ПРЕДСКАЗАНИЕ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО СОЛНЕЧНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Струминский[1] А.Б., Садовский[1] А.М., Григорьева[2] И.Ю.

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия

[2]ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Прогноз 2023, ИЗМИРАН, 29-31 мая 2023 года

Необходимость предсказания в реальном времени

- **При космической деятельности желательно уметь предсказывать СПС -** временя начала, эволюцию временных профилей и спектров, время максимума и длительность спада потока протонов, а также его флюенса. **Наибольшую опасность представляют СПС с протонами >100 МэВ.**
- **Цель доклада** – показать, что именно нужно увидеть в SXR, HXR и радиоизлучении, и в характеристиках КВМ, чтобы увеличивать достоверность прогноза при наблюдении в реальном времени.
- Обсудим последовательность появления физических характеристик, каждая из которых добавляет новый физический смысл и может уточнить предсказание.
- **ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ** – солнечные электроны и протоны ускоряются одновременно стохастически в турбулентном электромагнитном поле при ускорении КВМ.

1. Новый магнитный поток

- «Для реального **прогноза** больших СВС **необходимо выявлять и определять характеристики нового ВМП**, чтобы он был **достаточно мощным (≥10^{13} Вб)** и **скорость** его всплытия была **достаточно велика (≥10^{9} Вб/сек)**. **Значимые вспышки появляются через 0.5–2d после обнаружения такого ВМП в АО**.» Ишков 2022, 2023
- «Период вспышечного энерговыделения (ПВЭ), за который осуществляется основная доля значимых вспышек в данной АО, в зависимости от степени её развития, характеристик её МП, мощности и скорости всплытия нового ВМП, составляет от 16 до 90h, в среднем 55±30h или 16% времени прохождения АО по диску Солнца.» Ишков 2022, 2023
- ***Выделение энергии – нагрев плазмы, рост SXR.***

2. Температура плазмы

- ***Ключевой момент*** – начало одновременного ускорения протонов с энергией >2 МэВ и электронов – вторая фаза ускорения.
- $E_e=E_p \cdot m_e/m_p$=2 МэВ/1836~1 кэВ ***~ 11 МК***
- Условие электро-нейтральности плазмы – «убегание» электронов и протонов с равными скоростями.
- **Температура плазмы определяется при измерении SXR излучения в двух энергетических каналах, например, GOES.**

3. Ускорение электронов >100 кэВ

- HXR или микроволновое излучение свидетельствует о появлении электронов с энергиями (*E)* >100 кэВ.
- Время ускорения солнечных электронов до *E* ~ 100 кэВ (от десятков до сотен миллисекунд), тогда время ускорения СП до *E* ~ 200 МэВ будет (m_p/m_e)-раз больше
- Разброс времени 1-го прихода СП с *E* >100 МэВ на орбиту Земли при длине распространения 1.3 а.е. будет составлять ~10 мин.
- ***Можно ожидать «ранний» и «поздний» приходы СП (< и > 20 мин) в зависимости от темпа ускорения электронов (10 МэВ/с и 1 МэВ/с) относительно начала HXR и микроволнового излучения.***

4. Радиоизлучение < 1415 МГц

- Отличительная особенность вспышек с КВМ и СП **– развитие процессов вверх в корону (излучение на частотах < 1415 МГц).**
- Радиоизлучение II и IV типов.

