

СТОХАСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТРИКИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Сухарева Н.А., Антонов Ю.А., Захаров В.И., Мягкова И.Н.

25 –29 мая 2026 года

Постановка задачи

- На основе эмпирических временных рядов спутникового мониторинга, регистрируемых в фазовом пространстве состояний вектора скорости потока солнечной плазмы, определить структуру количественных метрик исследуемого процесса.
- Для стохастических уравнений распространения потоков целесообразно рассматривать в качестве базисных собственные функции пространственных статистических моментов низших порядков или соответствующие им кумулянты.
- Пусть исследуемая система описывается стохастическим уравнением Ито, которое для случайного процесса $X(t)$ имеет вид:

$$\frac{X(t)}{dt} = a(t) + b(t)dW(t) \quad (1)$$

где $W(t)$ - стандартный винеровский процесс. Коэффициенты дрейфа $a(t)$ и диффузии $b(t)$, вообще говоря, случайны.

Методика исследования

- Данные спутникового мониторинга, передаваемые с аппарата WIND, расположенного в точке либрации L1, считываются с шагом дискретизации в 60 секунд после выравнивания областей с пропусками и синхронизации счетчиков событий временного ряда.
- Для трех проекций компонент вектора индукции межпланетного магнитного поля и трех компонент вектора скорости потоков плазмы формируются ансамбли состояний и вычисляются младшие статистические моменты.
- Статистически значимую область реализуемых состояний для каждого из создаваемых проекционных отображений, определим как ограниченную по периметру профилем второго центрального статистического пространственного момента для каждой выборки, в том числе выборок с агрегацией.
- Для каждого из сформированных статистических ансамблей определяем набор количественных метрик, на основе которых будут реконструироваться искомые характеристики анализируемого процесса.

Пространственные моменты первого порядка – нестационарный дрейф математического ожидания, определяет переменную $a(t)$

$$M_x^{(1)Z} = \frac{\sum \sum_{i,j} iP_Z(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_Z(i,j)}, \quad M_y^{(1)Z} = \frac{\sum \sum_{i,j} jP_Z(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_Z(i,j)}, \quad (2)$$

$$M_y^{(1)X} = \frac{\sum \sum_{i,j} iP_X(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_X(i,j)}, \quad M_z^{(1)X} = \frac{\sum \sum_{i,j} jP_X(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_X(i,j)}, \quad (3)$$

$$M_z^{(1)Y} = \frac{\sum \sum_{i,j} iP_Y(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_Y(i,j)}, \quad M_x^{(1)Y} = \frac{\sum \sum_{i,j} jP_Y(i,j)}{\sum \sum_{i,j} P_Y(i,j)}, \quad (4)$$

Пространственные моменты второго порядка – нестационарная дисперсия функции распределения вероятности, определяет переменную $b(t)$

$$M_{xx}^{(2)Z} = \frac{\sum \sum_{i,j} (i - M_x^{(1)Z})^2 P_Z(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Z(i, j)}, \quad M_{yy}^{(2)Z} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)Z})^2 P_Z(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Z(i, j)} \quad (5)$$

$$M_{xy}^{(2)Z} = \frac{\sum \sum_{i,j} (i - M_x^{(1)Z})(j - M_y^{(1)Z}) P_Z(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Z(i, j)}, \quad (6)$$

$$M_{yy}^{(2)X} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)X})^2 P_X(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_X(i, j)}, \quad M_{zz}^{(2)X} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)X})^2 P_X(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_X(i, j)}. \quad (7)$$

$$M_{yz}^{(2)X} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)X})(j - M_y^{(1)X}) P_X(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_X(i, j)}, \quad (8)$$

$$M_{zz}^{(2)Y} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)Y})^2 P_Y(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Y(i, j)}, \quad M_{xx}^{(2)Y} = \frac{\sum \sum_{i,j} (j - M_y^{(1)Y})^2 P_Y(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Y(i, j)}. \quad (9)$$

$$M_{zx}^{(2)Y} = \frac{\sum \sum_{i,j} (i - M_x^{(1)Y})(j - M_y^{(1)Y}) P_Y(i, j)}{\sum \sum_{i,j} P_Y(i, j)} \quad (10)$$

Статистические метрики проекционных отображений

Первые и вторые пространственные моменты для исходных трех 2D распределений числа реализаций позволяет реконструировать 15 параметров, характеризующих пространственную деформацию отображений :

$$M_x^{(1)Z}, M_y^{(1)Z}, M_{xx}^{(2)Z}, M_{xy}^{(2)Z}, M_{yy}^{(2)Z} \quad (11)$$

$$M_y^{(1)X}, M_z^{(1)X}, M_{yy}^{(2)X}, M_{yz}^{(2)X}, M_{zz}^{(2)X} \quad (12)$$

$$M_z^{(1)Y}, M_x^{(1)Y}, M_{xx}^{(2)Y}, M_{xz}^{(2)Y}, M_{zz}^{(2)Y} \quad (13)$$

Отметим использование правой тройки направлений проецирования, соблюдение синхронизма при смене ориентаций.

