Кросс-корреляционный анализ задержки протонных потоков EPHIN–GOES

39-я Всероссийская конференция по космическим лучам · Дубна, ОИЯИ

И. И. Давыденков, В. А. Ожередов

СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ · СОБЫТИЕ 10 МАЯ 2024

Физическая постановка задачи

Геометрия наблюдений

Аппарат SOHO находится в точке Лагранжа L1 (~1,5 млн км от Земли) и регистрирует протонные потоки раньше, чем они достигают геостационарной орбиты. GOES-18 работает на GEO и измеряет те же частицы с некоторой задержкой.
Для быстрых протонов ожидается почти баллистический пролёт отрезка L1–GEO. Однако на длинном временно́м интервале профиль события отражает не только прямой приход частиц, но и перенос плазмы, КВМ и магнитных структур солнечного ветра.

Ключевая задача

Отделить первый быстрый приход высокоэнергичных протонов от последующей эволюции временного профиля, обусловленной конвективным переносом межпланетных структур.

- Задержка между L1 и GEO несёт информацию о физическом механизме распространения SEP-частиц.

Данные и энергетические каналы

SOHO / EPHIN

Канал **P25**: 25–41 МэВ
Позиция: точка Лагранжа L1. Минутное временно́е разрешение.

GOES-18

Канал **P7**: 25,5–38,4 МэВ
Позиция: геостационарная орбита (GEO). Минутное разрешение.

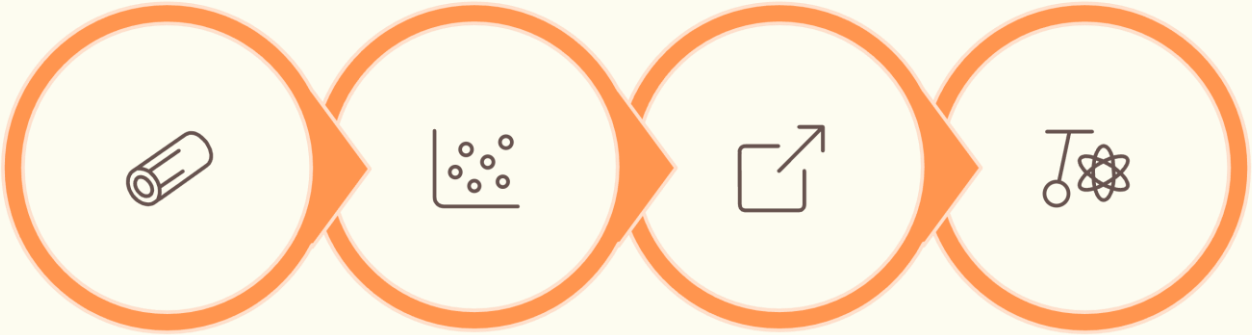
Временной интервал

10–11 мая 2024, 24 часа на минутной сетке. Выбрана активная фаза события SEP.

Солнечный ветер

OMNI HRO 1MIN: медиана скорости **Vsw ≈ 450 км/с** в окне события.
Расстояние L1–GEO: **1,496 млн км**.

Метод: кросс-корреляция временных рядов



Логарифмирование

Вычисление r(τ)

Выбор τ*

Физическая интерпретация

Перевод потоков в логарифмическую шкалу и нормировка позволяют сравнивать форму временного профиля независимо от абсолютной калибровки приборов. Коэффициент корреляции Пирсона r(τ) вычисляется для каждого значения сдвига τ; задержка τ* определяется положением глобального максимума функции r(τ).

