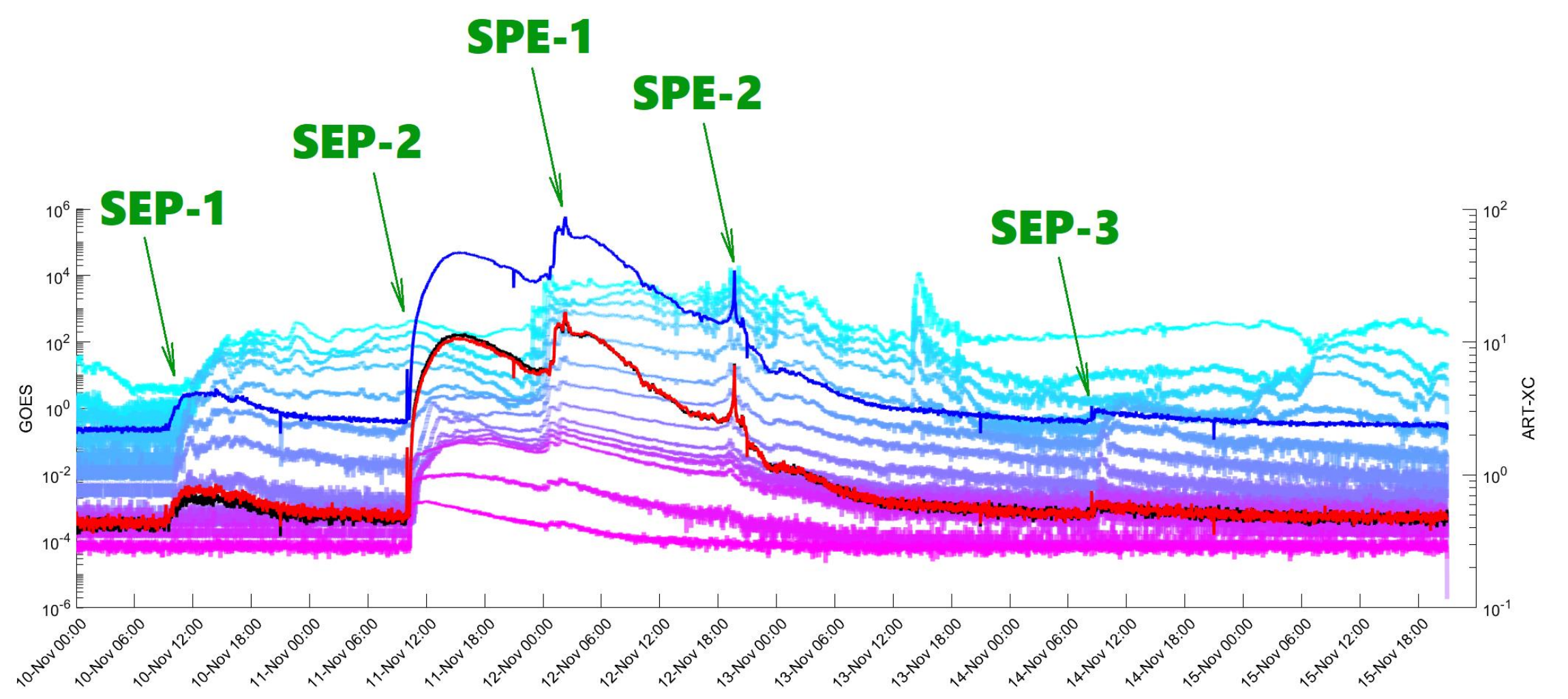


СПЕКТРЫ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ НОЯБРЯ 2025 ГОДА ПО ДАННЫМ GOES И КАЛИБРОВКА HXR-ДЕТЕКТОРОВ ART-XC