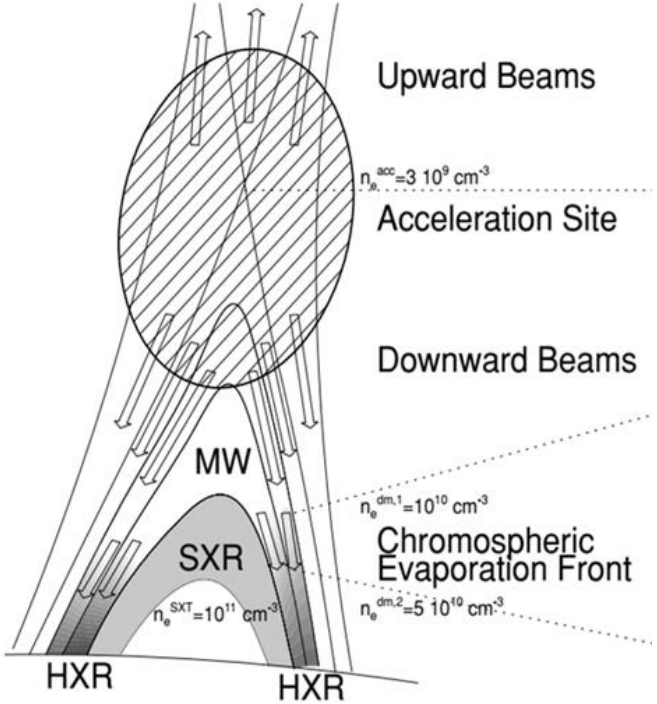
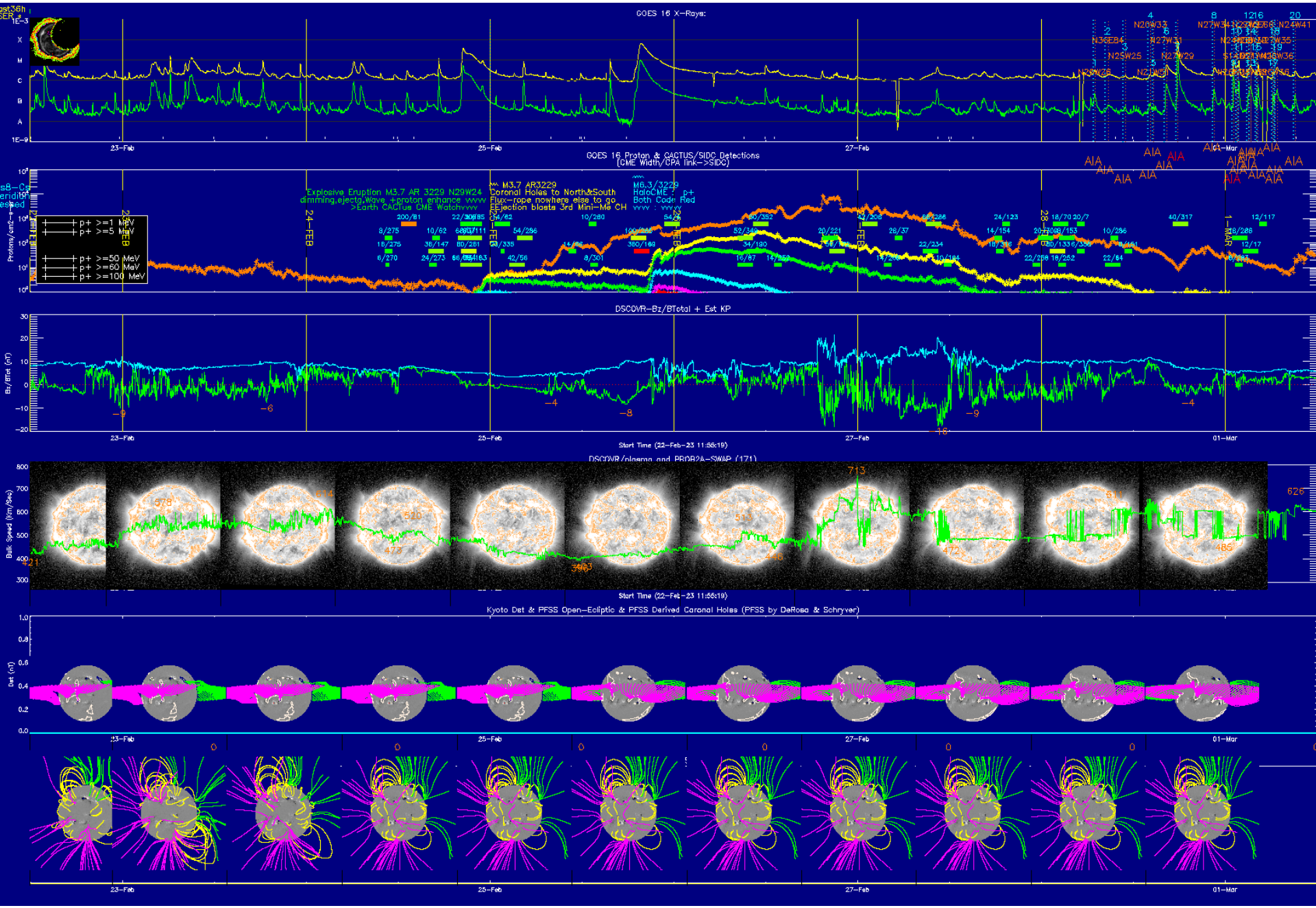