Временные масштабы анализа событий в гелиосфере

- Каждая из функций распределения задается в собственном 3D пространстве состояний с ортами, ориентированными в GSE ориентации.
- На основе экспериментальных временных рядов создаются агрегированные выборки, соответствующие временным интервалам исследуемого процесса.

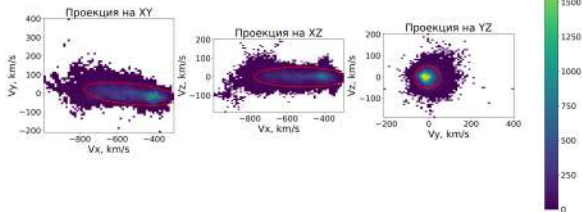
Выделим 5 основных масштабов:

- 365 суточный _____
- 90 суточный _____
- 28 суточный _____
- 07 суточный _____
- 02 суточный _____

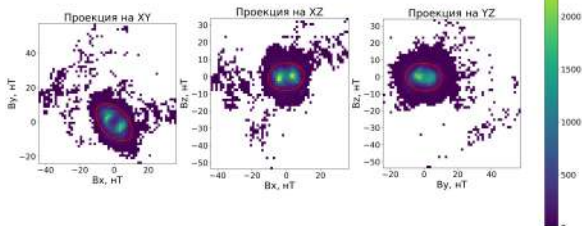
Каждому из масштабов соответствует свой набор физических процессов в гелиосфере и магнитосфере.

Время агрегации 90 суток. Спокойное поле

Year: 2025 Days: 271-360

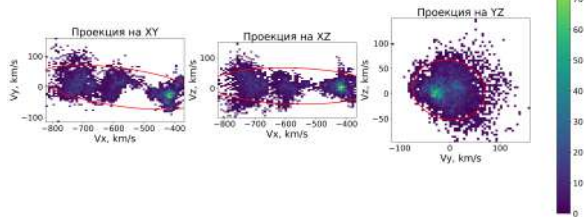


Year: 2025 Days: 271-360

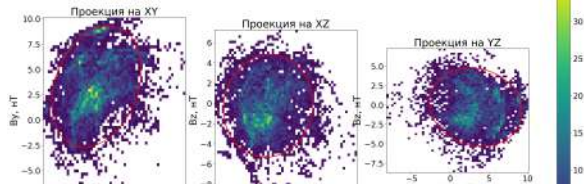


Время агрегации 7 суток. Корональные выбросы

Year: 2025 Days: 274-280



Year: 2025 Days: 274-280



Статистически значимые области пространства состояний и количественные параметры потоков – УТОЧНЕНИЕ

Определим статистически значимую область для координат событий в пространстве состояний как геометрическое место точек, расположенных внутри контура дисперсионных ограничений на плоскости проецирования. Выделим несколько групп характеристик:

- 3D вектор первого пространственного момента, или вектор дрейфа,
- диагональные и недиагональные статистические пространственные моменты при проецировании сигнала на оси GSE системы координат,
- углы ориентации осей эллипсоида на оси системы координат,
- больший и меньший диаметры аппроксимирующего эллипсоида.

Типичный листинг регистрируемых параметров для каждого из кадров

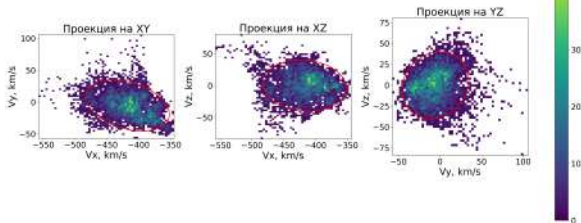
Независимо от времени агрегации вычисляется набор количественных параметров

