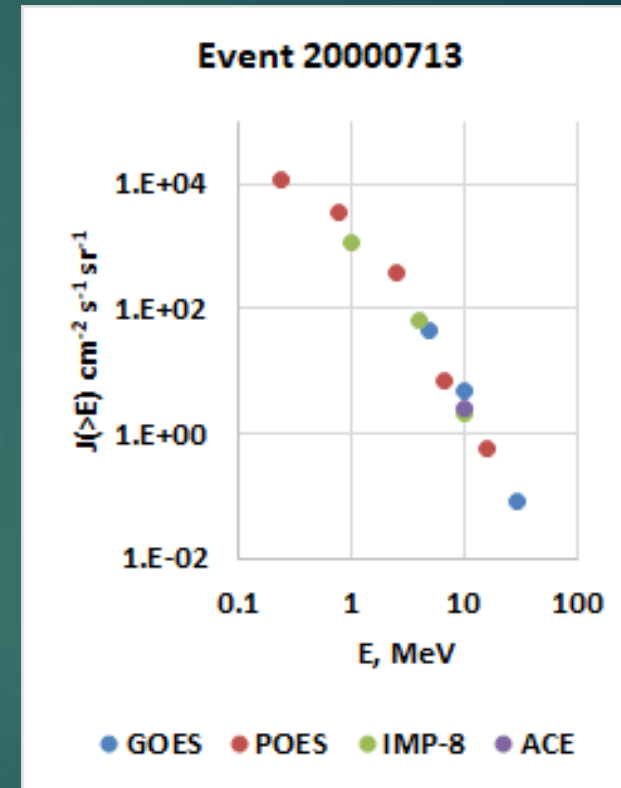
18



Particle event:

To($E_p > 10$ MeV) – 13d06h T_{max}($E_p > 10$ MeV) – 13d10h,

SC 13d09h42m



Вывод: Событие представляет собой ESP.

Источники: возможен вклад от 2-х вспышек:

10d 21:05, M5.7, N18E49 и 11d 12:12, X1.0, N18 E27

Обе вспышки сопровождались КВМ:

10d, 21:50 UT, V=1352 km/s, PA=67, W=289 и 11d, 13:27 UT, V=1078 km/s, PA=63, W= 360

На орбите Земли всего одна ударная волна, совпадающая с Sc, время распространения ~45-60 час.

Потоки частиц, ускоренных на Солнце, были малы и не были включены в Каталог.

