

УДК: 514.2, 519.1, 523.9, 537.5

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВЕКТОРНЫХ ГРАФОВ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. Ю. А. Антонов¹, В. И. Захаров¹, И. Н. Мягова²,
Н. А. Сухарева^{1, 2, *}, Ю. С. Шугай²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*suhareva@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 20.08.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

В работе применены методы теории информации к исследованиям межпланетного магнитного поля и его вариаций в результате солнечной активности. Статистические закономерности проекций векторов межпланетного магнитного поля и скорости потока частиц солнечного ветра не несут информации о порядке реализации доступных состояний исследуемой физической системы. Вместе с тем подобные характеристики могут быть получены из фазовых диаграмм или фазовых портретов, создаваемых на основе экспериментальных выборок на подпространствах фазового пространства, которые отображают как значения векторных величин, так и порядок следования для конкретного временного ряда. В работе предложен метод синтеза векторных графов в фазовом подпространстве межпланетного магнитного поля. Рассмотрены результаты реконструкции и анализа реализуемых графов на основе временных рядов спутникового мониторинга состояния межпланетного магнитного поля, предоставляемые базой данных Центра космических полетов Годдарда (*англ.* NASA Goddard Space Flight Center) за апрель 2023 г. Граф строится на основе экспериментальных выборок для проекций векторов магнитных полей. В узлах графа сходятся и расходятся векторы полей, ребра графа позволяют контролировать анализируемую траекторию системы в фазовом подпространстве и восстанавливать дерево переходов для конкретного векторного поля. Вводится понятие сферической опорной поверхности векторного графа, позволяющей привести сравниваемые реализации графов к единому линейному масштабу и единой кривизне опорной поверхности. Рассмотрены примеры в условиях действия различных внешних факторов, связанных с магнитным полем Солнца и выбросами корональных масс.

DOI: 10.31857/S0023420624020076, EDN: kyrrkh

ВВЕДЕНИЕ

Межпланетное магнитное поле (ММП) является предметом пристального изучения уже более 100 лет, поскольку оно оказывает значительное влияние на проявления космической погоды на Земле, влияет на систему геосфер, оказывает воздействие на хозяйственную деятельность человечества. Еще в начале XX века Кристиан Биркеланд [1] высказывал догадку о непрерывном облучении Земли солнечным веществом. Параметры этого непрерывно истекающего солнечного вещества как потока плазмы со скоростями в несколько сотен километров в секунду практически независимо друг от друга определили в 50-х гг. XX века разные авторы, например Biermann [2]. Магнитное поле Солнца является динамичным и достаточно сложным

по структуре, но в целом оно удачно моделируется во многом в силу того, что мощность силовых линий солнечных пятен на несколько порядков превышает мощность силовых линий фонового магнитного поля. Не вдаваясь в подробности, упомянем лишь историческую модель Паркера [3, 4], одним из первых успешно обосновавшего эту идею с применением математического аппарата, которая успешно развивается по сей день [5, 6].

Солнечный ветер изучается длительное время. Это явление обычно представляется как поток заряженных частиц (плазмы), испускаемых Солнцем. Указанный поток состоит в основном из протонов и электронов и заморожен в солнечное магнитное поле. Части такого потока могут иметь разные скорости, что связано с различными регионами

на поверхности Солнца, из которых вылетает плазма. Во время вращения Солнца вокруг своей оси потоки плазмы, двигаясь в магнитном поле Солнца, которое имеет спиральную форму, накладываются на это магнитное поле. Установлено, что свойства солнечного ветра зависят от солнечной активности, причем внезапные изменения в параметрах ветра (концентрации частиц и их скорости) влияют на форму магнитосферы Земли и могут порождать геомагнитные бури, которые способны вызывать нарушения в наземной связи. Таким образом, солнечный ветер по сути является потоком заряженных частиц различных энергий, которые могут проникать в магнитосферу и даже попасть в верхние слои атмосферы в регионах образования авроральных овалов, порождая полярное сияние.