$M_x = -372.47,$
 $M_y = -5.5096,$
 $M_z = -11.076,$
 $M_{xx} = 3591.5,$
 $M_{yy} = 473.10,$
 $M_{zz} = 272.30,$
 $M_{xy} = -847.06,$
 $M_{yz} = -66.721,$
 $M_{xz} = 193.75,$
 $\theta_{xy} = -0.248,$
 $\theta_{yz} = -0.293,$
 $\theta_{xz} = 0.058,$
 $D1_{xy} = 246.79,$
 $D2_{xy} = 64.233,$
 $D1_{yz} = 88.837,$
 $D2_{yz} = 63.518,$
 $D1_{xz} = 240.09,$
 $D2_{xz} = 64.626.$

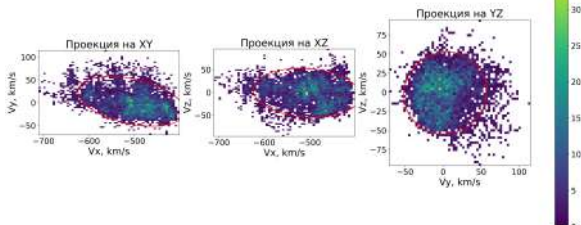
Помимо "чистых" метрик в ряде случаев можно подключать комбинационные метрики, созданные из нелинейных и линейных комбинаций. Такой выбор оправдан для ускорения распознавания профиля деформированных структур.