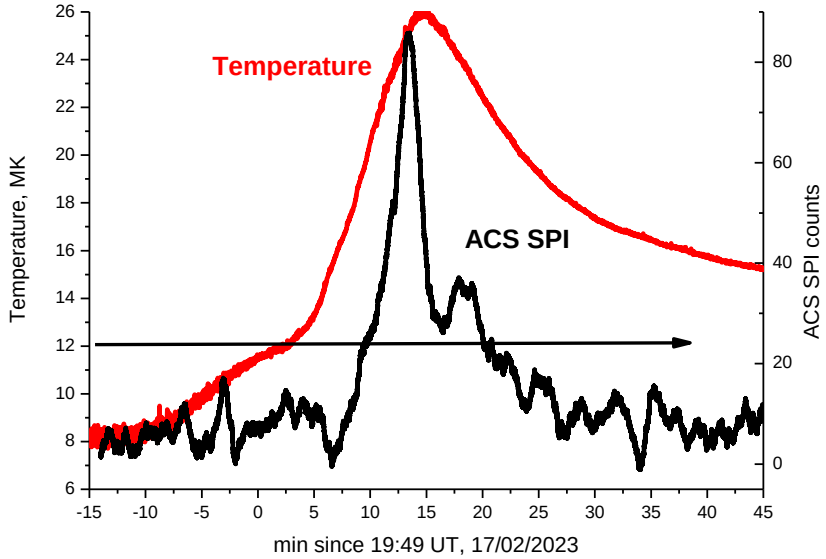
Fig.5. Aschwanden M.J., The localization of particle acceleration sites in solar flares and CMEs, Space Sc. Rev.. 124. 361. 2006

5. Наблюдение КВМ

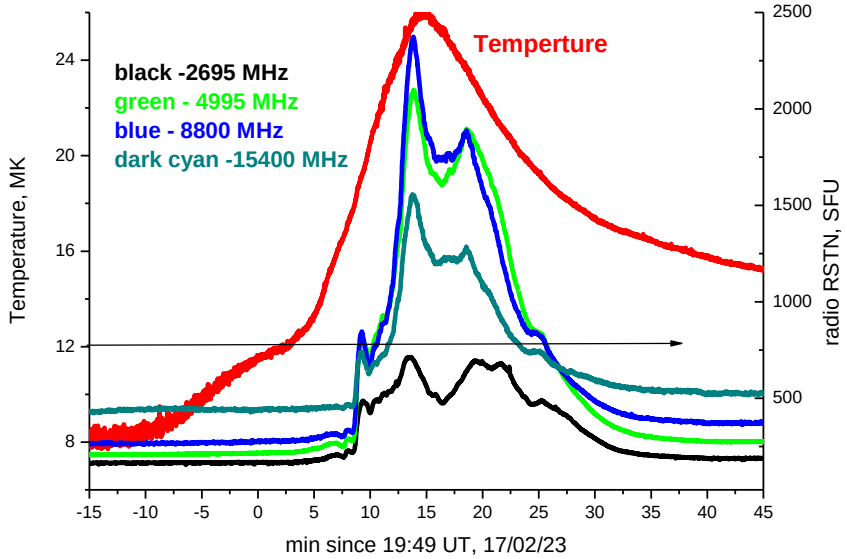
- КВМ способен как приносить ускоренные протоны на силовую линию, идущую к наблюдателю, так и уносить их от нее.
- В этом случае важным становится направление распространения КВМ, характеризуемое параметром **PA** (*Position Angle*).
- PA измеряется от направления на север против часовой стрелки. КВМ распространяется в плоскости эклиптики западной полусферы Солнца при PA ~ 270°. Значения угла, отличные от этого, ухудшают условия распространения СП.
- ***Направление распространения, скорость и ускорение*.**