Основной результат: событие 10 мая 2024

75

мин — τ^*

Сдвиг при максимуме кросс-корреляции

0.928

$r(\tau^*)$

Коэффициент корреляции в максимуме

14

мин — L/v_p

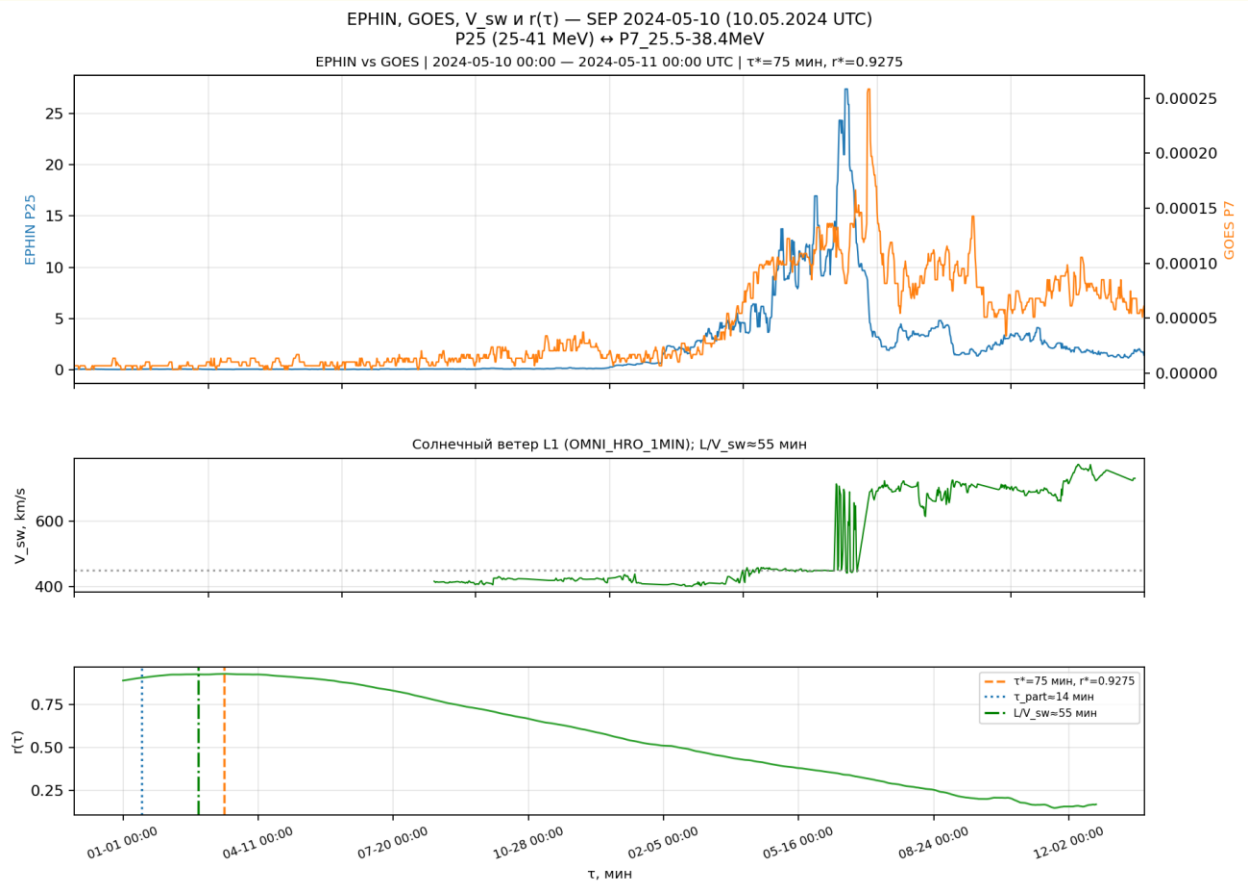
Баллистический пролёт быстрых протонов

55.4

мин — L/V_{sw}

Конвективный перенос при $V_{sw} \approx 450$ км/с

Максимальное совпадение формы временных рядов достигается при сдвиге GOES относительно EPHIN на 75 минут, при этом коэффициент корреляции составляет 0.93. Для сравнения, ожидаемое время прямого пролёта быстрых протонов составляет около 14 минут, а характерное время переноса со скоростью солнечного ветра около 55 минут. Это показывает, что на суточном интервале задержка отражает не только первый быстрый приход частиц, но и более длительную структуру события, связанную с переносом плазмы и КВМ. Метод позволяет разделять быстрый начальный приход протонов и последующие фазы события, связанные с солнечным ветром.