Итак, ММП представляет собой сложную стохастическую открытую систему, эволюция которой определяется множеством внешних и внутренних факторов, прежде всего потоком частиц солнечного ветра, энергетикой и диаграммой направленности космических лучей. Предметом исследования является тонкая структура ММП, динамика которой обусловлена солнечным ветром. Нестационарность, неоднородность и анизотропия пространственных распределений вероятности для значений компонент магнитного поля и внешних действующих факторов практически исключает применение к описанию подобных систем классического аппарата неравновесной статистической механики. Для открытых нелинейных динамических систем типичны коллективные или групповые процессы, инициируемые неоднородностью и анизотропией пространственного распределения энергии, нестационарностью и неоднородностью концентрации температурных характеристик. Подобную перестройку структуры исследуемой системы иногда допустимо описывать как фазовые переходы второго рода. Формально оба указанных процесса соответствуют формированию долгосрочной или глубокой памяти системы и далекодействующих характеристик во взаимодействии элементов системы. Создание многопараметрических моделей подобных систем относится к задачам высокого уровня сложности, решаемым в условиях упрощений с принудительной иерархией протекающих в системе процессов [7–10].

В работе описан созданный и развиваемый авторами метод исследования пространственно-временной структуры вектора индукции магнитного поля, регистрируемого векторным магнитометром аппарата *Wind*, расположенного в точке Лагранжа *L1*. В основе метода лежит синтез фазовых траекторий в подпространстве магнитного

поля на основе экспериментально регистрируемых эквидистантных временных рядов с шагом дискретизации в 15 с и шагом квантования в 10^{-2} нТ. Шаг квантования связан с точностью работы датчиков, методикой регистрации и сглаживания значений, аппаратными погрешностями регистратора, логикой защиты от перегрузок. Орты в декартовой системе координат фазового пространства ориентированы согласно GSE (*англ.* Geocentric Solar Ecliptic system), значение времени регистрации соответствует номеру такта опроса. Переход между дискретным и непрерывным описанием возможен с привлечением билинейного преобразования или преобразования Мебиуса. Подпространство состояний магнитной подсистемы определим как однородное и изотропное пространство с совпадающим шагом квантования вдоль ортов. Каждая из ячеек фазового подпространства определяется координатой центра и значением шага квантования. Дискретная квантованная последовательность значений 3D-вектора магнитного поля может быть рассмотрена как 3D-цифровой сигнал:

$$\vec{B}_{ijk}[n],$$

определим кинематическую характеристику первого порядка как разность значений аргумента на текущем такте и предыдущем:

$$\delta \vec{B}_{ijk}[n] = \vec{B}_{ijk}[n] - \vec{B}_{ijk}[n-1].$$

Выполнив отображение зависимости первой кинематической переменной от значения аргумента, текущего значения вектора поля, получим искомую 3D-фазовую траекторию в магнитном подпространстве. Аналогично можно синтезировать фазовые портреты для кинематических характеристик высших порядков, информативных при описании процессов с далекодействием, глубокой памятью или коллективными степенями свободы.

СТРУКТУРА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Постановка задачи предполагает использование экспериментальных выборок динамических переменных, соответствующих рассматриваемой физической системе. Принципиальной становится реализуемая разрешающая способность, позволяющая надежно регистрировать вариации физических характеристик в собственном масштабе времени системы, не теряя информацию о далекодействующих процессах и процессах с пролонгированной памятью.

Использованы данные каталога Coordinated Data Analysis Web CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>), получаемые аппаратом *Wind* и представленные с несколькими интервалами