Event 2001.03.26

Event 2001.03.26

Particle event: To($E_p > 10$ MeV) –
26d20h

Tmax($E_p > 10$ MeV) – 27d08h, Jmax
($E_p > 10$ MeV) – 1.8 /cm².s.sr

Sources: • **solar flare 26d13h03m,**

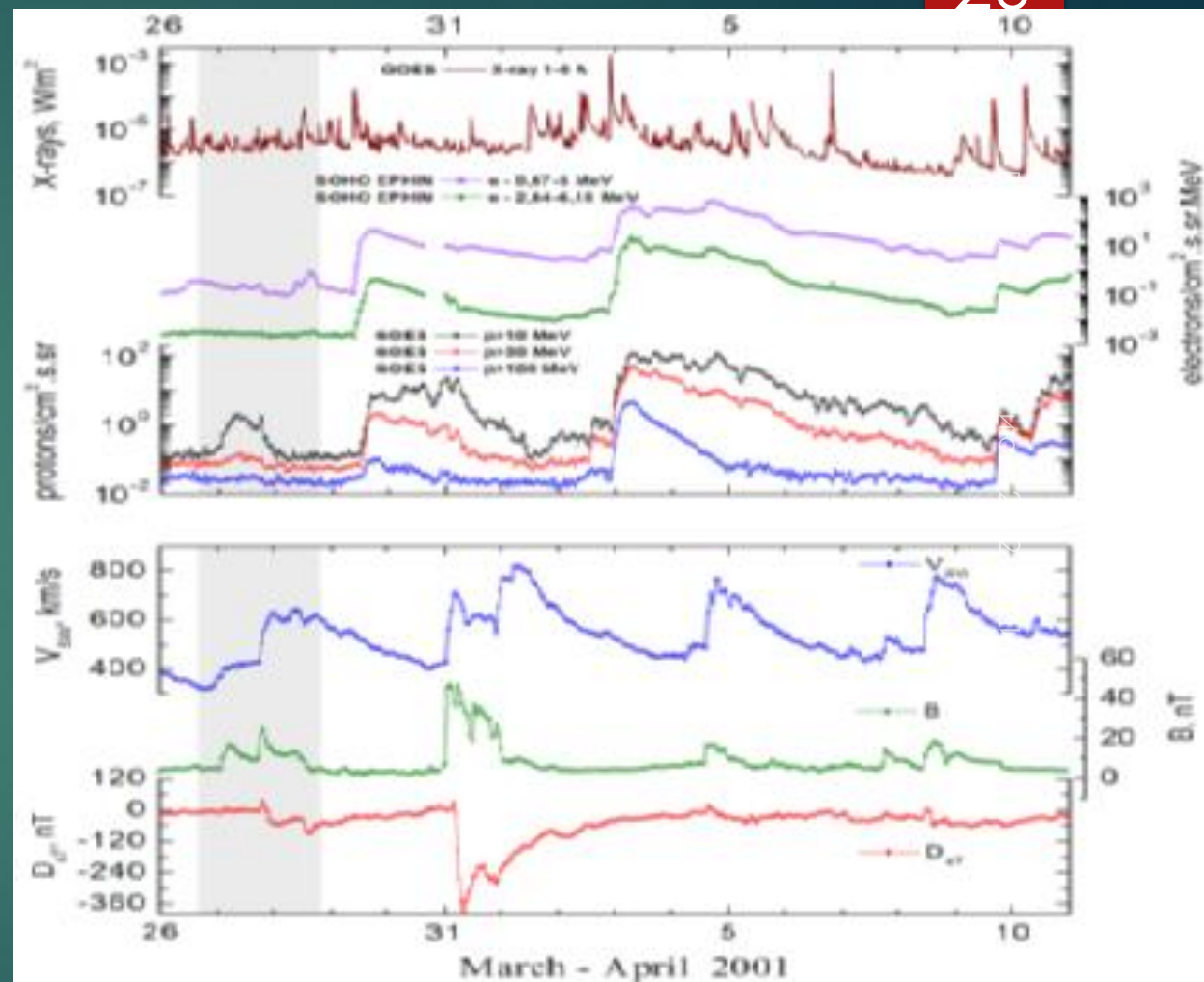
M2.2/1F, N15E27, AR9393

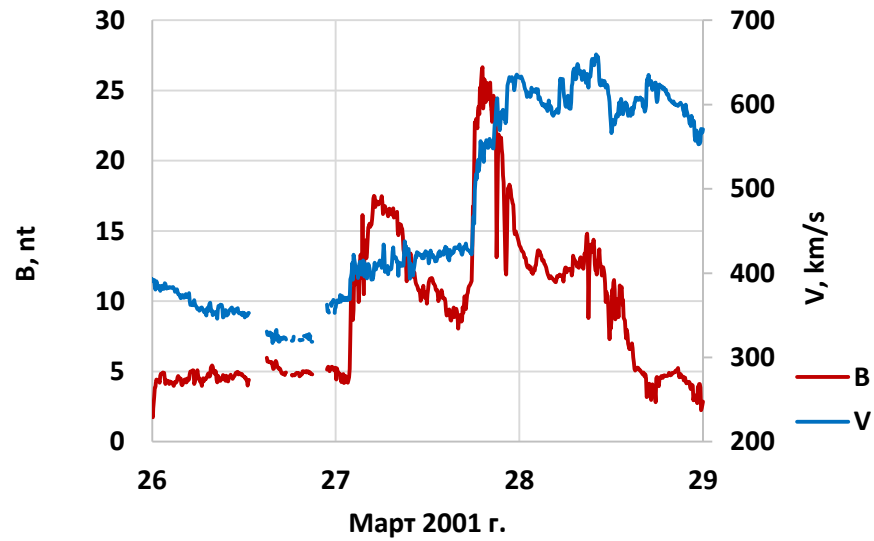
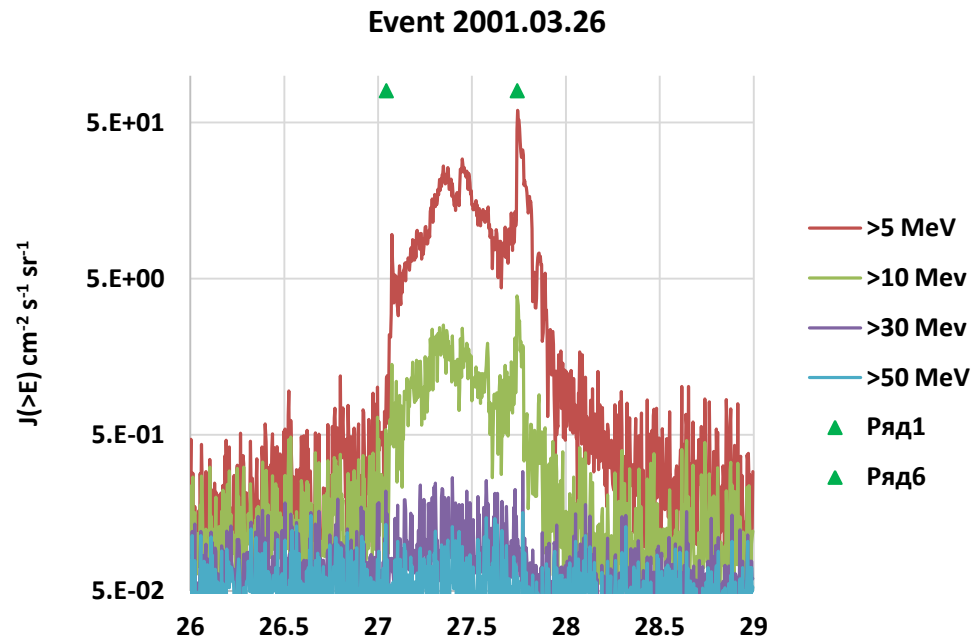
Main X-ray burst 1-8 Å: onset –
26d13h03m, max – 26d13h26m, $\Phi =$
0.037 J/m²;

CME: 26d13h50m, $V = 0541$ km/s, $\Delta\phi =$
055o, $dA = 104^\circ$

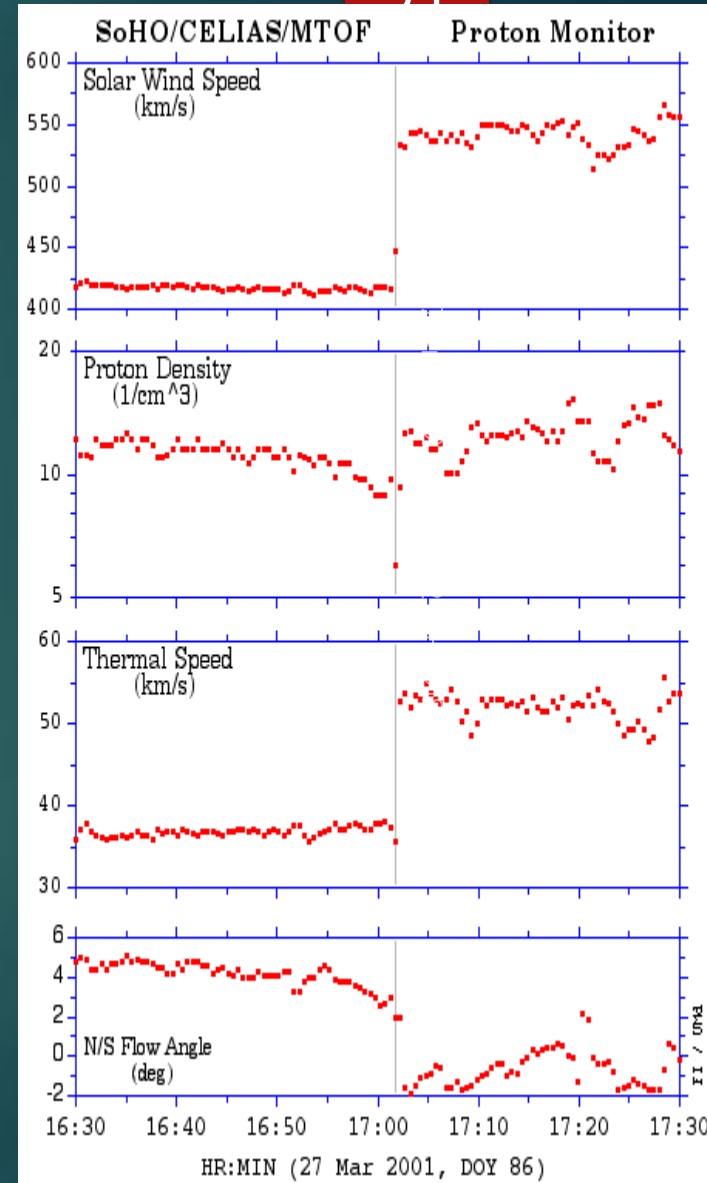
▲ **SC 27d17h47 m**

Время запаздывания соответствует
восточной вспышке, но есть корреляция с
ударными волнами