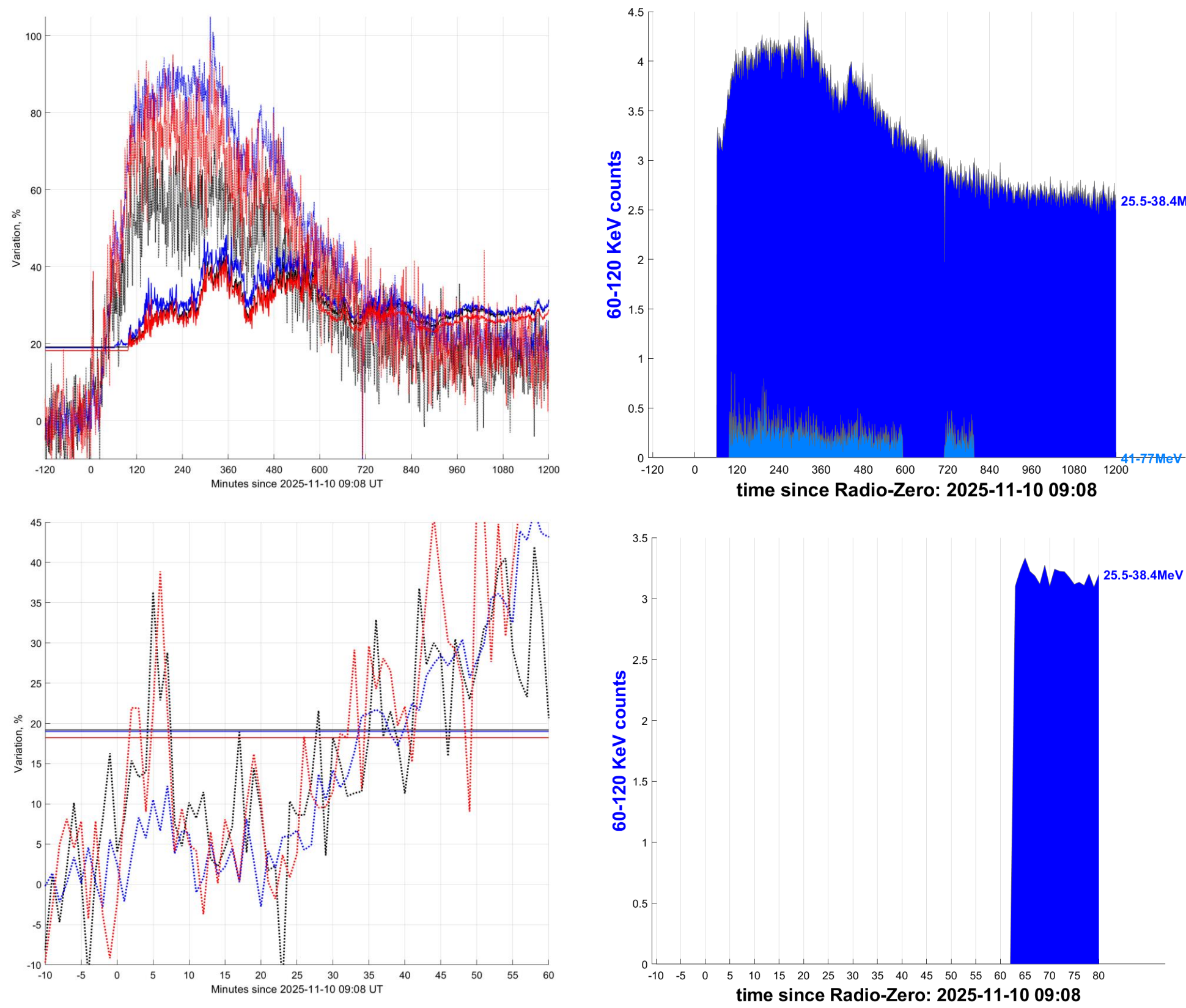


В.А.Ожередов¹,
А.Б.Струминский¹,
И.Ю.Григорьева²

¹ИКИ РАН ²ГАО РАН
ozheredov2016@gmail.com



Событие 10-Nov-2025



Теория и методы

Разложение сигнала ART-XC по сигналам детекторов GOES

Пусть $\{A_g(t)\}_{g=1}^3$ – сигнал жесткого рентгена с одного из трех доступных каналов ART-XC (20-40, 40-60, 60-120 keV), а $\{G_i(t)\}_{i=1}^{14}$ – совокупность сигналов с 14-ти дифференциальных каналов GOES. Под калибровкой канала A_g мы понимаем поиск его инструментальной функции, т.е. коэффициентов $p_a^1, p_a^2, \dots, p_a^{14} \geq 0$ таких, что

$$\|A_g(t) - \sum_{i=1}^{14} p_a^i G_i(t)\|^2 \rightarrow \min \quad (\text{разложение по базису}).$$