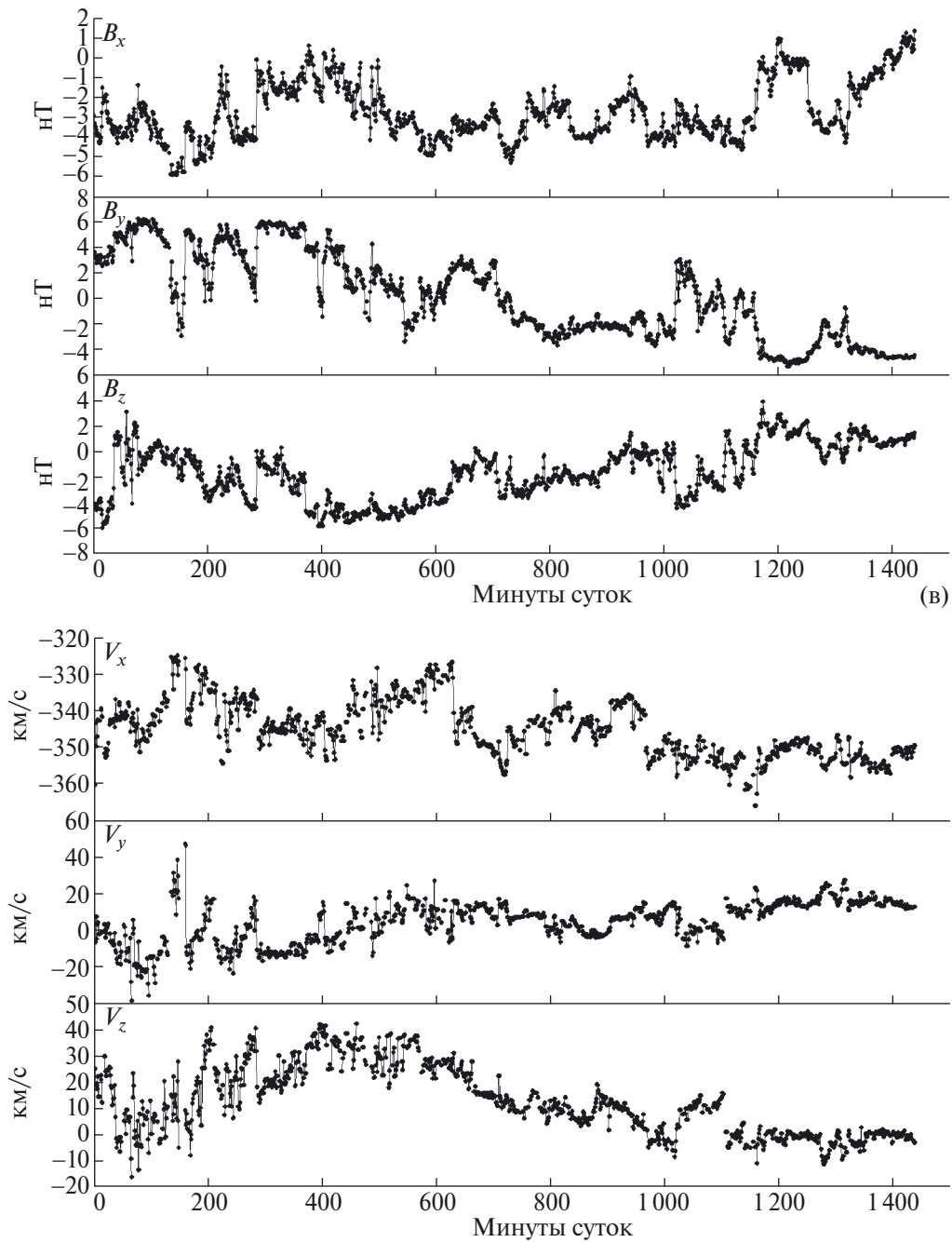


Рис. 1. Временные ряды проекций магнитного поля (три верхних ряда — B_x ; B_y ; B_z) и скорости потока частиц (три нижних ряда — V_x ; V_y ; V_z) в системе GSE 15.IV.2023.

дискретизации. Для синтеза векторных графов используются три шага дискретизации:

- 1 мин для квазисинхронной работы с выборками проекций вектора магнитного поля и проекций вектора скорости потока частиц, предварительного анализа эволюции графов (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/1min_ascii/);
- 15 с как основной шаг дискретизации, позволяющий различать вихревые и трансляционные структуры векторных полей (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/15sec_ascii/);
- 3 с для уточняющих реконструкций графов вектора ММП, анализа устойчивости синтеза фазовой траектории (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/3sec_ascii/).

Развиваемый аппарат векторных графов включает в анализ полную информацию как о значениях, так и порядке следования реализаций.

Для первичного анализа структуры рассмотрим векторный граф, соответствующий невозмущенному межпланетному полю. На рис. 1 представлены временные развертки временных рядов, регистрируемых для компонент магнитного поля и скорости потока частиц с временем дискретизации в 1 мин. Определим начало наблюдения номером такта 0, интервал наблюдения в 24 ч разделим на 8 трехчасовых фрагментов, каждый из которых содержит 3600 отсчетов. Зададим масштабную сетку 3D-фазового подпространства, на котором отображаются графы допустимых состояний ММП. Узел масштабной сетки может быть стоком или истоком в описании разрешенных переходов, ребра, соединяющие пары узлов, в общем случае не ограничены по длине и ориентации. Особенность вводимых векторных графов допускает два направления ребер между любой парой узлов и вырождение узлов, соответствующее наличию множественности стоков и истоков для каждого из узлов [11–15].

ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВЕКТОРНОГО ГРАФА МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассматриваемые векторные графы характеризуются не только распределениями реализаций значений по узлам, длинам ребер, но и их ориентацией. Для указания направления исходящего или приходящего в узел ребра в отображениях графов используются треугольные указатели в позициях отдельно расположенных узлов. Если узел вырожден, т.е. имеет более одного входящего или исходящего ребра, маркеры ребер могут накладываться друг на друга, затеняя первичную структуру. По этой причине в данной работе мы отказались от отображения ребер и для “многоканальных” узлов используем упрощенные указатели.

Особенность всех рассмотренных графов, независимо от даты и времени экспериментальной выборки, — расположение узлов вблизи сферической поверхности. Для удобства сравнения различных выборок будем контролировать помимо эмпирической поверхности нормированную, радиус-вектор которой соответствует единице в выбранном масштабе проекций магнитного поля. Такой подход позволяет количественно сравнивать реализации графов, описывать эволюцию графа, деформации распределения по узлам. Принадлежность узлов направленного графа сферической оболочки очевидна

при условии сохранения плотности потока энергии магнитного поля, которое определяет профиль нормированных опорных поверхностей:

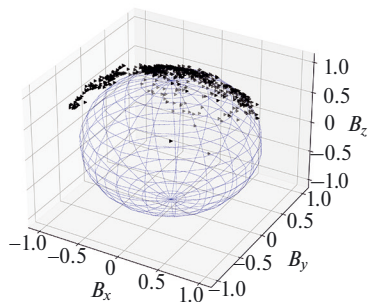
$$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 = \text{Const.}$$

Корректное сравнение нескольких графов возможно при выравнивании пространственных масштабов компонент магнитного поля. Если в процессе анализа плотность энергии магнитного поля уменьшается или увеличивается, происходят деформации геометрии графа. Возрастание плотности энергии поля приводит к отрыву массива узлов от стартовой опорной поверхности, созданию нового слоя узлов и новой опорной поверхности. Убытие плотности энергии магнитного поля сопровождается отщеплением части слоя узлов, порождающим процесс перестройки на новый уровень размещения узлов. Описанные процессы создания и уничтожения как нормированных, так и не нормированных опорных сферических поверхностей позволяют в первом приближении охарактеризовать энергетику состояния ММП.

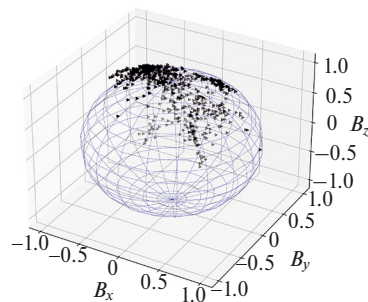
Для суточного интервала 15.IV.2023, соответствующего спокойному магнитному полю, аппарат находился в Θ -секторе магнитного поля Солнца [16]. Определение знака сектора было выполнено на основе анализа недельного временного ряда для V_x -компоненты, прошедшего через фильтр низких частот с окном усреднения в 10000 отсчетов при частоте дискретизации в 15 с. На рис. 2 представлена серия из 8 векторных графов, полученных на основе рядов с интервалами опроса 15 с и временем накопления реализаций 3 ч. Анализируемые графы имеют сложную структуру, относятся к циклическим графам, не обладают свойствами деревьев. При анализе пространственных структур, проецируемых на нормированную опорную поверхность можно определить ряд характеристик, общих для отображаемой серии:

- геометрическое место размещения активных узлов векторного графа представляет собой дугу с углом раскрытия до $2/3 \pi$;
- проекция дуги на опорную поверхность совершает вращение, ориентация угловой скорости которого может быть вычислена методами тензорного анализа;
- получаемые значения радиуса кривизны компонент тензора инерции в системе координат, связанной с нормированной опорной поверхностью, значения векторов угловой скорости, частоты прецессии могут рассматриваться как собственные динамические свойства исследуемой системы.