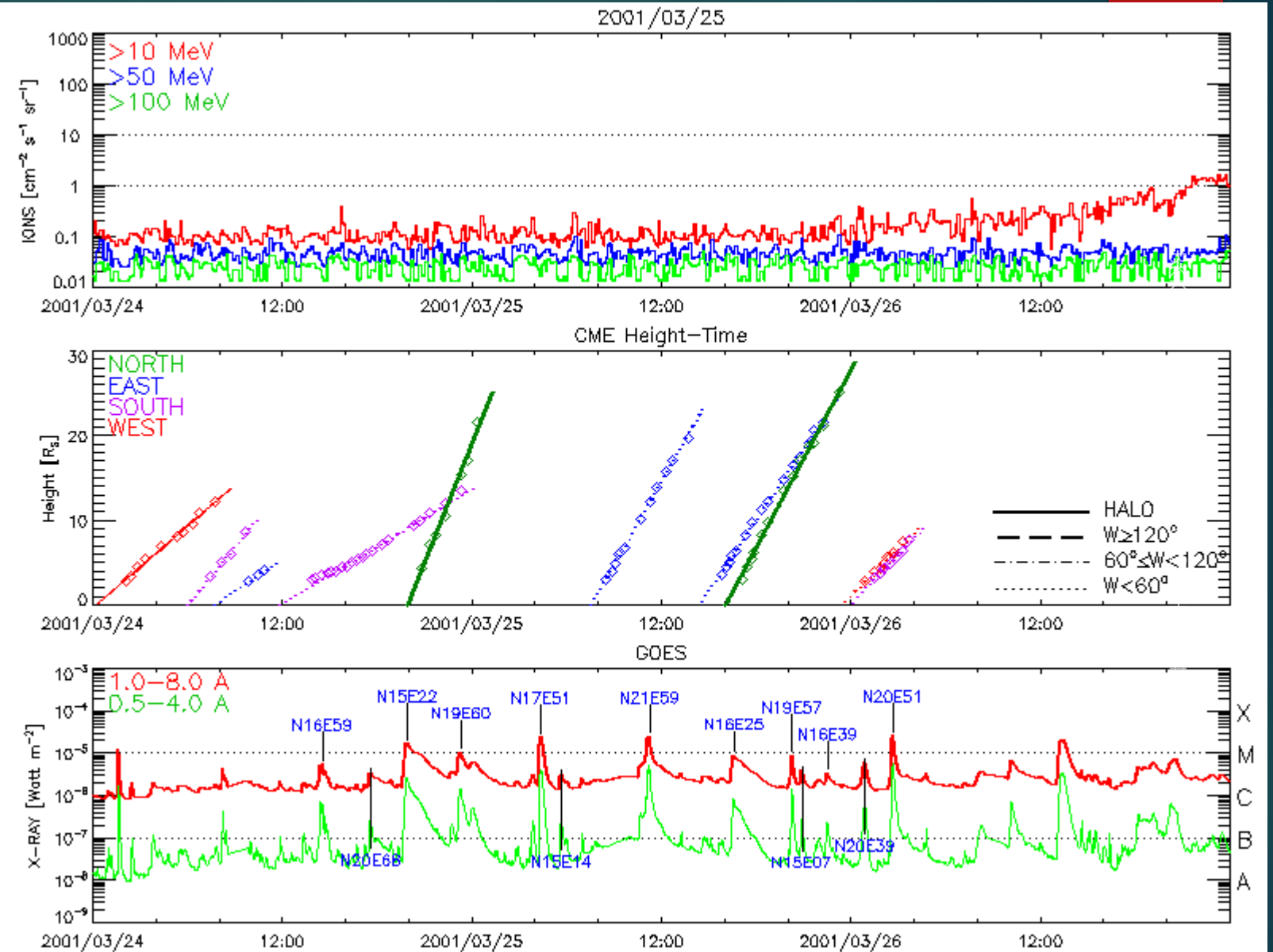


Shocks
 2001-03-27 01:53:30
 OMNI
 2001-03-27 17:53:30
 OMNI



CME – candidates

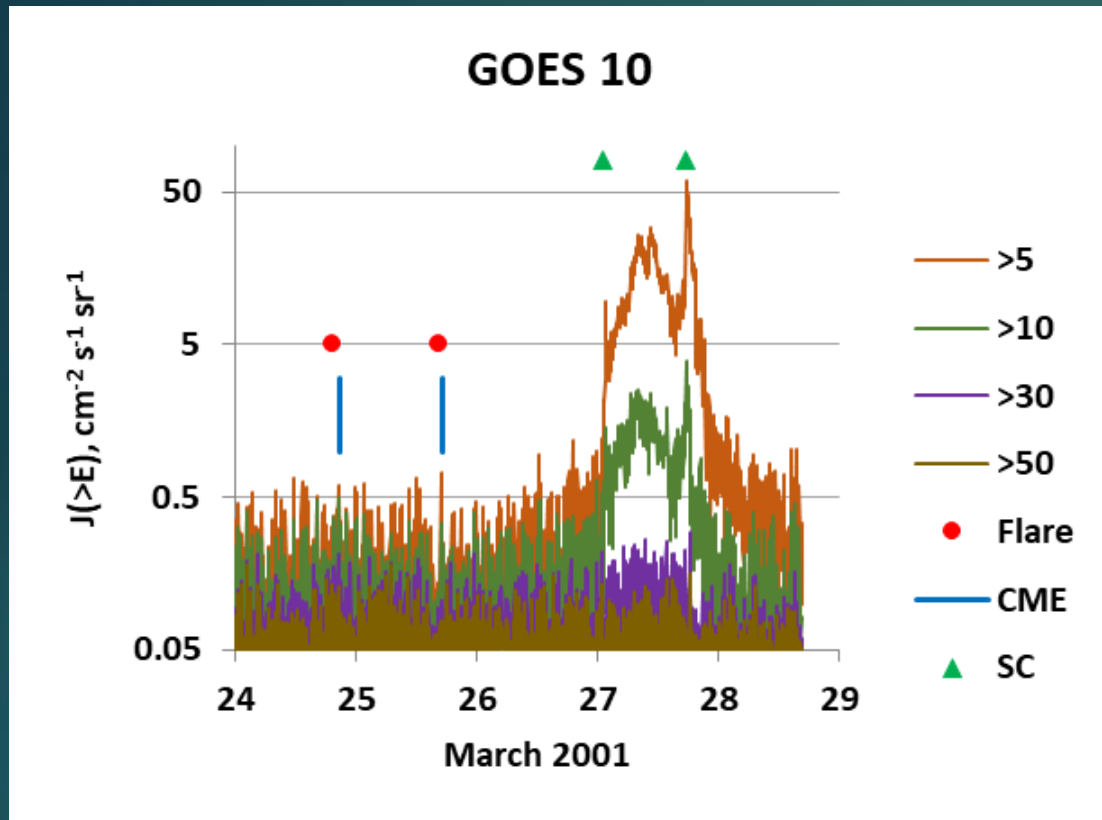
Event	2001 03 27						
Y	MO	D_CM E	H_CME	Min_CME	V	PA	W
2001	3	21	3	6	331	272	77
2001	3	22	1	27	548	239	13
2001	3	22	5	26	616	255	184
2001	3	23	10	50	425	207	51
2001	3	23	12	6	627	284	68
2001	3	24	20	50	1185	360	360
2001	3	25	17	6	805	360	360
2001	3	25	17	6	522	360	360