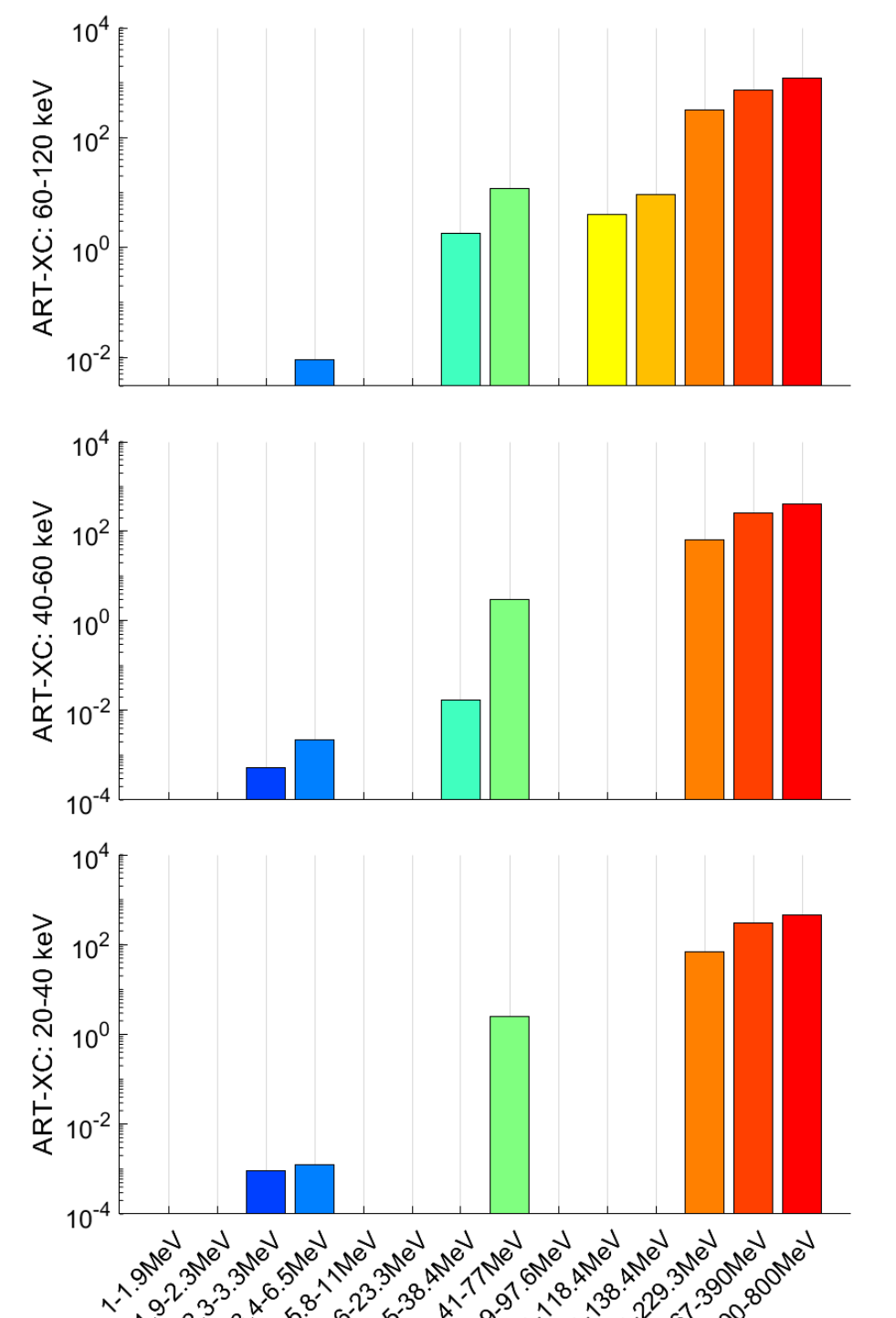
Метод **Лоусона-Хэнсона** выделяет минимальное подмножество базисных компонент с ненулевыми коэффициентами разложения, откуда можно вывести минимальную энергию протонов, которую «чувствует» ART-XC.