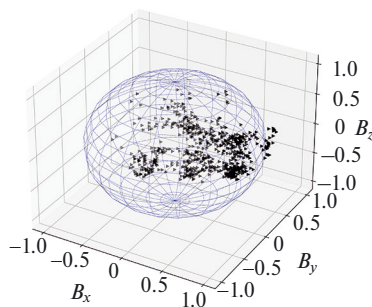
Коэффициент: $x = 0.2268$ $y = 0.1764$ $z = 0.1580$
15.IV.2023 00:00:00–02:59:45



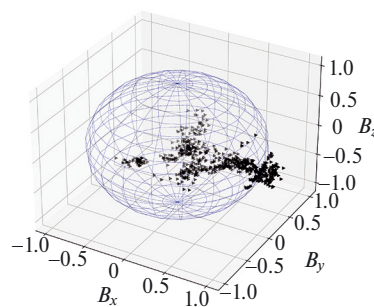
Коэффициент: $x = 0.1912$ $y = 0.1502$ $z = 0.1550$
15.IV.2023 03:00:00–05:59:45



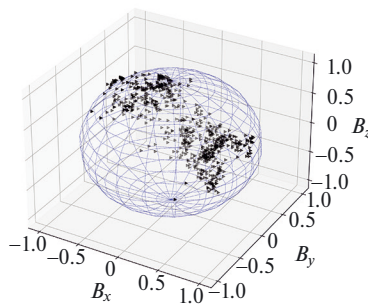
Коэффициент: $x = 0.1916$ $y = 0.1372$ $z = 0.1546$
15.IV.2023 06:00:00–08:59:45



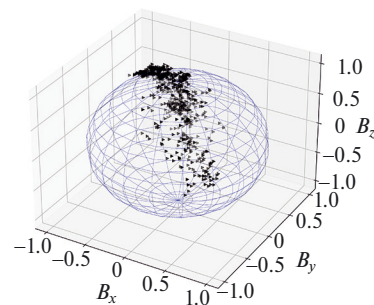
Коэффициент: $x = 0.2053$ $y = 0.1484$ $z = 0.1499$
15.IV.2023 09:00:00–11:59:45



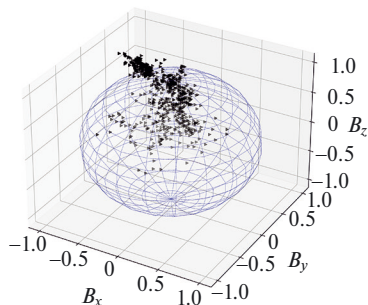
Коэффициент: $x = 0.1522$ $y = 0.1520$ $z = 0.1385$
15.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1783$ $y = 0.1404$ $z = 0.1453$
15.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.1515$ $y = 0.1437$ $z = 0.1988$
15.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.2070$ $y = 0.1724$ $z = 0.1548$
15.IV.2023 21:00:00–23:59:45

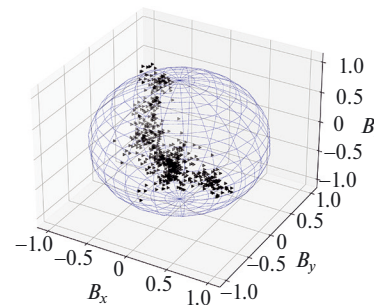


Рис. 2. Графы состояний 15.IV.2023.

СОБЫТИЯ 22–26 АПРЕЛЯ 2023 ГОДА

Рассмотрим серию событий, зарегистрированных в конце апреля 2023 г. и связанных со вспышечной активностью. В течение выбранного пятидневного интервала аппарат находится в $\oplus$ секторе ММП, знак сектора определяется по аналогичному, интервал наблюдения включает 5 сут. (рис. 3), из которых 36 ч до и 48 ч после магнитной бури могут быть отнесены к режиму спокойного поля. Реконструкции векторных графов выполнены на основе

временных рядов с шагом дискретизации 15 с и интервалом накопления 3 ч. Фактически последовательность из 40 реконструкций позволяет визуализировать последовательность пространственного распределения векторов скорости и ориентации ММП, реализуемых на всех фазах развития рассматриваемого события. Для идентификации наблюдаемых событий использованы данные каталога: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>.