Вспышка: M1.7
 2001 03 24, 19:35-20:47,
 N15 E22, no type II
 KBM 2001 03 24, 20:50,
 V=1185 km/s, halo

Вспышка C9.0 2001
 03 25 16:25 -17:10,
 N16 E25, no type II
 KBM 2001 03 25, 17:06
 UT, V=805 km/s, halo

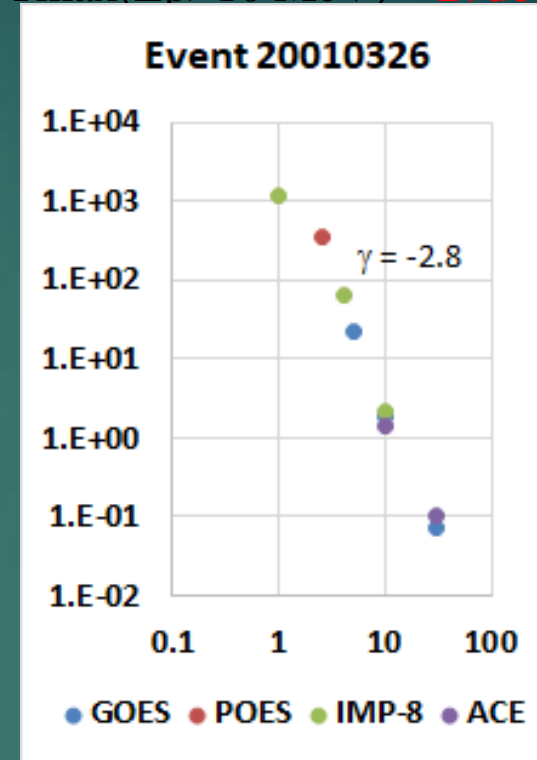
Event 2001.03.26



Particle event: $T_0(E_p > 10 \text{ MeV}) - 26\text{d}20\text{h}$

$T_{\text{max}}(E_p > 10 \text{ MeV}) - 27\text{d}08\text{h}$,

24



Вывод: Событие представляет собой ESP.

КВМ: 24 марта, 20:50, и 25 марта, 17:06 образовали 2 ударных фронта
27 марта 01:03 и 27 марта 17:02 (SC 27d 17:47) - структуру,
ограничивающую область, занятую ускоренными частицами. Время
распространения фронтов до Земли **~ 48-52 час**.

Вспышки 23 и 25 марта (**E=22-25**) не дали заметного возрастания потоков
частиц на орбите Земли.

Event 2010.08.03

Event 2010.08.03

Particle event: To($E_p > 10$ MeV) **-03d10h**

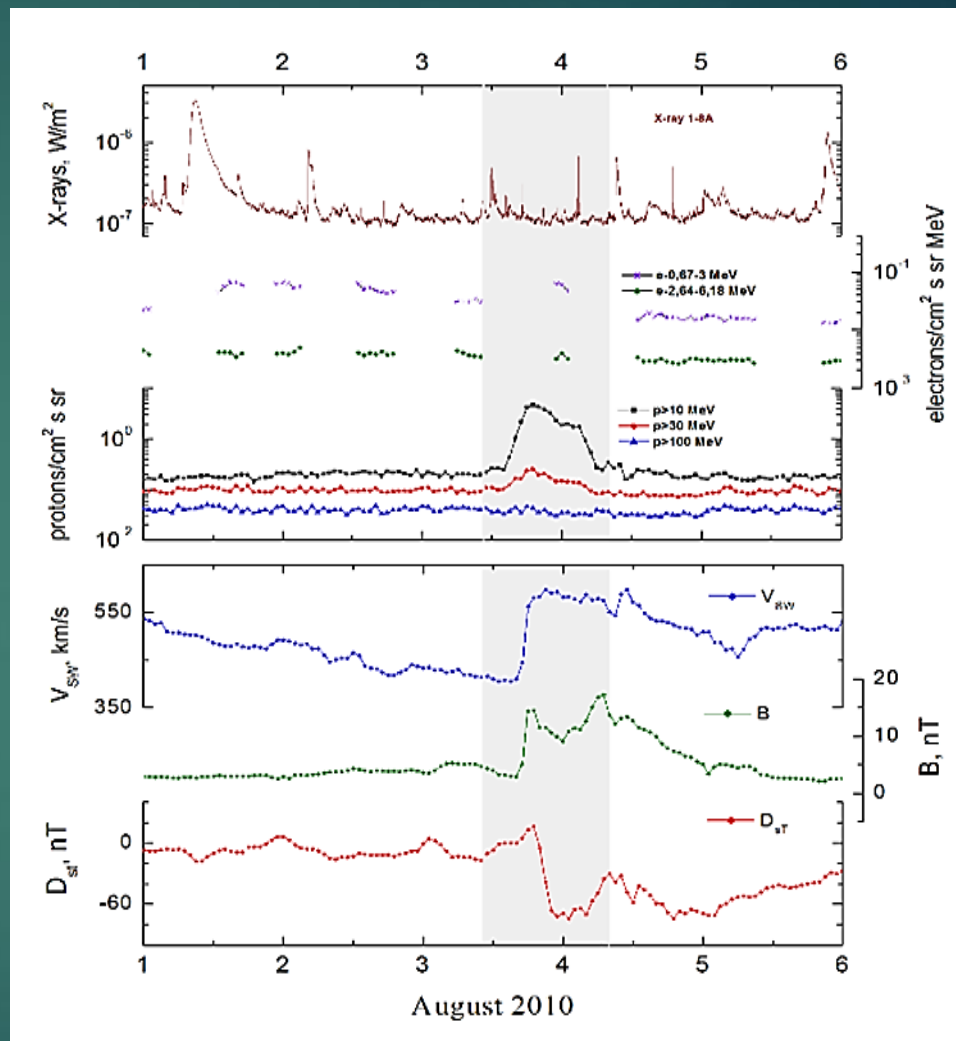
Tmax1 ($E_p > 10$ MeV) – 03d19h, Jmax1 ($E_p > 10$ MeV) – 2.7 /cm².s.sr
power-law index: = 3.1