Оценка верхней границы фона и начала протонного возрастания

Если $\nu(t)$ – фон с амплитудой D и ξ – произвольный уровень, то функция $f(\xi) = \sum_i \nu(t) \psi(\nu)$ имеет максимум на его верхней границе. Здесь

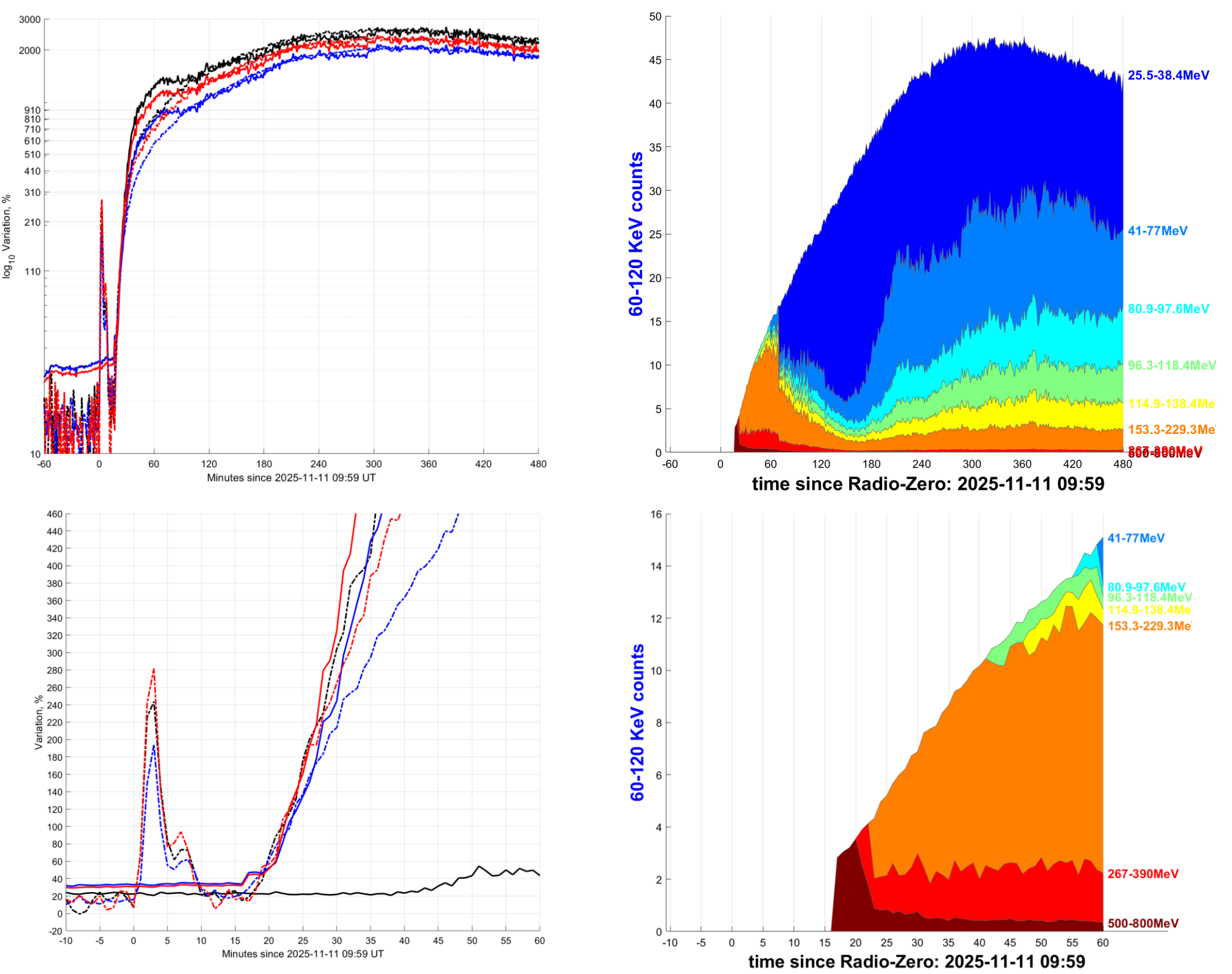
$$\psi(\nu) = \begin{cases} \frac{\nu - \xi}{2D} + 1, & \nu < \xi \\ \frac{\nu - \xi}{2D} - 1, & \nu \geq \xi \end{cases}$$

В качестве $\nu(t)$ выступает двухчасовой фрагмент сигнала GOES до начала события. Начало протонного возрастания это левая граница односвязного отрезка длиной более 40 мин, на котором сигнал превышает полученную этим методом верхнюю границу фона. Аналогично, начало расхождения протонных сигналов с ART-XC A_g и A_p – это момент времени, когда $|A_g - A_p|$ начинает устойчиво превышать фон.