Верхняя панель: форма временных рядов EPHIN 25-41МэВ и GOES 25.5-38.4 МэВ за период 10-11 мая 2024.
Средняя панель: скорость солнечного ветра.
Нижняя панель: зеленая кривая это зависимость корреляции между рядами EPHIN и GOES на верхней панели от сдвига по времени. Оранжевая вертикальная линия э

Почему $\tau^* = 75$ мин больше баллистического времени?

Чувствительность к форме всего профиля

Кросс-корреляция на 24-часовом окне оптимизирует сходство *всего* временного профиля, а не только первого фронта. Даже если начальный приход соответствует $L/v_p \approx 14$ мин, он вносит малый вклад в интегральную меру сходства.

Роль поздних фаз SEP-события

Основное структурное сходство профилей EPHIN и GOES формируется в более поздних фазах события — в период, когда потоки частиц модулируются магнитными структурами КВМ и оболочкой межпланетного возмущения.

Конвективный масштаб времени

Полученное $\tau^* \approx 75$ мин согласуется с масштабом конвективного переноса ($L/V_{sw} \approx 55$ мин), что указывает на определяющую роль плазменных структур в формировании задержки сходства профилей.

Физическая интерпретация τ* = 75 мин

Величина τ*≈75 мин не является временем пролёта одного протона. Это **эффективная задержка сходства временных профилей** в близких энергетических каналах. Сравнение с L/Vsw≈55 мин демонстрирует значительный вклад конвективного переноса и структуры межпланетного возмущения в наблюдаемую задержку.

Возможности метода для исследований космических лучей

Сопоставление измерений L1 и GEO

Метод позволяет систематически сопоставлять наблюдения частиц на борту L1 (SOHO, ACE, Wind) с данными геостационарных спутников GOES, формируя единую наблюдательную базу для SEP-событий.

Маркер механизма распространения

Сравнение τ^* с L/vp и L/Vsw даёт наблюдательный критерий различия между прямым приходом частиц и переносом в плазменных структурах.

Прикладные задачи

Диагностика SEP-профилей, идентификация GLE-кандидатов, оценка радиационной обстановки у Земли — метод применим к оперативному мониторингу космической погоды.

Расширение на каталог

Алгоритм легко масштабируется на каталог событий и различные энергетические каналы, обеспечивая статистически значимые выводы о задержках для разных классов SEP.

Ограничения и контрольные проверки

Текущие ограничения

→ **Статистика:** один 24-часовой интервал не представляет всё разнообразие классов SEP-событий по интенсивности, спектру и геометрии.

→ **GOES на GEO:** измерения чувствительны к локальным условиям магнитосферы, а также к межспутниковым калибровочным различиям между поколениями GOES.

→ **Энергетические каналы:** диапазоны EPHIN P25 и GOES P7 близки, но не идентичны по границам, что вносит систематику в оценку τ^*.

Необходимые проверки

- Устойчивость τ^* к выбору длины временнóго окна (6, 12, 24 ч)
- Влияние сглаживания временного ряда на положение максимума $r(\tau)$
- Зависимость τ^* от энергетического канала (кросс-проверка по нескольким каналам)
- Верификация на расширенном списке событий с различными условиями солнечного ветра

Выводы

Главный результат

Для события 10 мая 2024 максимум сходства временных профилей EPHIN–GOES достигается при **τ*=75 мин** с высоким коэффициентом корреляции **r=0,93**.

Сравнение масштабов

τ* существенно превышает баллистическое время **L/vp≈14 мин** и близко к масштабу конвективного переноса **L/Vsw≈55 мин**.

Физический смысл

Задержка τ* отражает не только первый быстрый приход частиц, но и длительную структуру SEP-события, связанную с переносом в межпланетных магнитных структурах.

Дальнейшие шаги

Расширение анализа на каталог событий **2024–2025**, статистика задержек по каналам и энергиям, верификация метода на независимых инструментах.

Метод кросс-корреляции задержки открывает возможности для систематической диагностики SEP-событий в реальном времени и в рамках архивных исследований.

Спасибо за внимание

Давыденков И И
davydenkov.ii@phystech.edu
Ожередов В А ozheredov2016@gmail.com