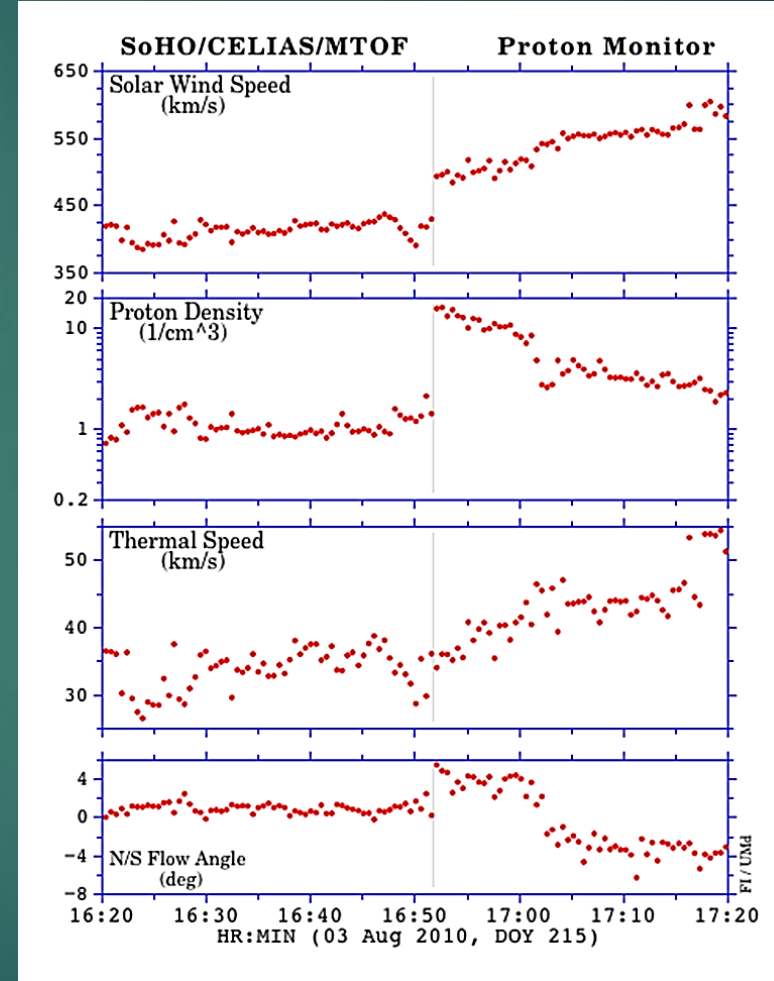
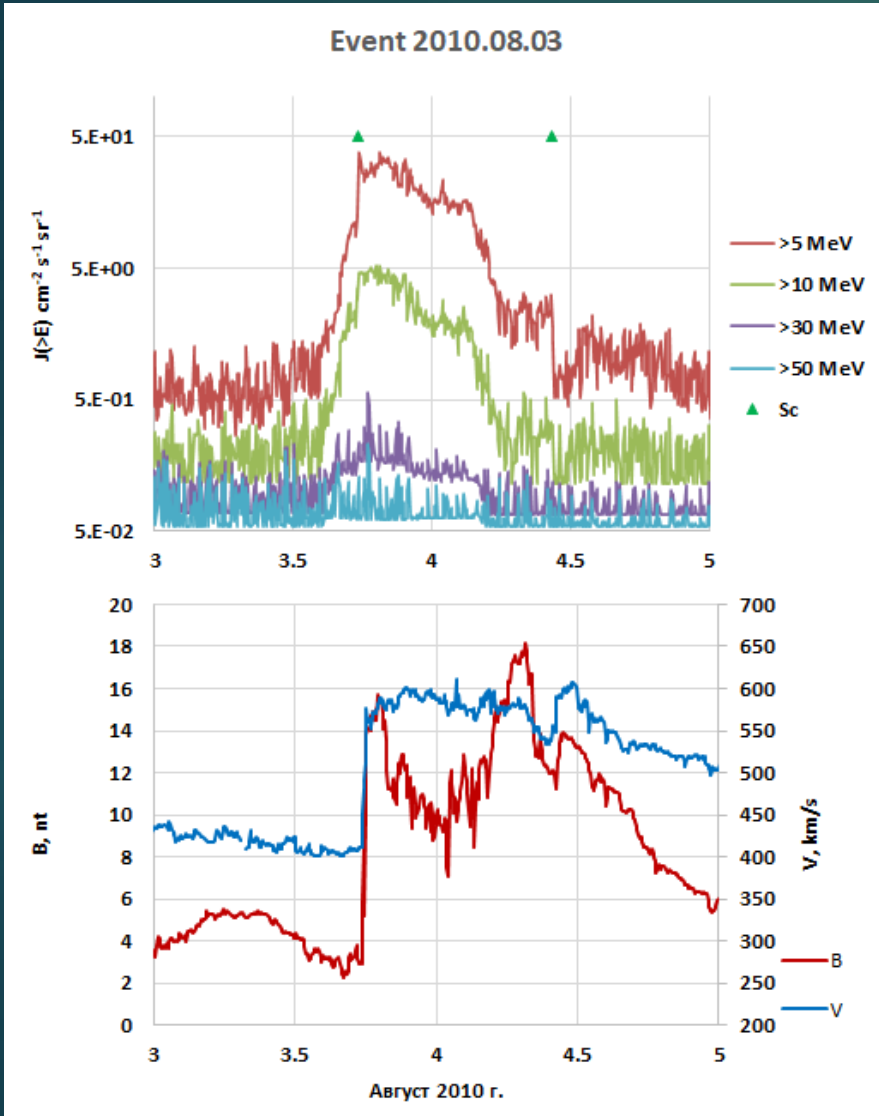
Sources: ● **DSF* 01d 07h50m**
N37W32 42°