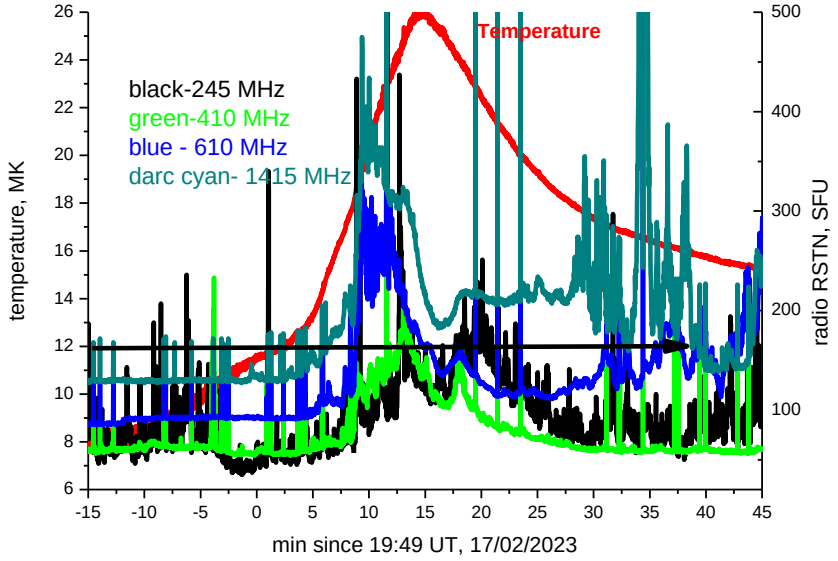

GOES 16 X-Rays:
23-Feb
25-Feb
27-Feb
01-Mar
GOES 16 Proton & CACTUS/SIDC Detections
(CME Width/GPA link->SIDC)
Explosive Eruption M3.7 AR 3229 N29W24
dimming,ejecta,wave + proton enhance www
>Earth CACTus CME Watchwwww
M3.7 AR3229
Coronal Holes to North&South
Flux-rope nowhere else to go
Ejection blasts 3rd Mini-Me CH
M6.3/3229
HaloCME ? p+
Both Code Red
www : wwww
p+ >=1 MeV
p+ >=5 MeV
p+ >=50 MeV
p+ >=60 MeV
p+ >=100 MeV
Protons/cm2-s-sr
24-FEB
DSCOVR-Bz/BTotal + Est KP
Bz/Btot (nT)
Start Time (22-Feb-23 11:55:19)
DSCOVR/plasma and PROBA2-SWAP (171)
Bulk Speed (km/sec)
Kyoto Dst & PFSS Open-Ecliptic & PFSS Derived Coronal Holes (PFSS by DeRosa & Schryver)
Dst (nT)

X2.2 (N25E64) 17/02/2023

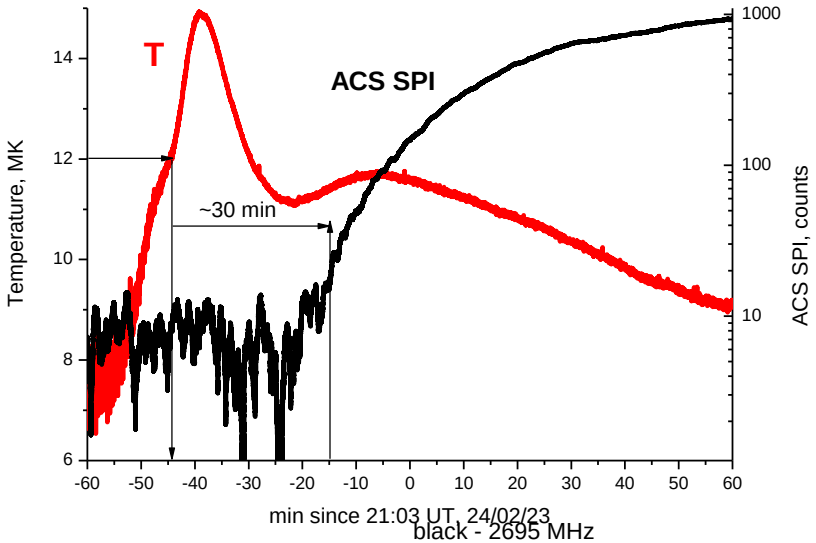


- <u>могла стать</u> источником СПС, если были бы благоприятные долготы, так как:
- ***1) T > 12МК > 90 мин***
- ***2) микроволновое излучение (15.4ГГц)***
- ***3) плазменное радио(<610МГц + II тип)***
- ***4) HXR > 100кэВ***
- ***5) Halo КВМ, 20:12 UT, V=1315 км/с, PA=56.***