Эпизод 0, 2025–008–015. Спокойный режим

Year: 2025 Days: 8-14

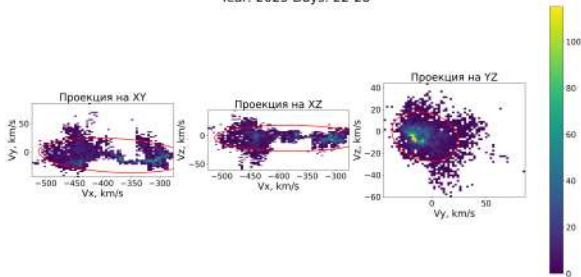


Year: 2025 Days: 15-21

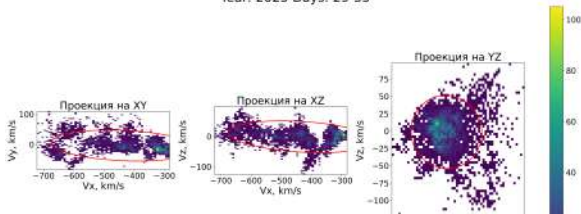


Эпизод 1, 2025–22–35. Многопоточковые системы, корональные дыры

Year: 2025 Days: 22-28

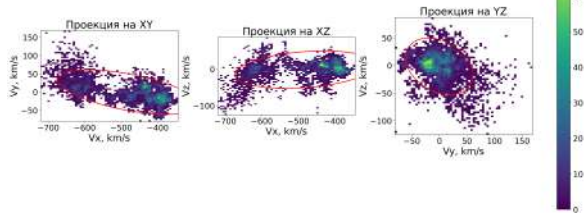


Year: 2025 Days: 29-35

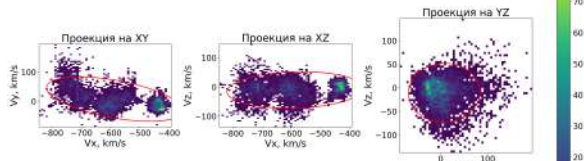


Эпизод 2, 2025–106–126. Горячие и холодные потоки плазмы

Year: 2025 Days: 106-112

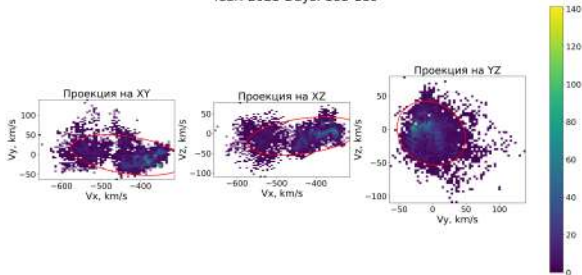


Year: 2025 Days: 120-126

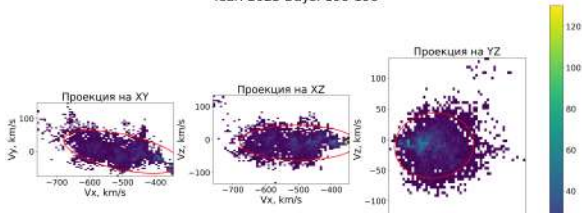


Эпизод 3, 2025–183–196 Распад многопоточковых систем

Year: 2025 Days: 183-189

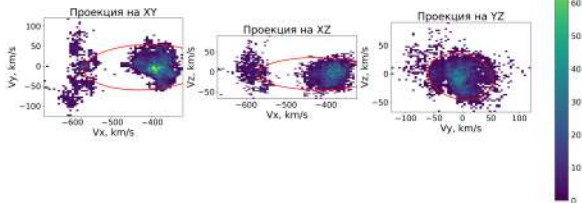


Year: 2025 Days: 190-196

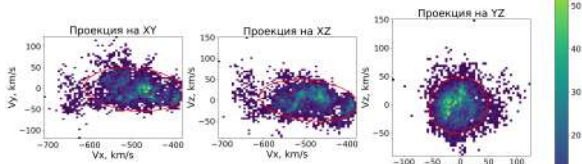


Эпизод 4, 2025–239–252 Распад быстрой КОМПОНЕНТЫ

Year: 2025 Days: 239-245

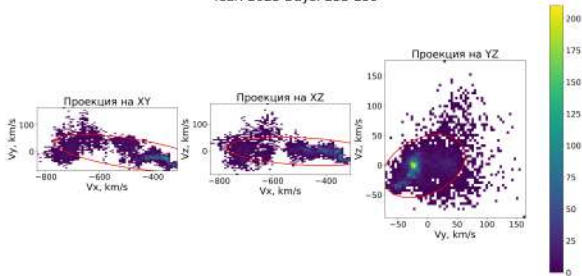


Year: 2025 Days: 246-252

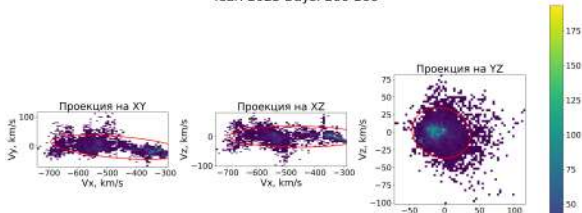


Эпизод 5, 2025–253–266 Солнечный ветер из корональных дыр

Year: 2025 Days: 253-259

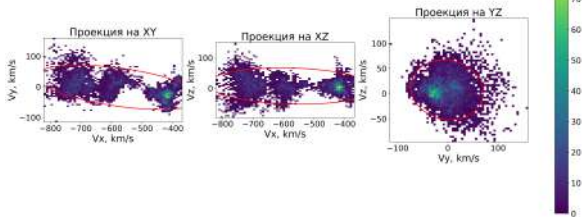


Year: 2025 Days: 260-266

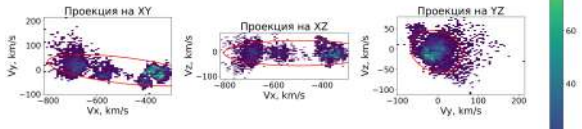


Эпизод 6, 2025–274–287 Трехкомпонентная система

Year: 2025 Days: 274-280

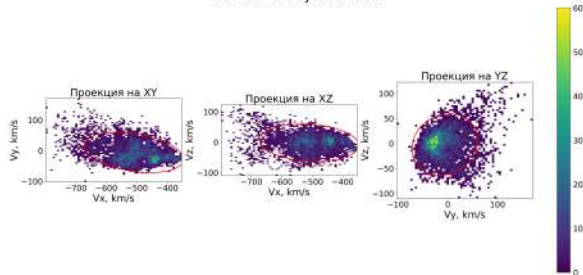


Year: 2025 Days: 281-287

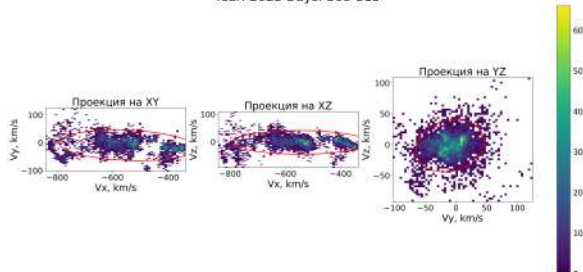


Эпизод 7, 2025–302–315 Кольцевые потоки

Year: 2025 Days: 302-308



Year: 2025 Days: 309-315



Сплайн-интерполяция временных рядов

- Корректность анализа кинематики первых и вторых пространственных стохастических моментов.
- Определение количественной степени неразрывности при стыковке фрагментов исследуемой системы по времени, координате, скорости, ускорению.
- Анализ устойчивости трассировки и размещение границ разрешенных и запрещенных зон.
- Анализ напряженных и ненапряженных сплайнов как детекторов нарушения инвариантов или законов сохранения для изучаемой системы.
- Попытки создать модель сплайн-экстраполяции.