CME: 01d13h42m, V = 850 km/s, $\Delta\phi = 360^\circ$; dA = 84°;

▲ SC 03d 17h40m; ▲ SC 04d 10h19m

Нет подходящей вспышки,
исчезновение волокна за >2дня
до события



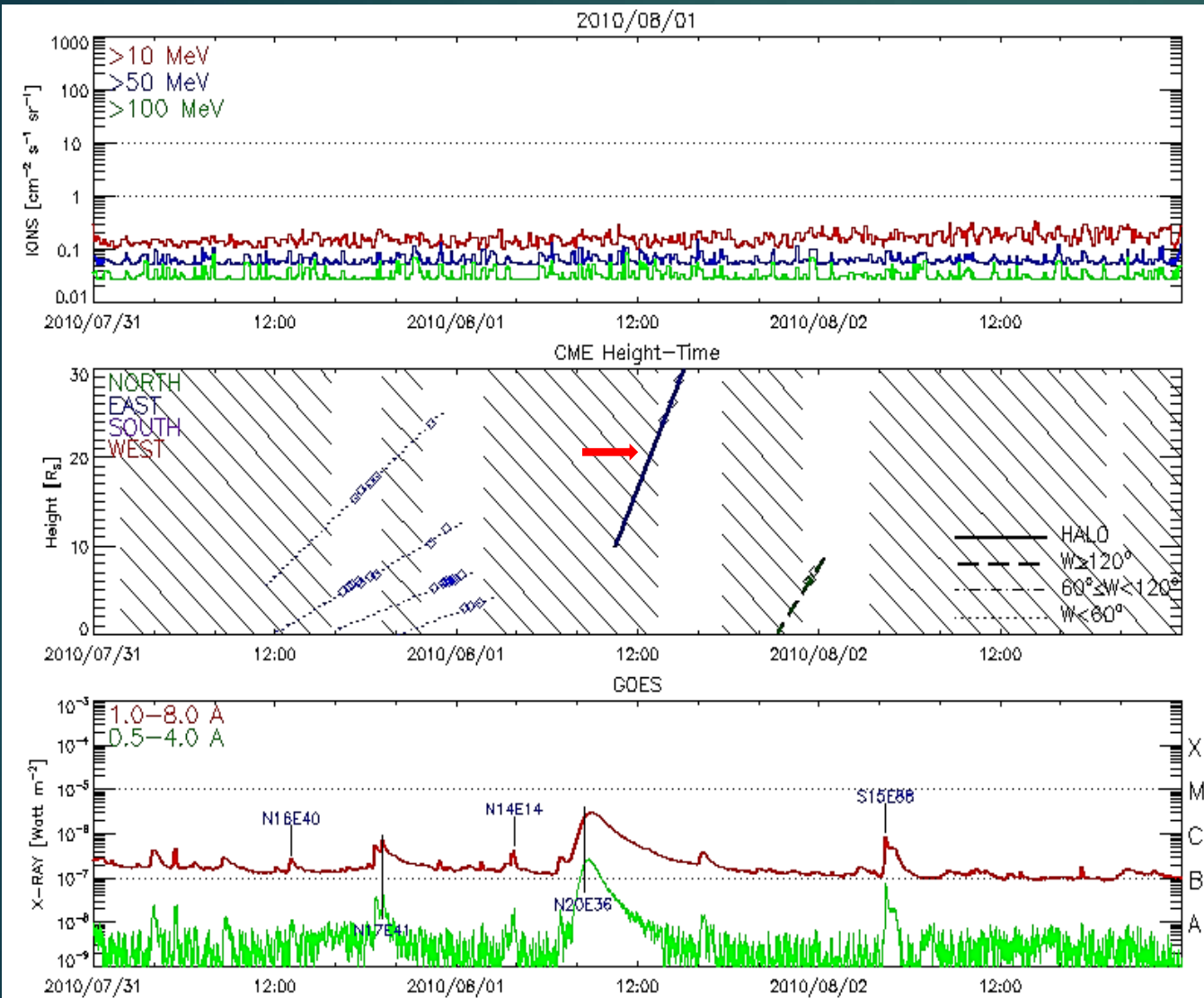


Shock 4 Aug
2010 0709
STEREO-B,
<http://ipshocks.fi/database>
No fig!