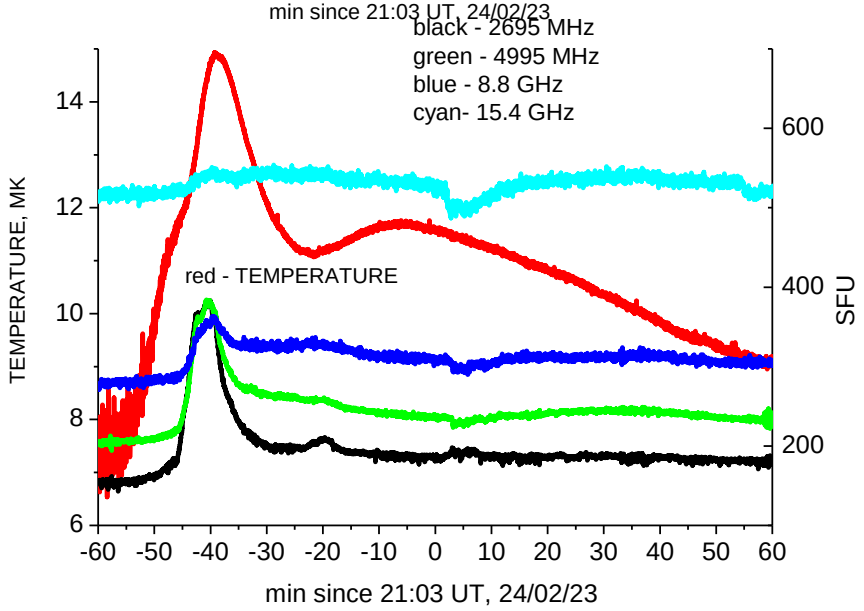


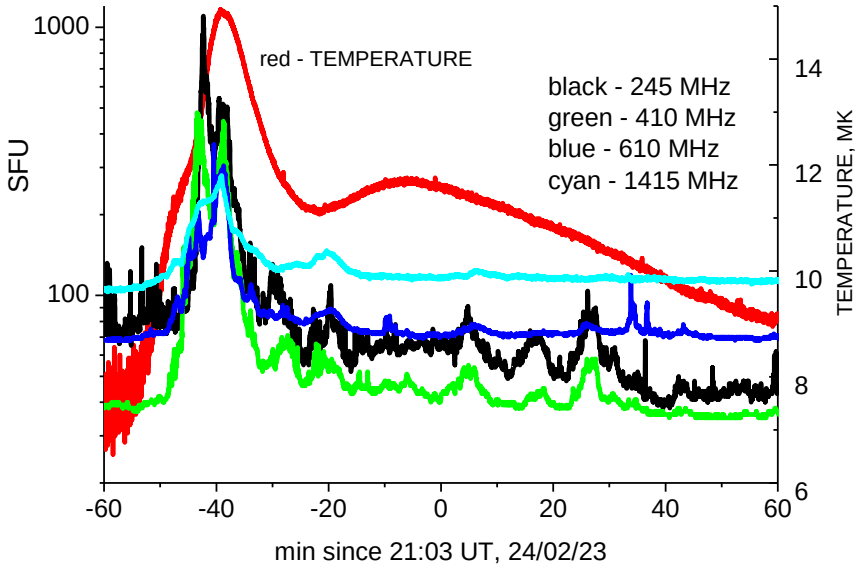


M3.7 (N28W28) 24/02/2023

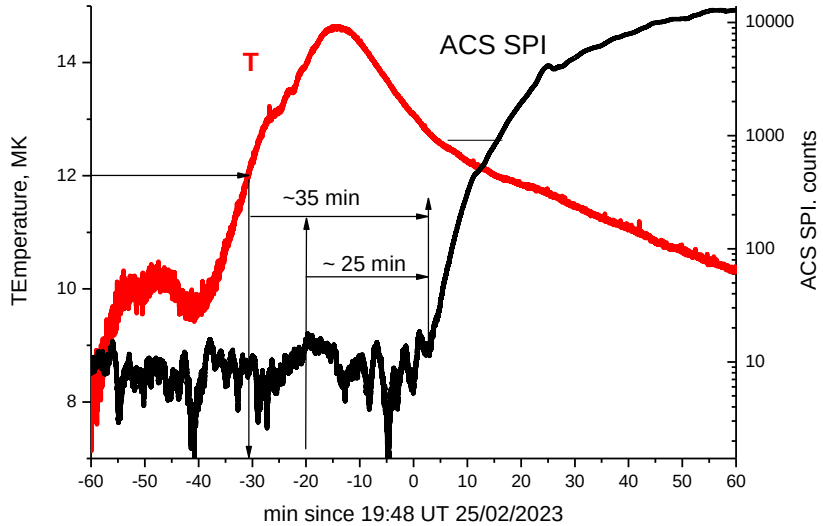


- <u>была</u> источником СП (3 pfu, E_{max} > 100 МэВ):
- 1) T > 12 МК ~15 мин
- 2) микроволновое излучение (<8.8 ГГц)
- 3) плазменное радио(< 610 МГц + IV тип)
- 4) Halo КВМ, 20:36 UT, V=1336 км/с, PA=345.