Пример кубической сплайн-интерполяции

$$S(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (14)$$

$$s(t) = \frac{(t[n] - t)^2(2(t[n-1] - t) + h)}{h^3} s[n-1] + \frac{(t[n-1] - t)^2(2(t[n] - t) + h)}{h^3} s[n] + \frac{(t[n] - t)^2(t - t[n-1])}{h^2} b[n-1] + \frac{(t[n-1] - t)^2(t[n] - t)}{h^2} b[n]. \quad (15)$$

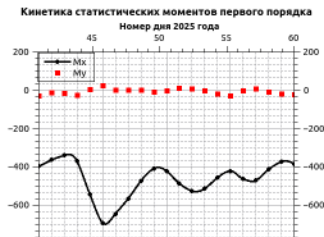
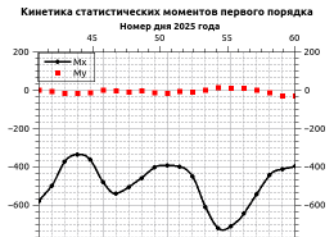
$$+ \frac{(t[n] - t)^2(t - t[n-1])}{h^2} b[n-1] + \frac{(t[n-1] - t)^2(t[n] - t)}{h^2} b[n]. \quad (16)$$

$$b[n] = \frac{s[n+1] - s[n-1]}{2h}, \quad (17)$$

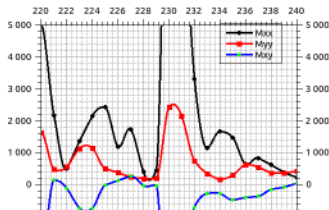
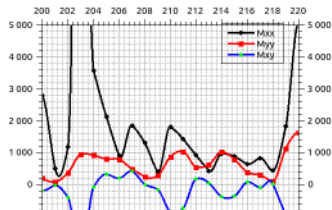
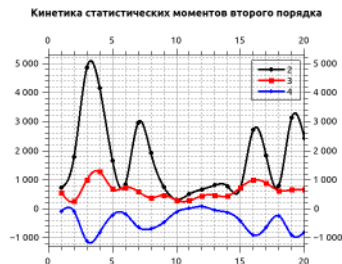
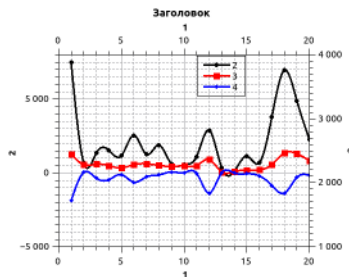
$$b[0] = \frac{4s[1] - s[2] - 3s[0]}{2h} \quad (18)$$

$$b[N] = \frac{3s[N] - s[N-2] - 4s[N-1]}{2h} \quad (19)$$

Слайн-развертка и кинетика пространственных статистических моментов первого порядка



Сплайн-развертка и кинетика пространственных статистических моментов второго порядка



Предварительные результаты исследования 1/2

- В рамках аппарата статистических пространственных моментов представлено количественное описание пространственно-временной структуры потоков солнечной плазмы.
- Определены количественные значения вектора скорости дрейфа, положение геометрического центра исследуемой структуры (аналог математического ожидания), коэффициентов диффузии ключевых параметров контролируемых потоков, модуляция астигматизма.
- Обнаружены процессы синхронизации временных зависимостей компонент тензора структуры второго ранга под действием внешних возмущений.

Предварительные результаты исследования 2/2

- Хорошо различимы не напряженные и напряженные сплайны, позволяющие определять интервалы времени устойчивых и неустойчивых состояний;
- Установлено для слабого ММП синфазных и противофазных сочетаний динамики осцилляций ММП, при этом вариация дисперсии M_{xx} , и M_{yy} синфазны, а M_{xy} – противофазна диагональным элементам;
- Контроль положения геометрического центра распределения населенности позволяет реконструировать фазовые траектории для обеих векторных переменных – $V[n]$, $B[n]$;
- Многообразие тензорных характеристик и инвариантов создают гибкую базу метрик как в количественном описании свойств гелиосферы, так и в разработке моделей наблюдаемых взаимодействий.

Спасибо за внимание!

Контактный адрес – *suharevana@my.msu.ru*