37 BKKA, 2010-08-03 16:51:21, 2010-08-03 16:51:21, 2010-08-03 16:51:21, 2010-08-03 16:51:21

▲ SC 03d 17h40m; ▲ SC 04d 10h19m

Event 2010.08.03



CME: 01d1342 (data gap) 850km/s ± 360
 Halo/84
 arriv 3d~15, dT=2

Flare
 01d0755 C3.2 N20E36
 Type II 01d0920-1730

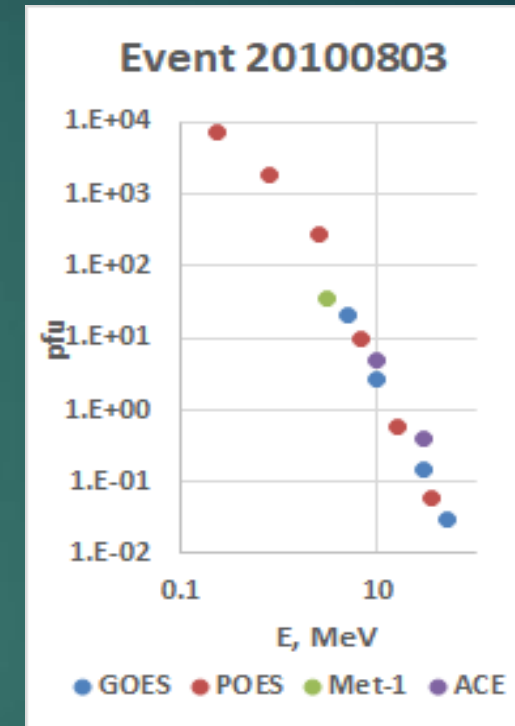
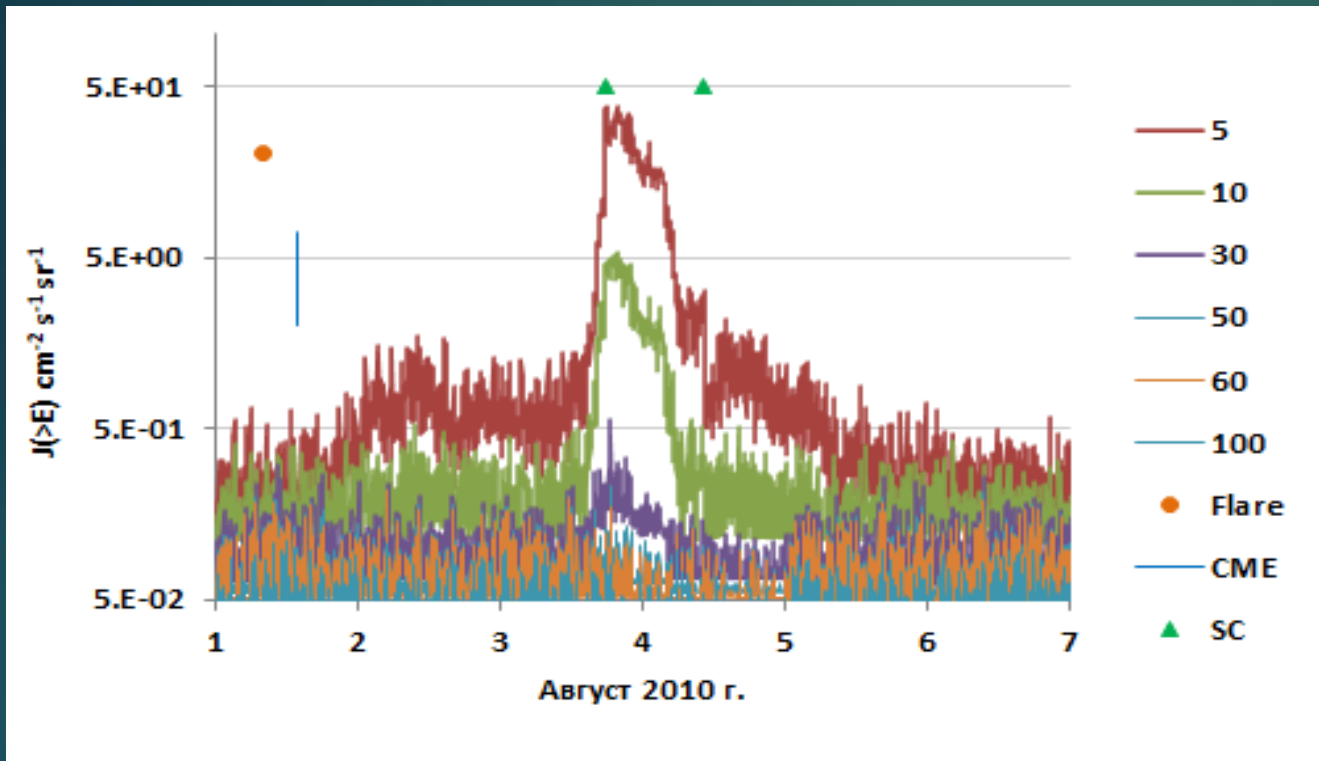
Richardson:
 2010/08/04 1000 2010/08/05

Event 2010.08.03

Particle event:

$T_0(E_p > 10 \text{ MeV}) - 03\text{d}10\text{h}$, $T_{\text{max}}(E_p > 10 \text{ MeV}) - 03\text{d}19\text{h}$,