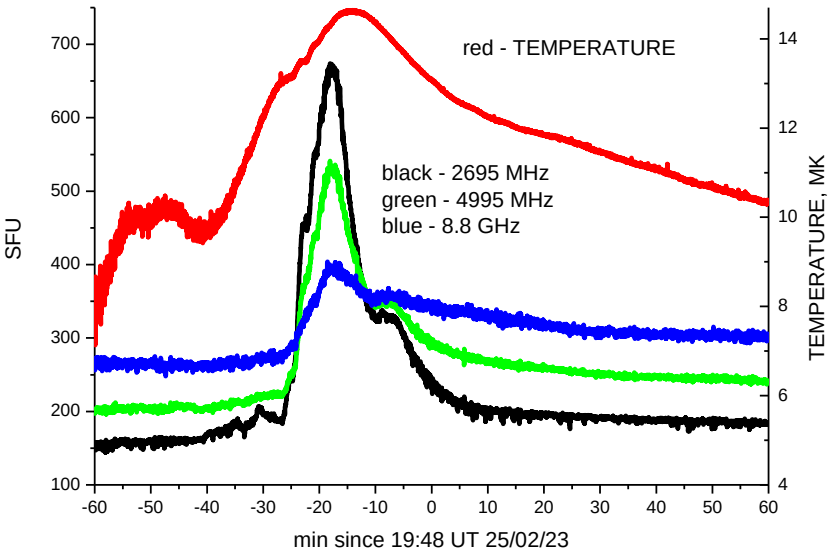


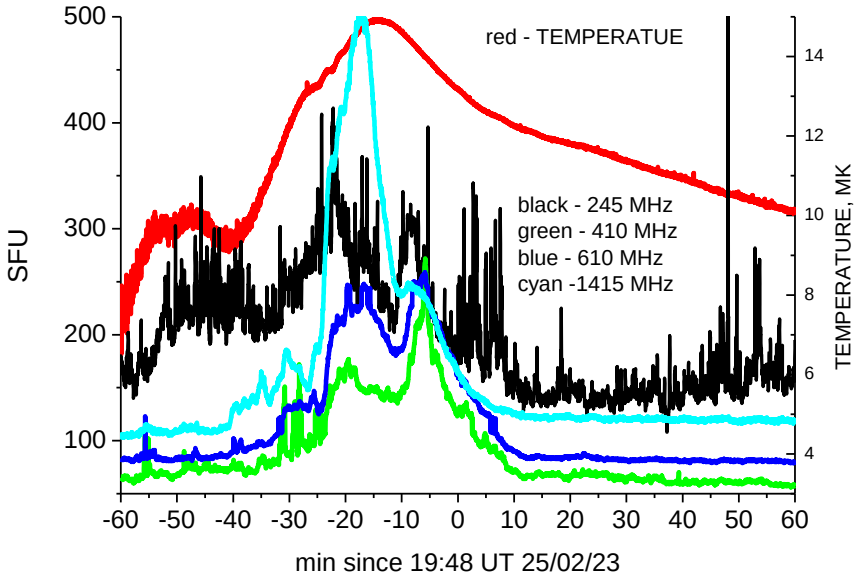


M6.3 (N26W43) 25/02/2023



- <u>было</u> СПС (35 pfu, E_{max} > 100МэВ),
- 1) T > 12 МК ~ 45 мин
- 2) микроволновое излучение (15.4ГГц)
- 3) плазменное радио (<610 Мгц + II тип)
- 4) Halo КВМ, 19:24UT, V= 1170 км/с, PA=294.