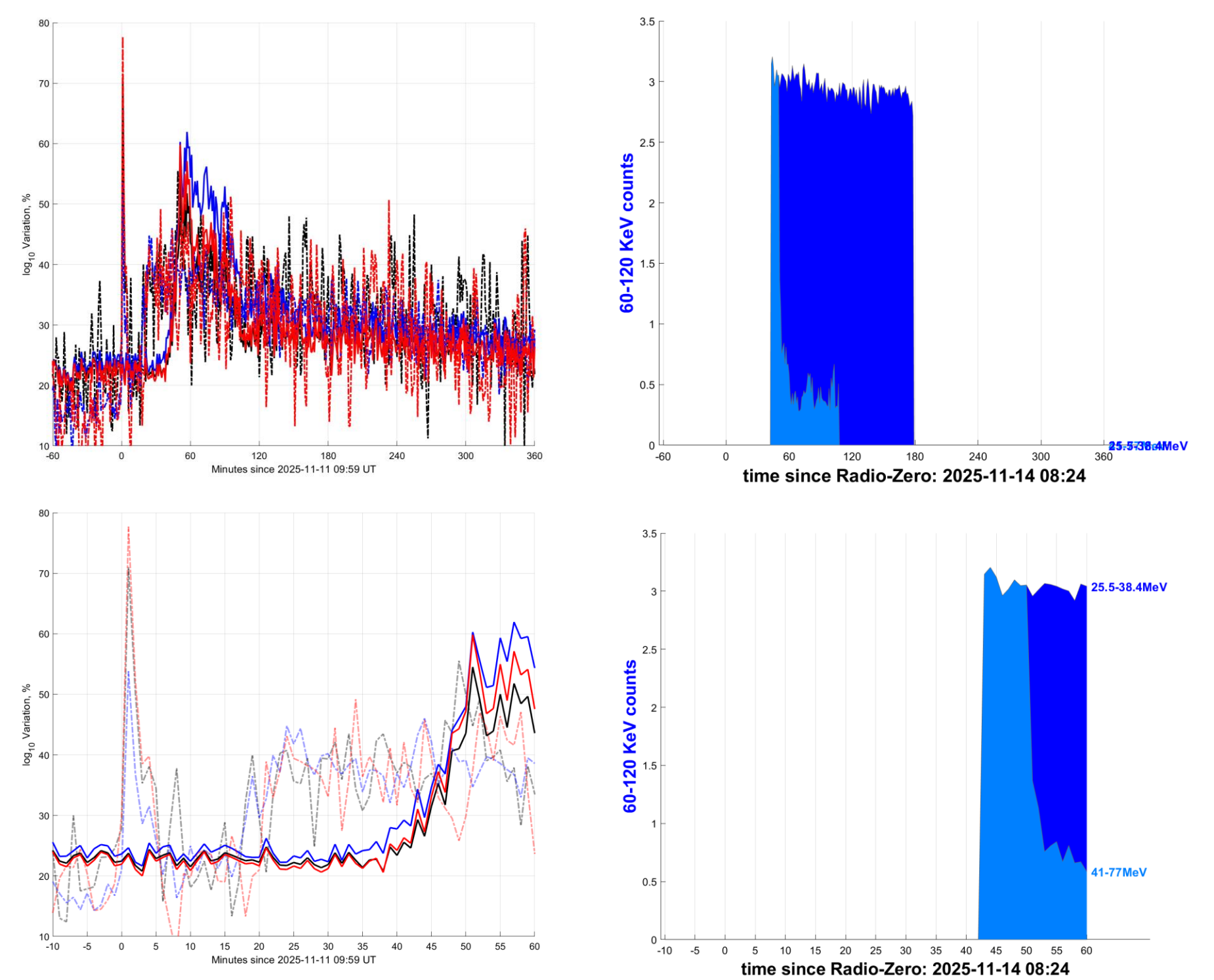


Инструментальные функции каналов ART-XC

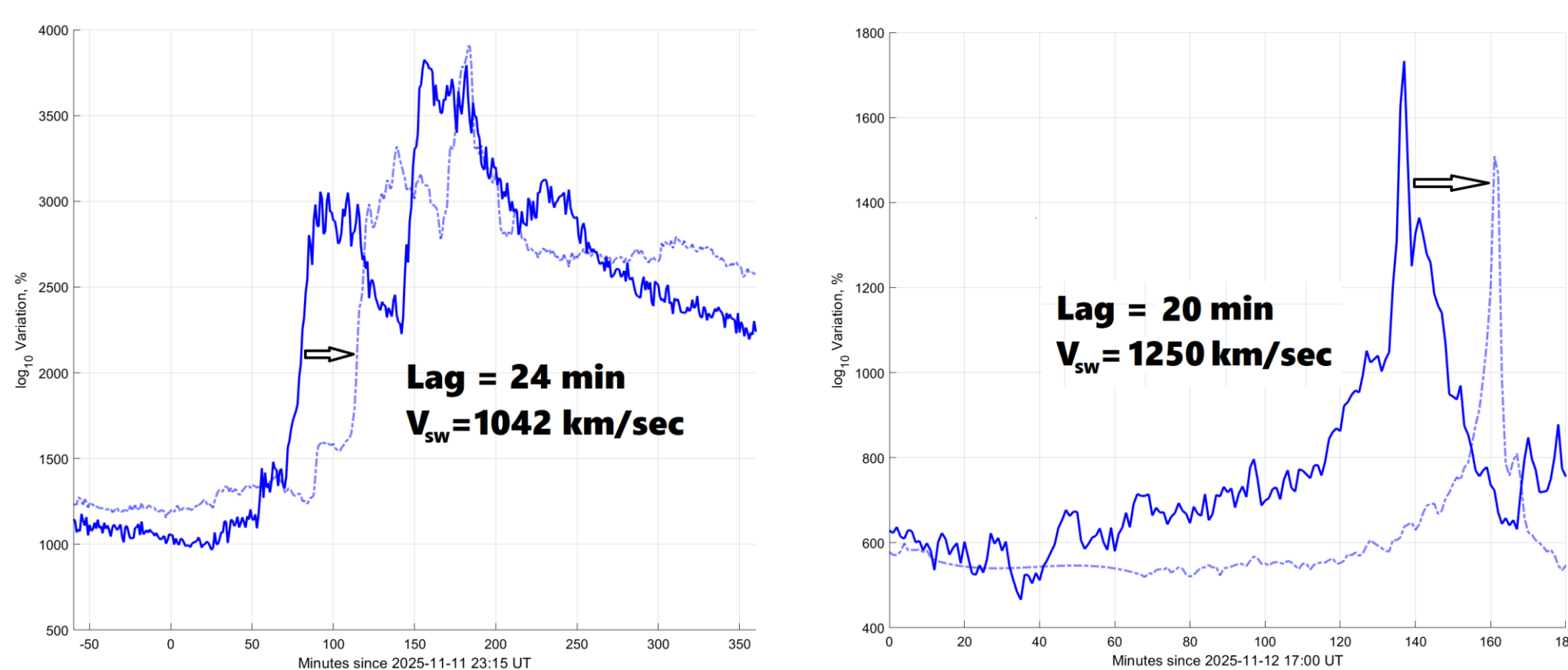
Событие 11-Nov-2025



Событие 14-Nov-2025



Storm Particle Events 11-12 Nov 2025



Начала возрастания и оценки электрического поля

Жесткость спектра первичного рентгеновского возрастания коррелирует с оценкой средней напряженности электрического поля по времени регистрации вторичного HXR-пика от солнечных протонов

Энергия протона, MeV	50	100	300	500	1000
Импульс протона, MV	310	444	808	1090	1696
Лоренц-фактор	0,31	0,43	0,65	0,76	0,87
Время запаздывания	27	17	8,3	6	4,1
Среднее поле для 21-й минуты прихода протонов		4,20E-05	3,00E-05	3,50E-05	5,00E-05
Среднее поле для 17-й минуты прихода протонов			4,20E-05	5,90E-05	6,70E-05
Среднее поле для 16-й минуты прихода протонов				1,70E-04	4,80E-05

Выводы

- Было выполнено разложение сигнала с трех каналов ART-XC по базису из сигналов с дифференциальных каналов GOES с предварительной фильтрацией фона
- ART-XC регистрирует вторичное жесткое рентгеновское излучение, являющееся откликом на приход протонов с энергией более 30 MeV. На настоящий момент разницу в минимальной энергии для разных каналов ART-XC найти не удалось, однако пара каналов 20-40 и 40-60 keV видит момент изменения спектра, когда в нем начинают преобладать протоны с энергией менее 40 MeV, что указывает на различие минимальных энергий в этих каналах. Это согласуется с минимальной энергией по оценкам SOHO/EPHIN 25-53 MeV для других событий
- Запаздывание максимумов SPE-возрастания ART-XC относительно максимумов GOES соответствуют распространению протонов в магнитных структурах солнечного ветра