29

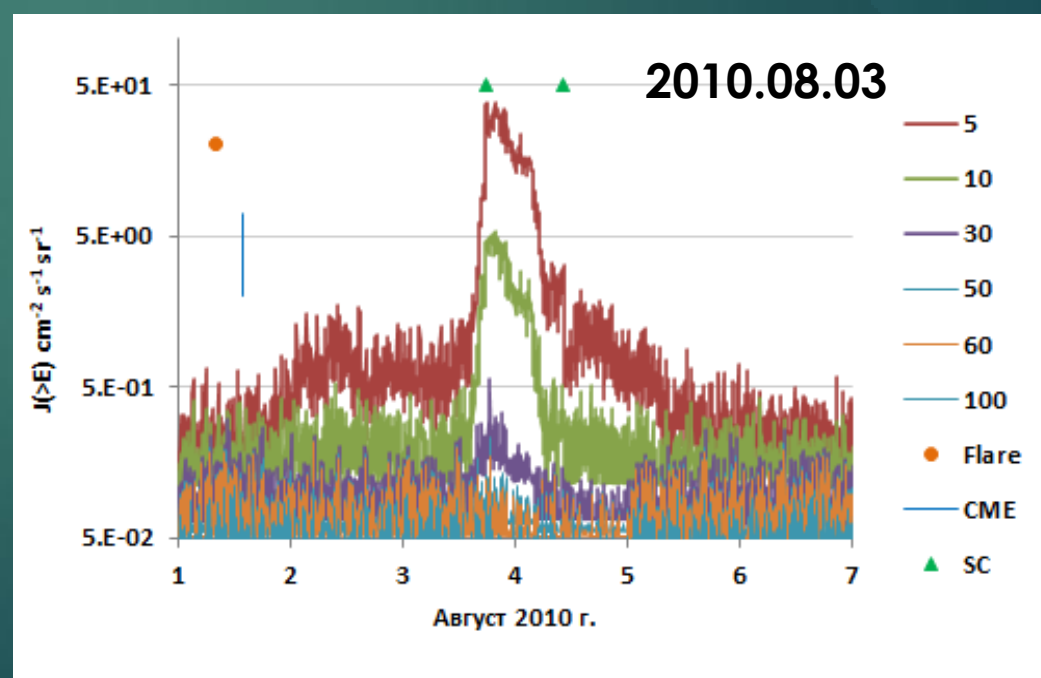
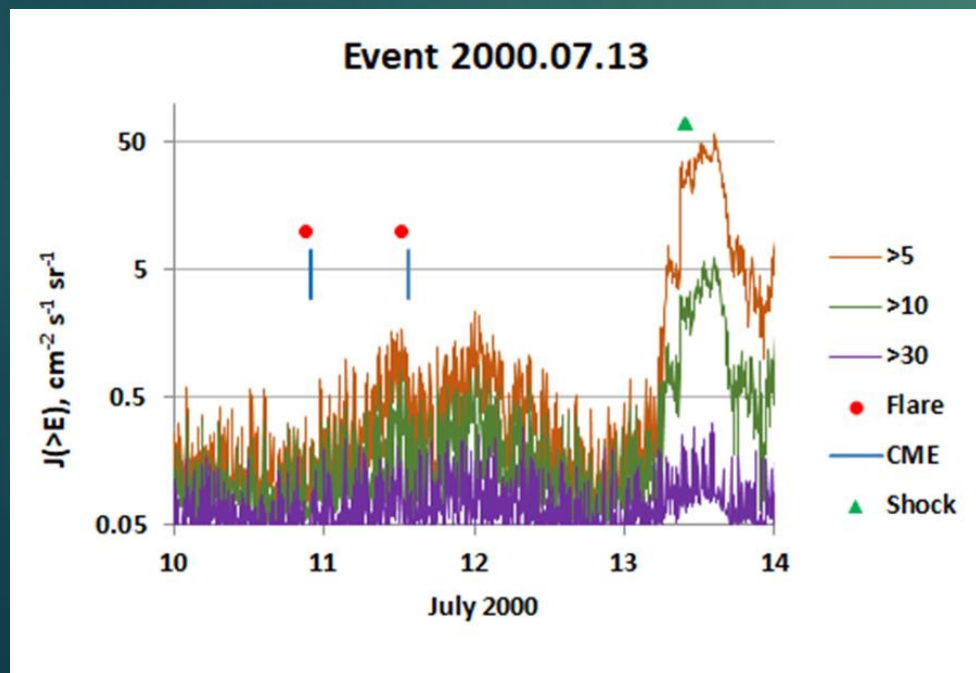
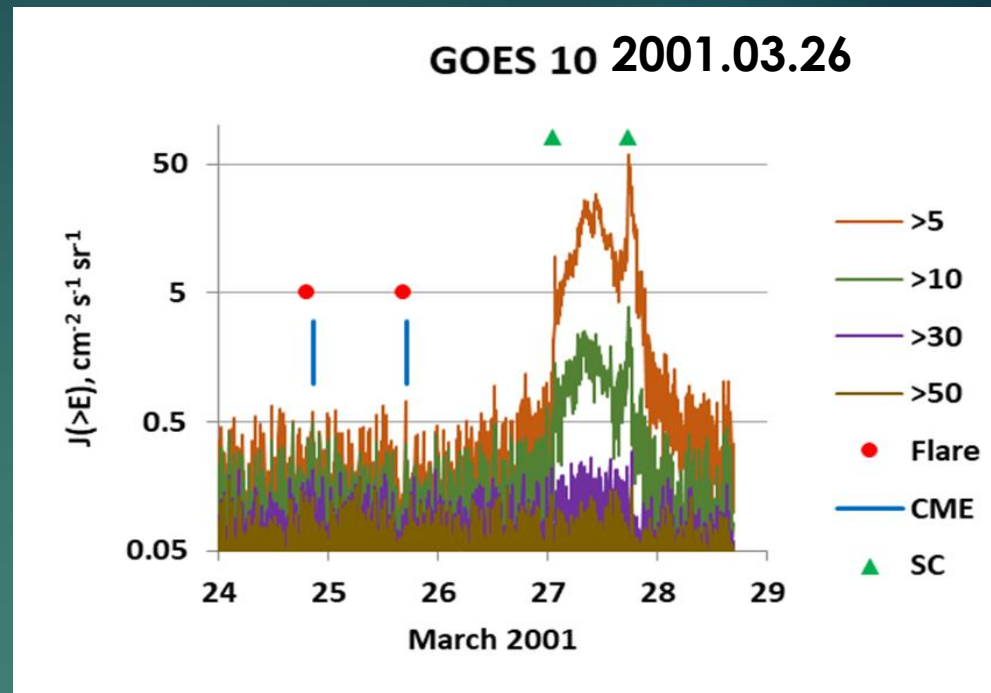
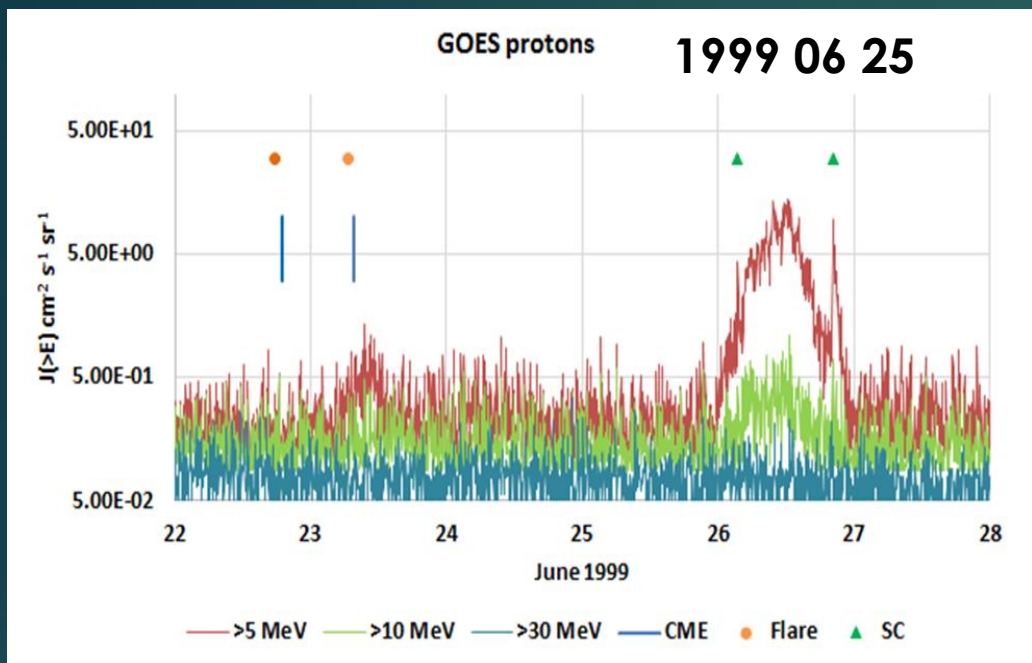


Вывод Событие представляет собой ESP.

КВМ 2010 08 01 13:42, Halo, PA84, скорость 850 km/s, Время распространения фронта **~52 час**. Вспышка 2010 08 01 07:55 C3.2 **N20E3**, Type II 2010 08 01 09:20-17:30

Два фронта ограничивают потоки частиц. Найден только один КВМ, но были большие пропуски в наблюдениях

Вспышка дала слабое возрастание потоков частиц на орбите Земли, не



Заключение

Таким образом, некоторые слабые солнечные протонные события, регистрируемые земным наблюдателем, являются частицами, ускоренными ударной волной в межпланетном пространстве. Им можно сопоставить вспышку и КВМ за десятки часов до наблюдаемого СПС, которые обеспечивают инжекцию частиц в процесс ускорения.

Имеется определенное сходство между исследованными событиями: потоки частиц наблюдаются между приходом 2-х ударных волн, т.е. область распространения ограничена двумя фронтами. Не ясно, насколько это важно для длительного существования потоков частиц. Доля таких событий пока не определена.

Спасибо
за внимание!