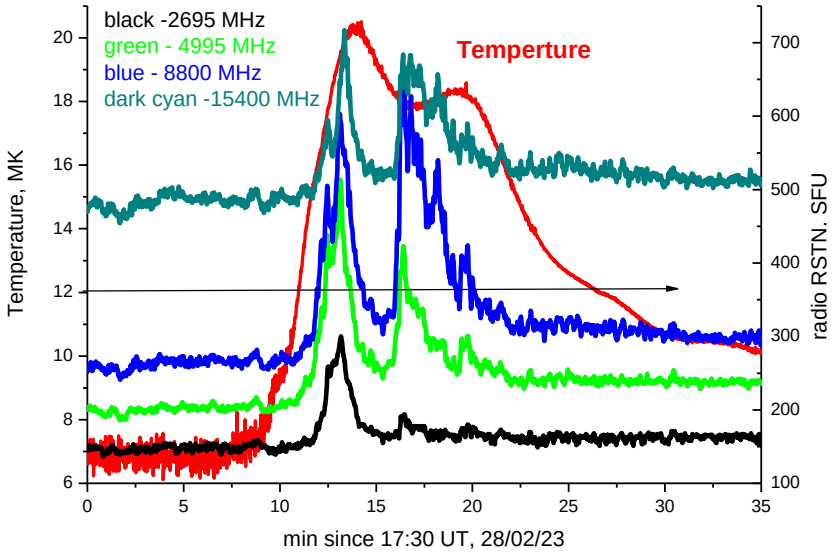
M8.6 (N27W29) 28/02/2023

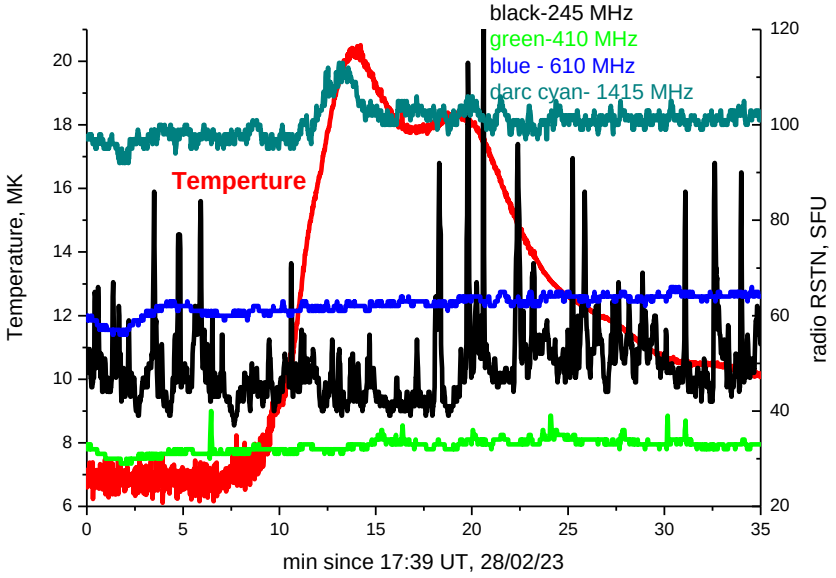
Несмотря на:

- 1) T >12 МК ~15 мин
- 2) микроволновое излучение (15.4 ГГц)
  (Soft-Hard-Harder не было)

не было 3) плазменного радио (410-610 МГц) и СП > 10 МэВ

не было 4) КВМ.





GOES Class Data	X2.2 17/02/23	M3.7 24/02/23	M6.3 25/02/23	M8.6 28/02/23
location	N25E64	N28W28	N26W43	N27W29
T >12 MK	> 90 min	~15 min	~45 min	~15 min
HXR (100 keV)	yes	none	none	none
microwaves	15.4 GHz	8.8 GHz	<5 GHz	15.4 GHz
MHz >610	yes	yes	yes	only 245 MHz
Radio type	II	IV	II	none
КВМ км/с, град	1315, 56	1336, 345	1170, 294	none
P >10 MeV	none	3 pfu	35 pfu	none
P >100 MeV	none	yes	yes	none

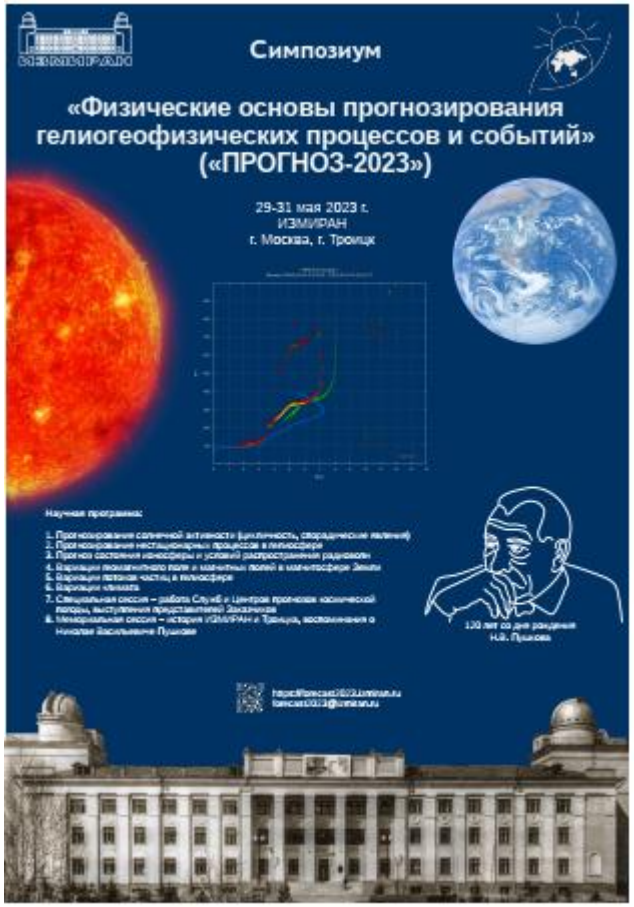
Ускорение протонов с E ~ 1 МэВ начинается при T плазмы >12 МК, развитие вспышки вверх (в корону) обеспечивает необходимую длительность (длину) для достижения энергий > 10 МэВ.

В M8.6, процессы ускорения не развивались в корону непрерывно, а были локализованы в плазме с плотностью > $2.5 \cdot 10^{10}$см$^{-3}$ (частота >1415 МГц).

Наблюдение микроволн (>2 ГГц) и/или HXR (> 100кэВ) не является необходимым условием, так как зависит от свойств среды, в которой происходит излучение.

ВЫВОДЫ

- Предложена последовательность появления физических характеристик для предсказания протонных событий в реальном времени. Каждая характеристика добавляет новый физический смысл, который уточняет предсказание.
- Для предсказания необходимо наблюдать в реальном времени:
  1) магнитное поле активной области и крупномасштабное поле
  2) SXR излучение в 2-ух энергетических каналах
  3) микроволновое (>3 ГГц) или HXR излучение
  4) плазменное радиоизлучение на частотах <1415 МГц, II /IV типы
  5) КВМ (V, ускорение, PA)
- ***Для количественного предсказания времени начала, максимума и величины протонного потока, а также его флюенса, необходимо создание статистических регрессионных моделей, основанные на всех 5 перечисленных характеристиках всех зарегистрированных солнечных протонных событий.***



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Струминский А.Б., Садовский А.М. (ИКИ РАН),

Григорьева И.Ю. (ГАО РАН)