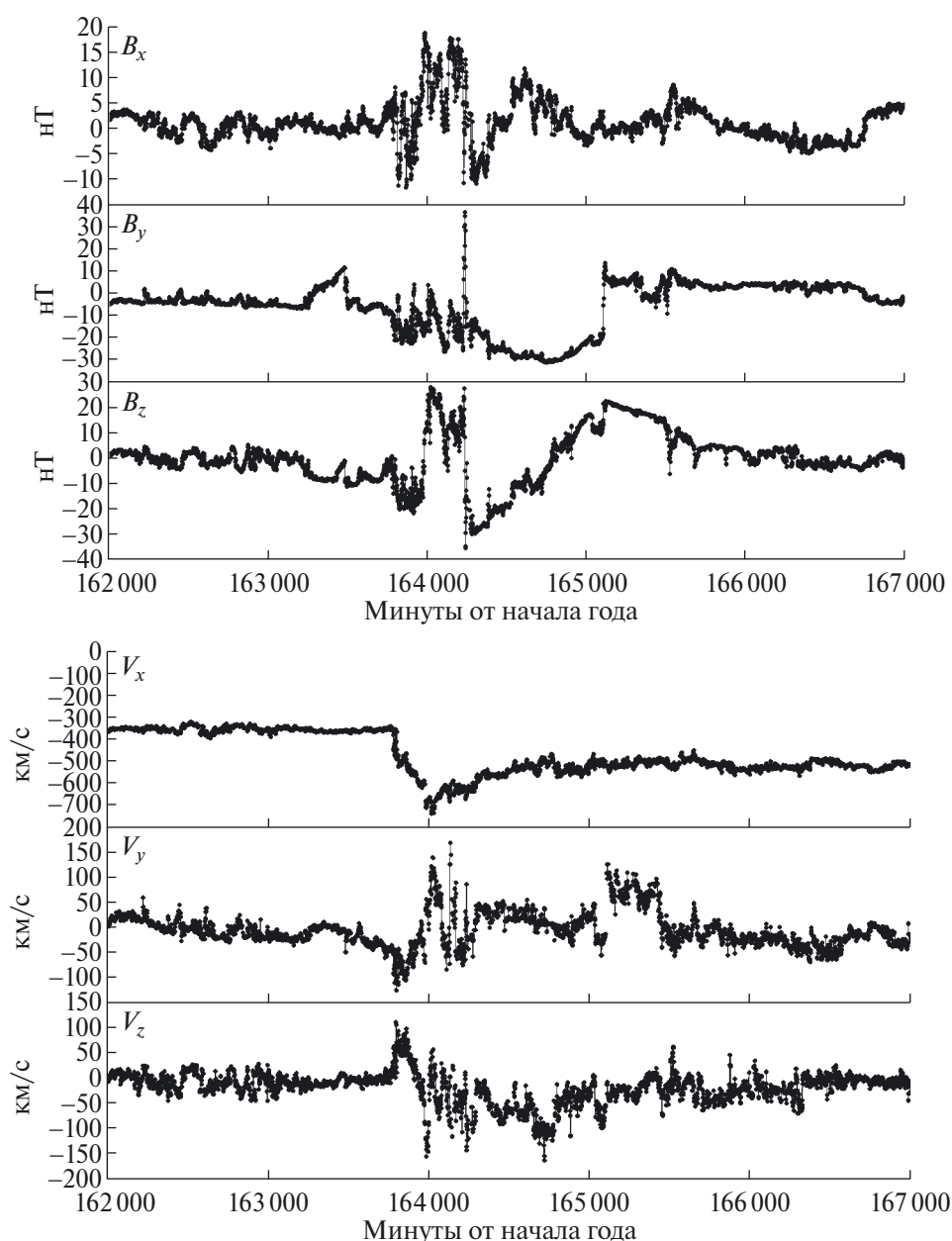


Рис. 3. Временные ряды проекций магнитного поля (три верхних ряда — B_x ; B_y ; B_z) и скорости потока частиц (три нижних ряда — V_x ; V_y ; V_z) в системе GSE 22–26.IV.2023.

22 апреля

До 17:38 23.IV.2023 космический аппарат *Wind* регистрировал медленный солнечный ветер, скорость которого составляла меньше 400 км/с. Магнитное поле было спокойным (рис. 4).

23 апреля

Приход ударной волны был зарегистрирован в 17:38 23 апреля, он характеризовался резким ростом скорости и плотности и магнитного поля. Область сжатия — высокие значения магнитных и плазменных параметров — наблюдалась с 17:38 23.IV.2023 до 01:00 24.IV.2023 (рис. 5).

24 апреля

Магнитное облако было зафиксировано с 01:00 24.IV.2023 по 19:00 25.IV.2023: магнитное давление было сильнее плазменного, наблюдались большие значения поля и проекции B_z (рис. 6).

25 апреля

Графы, представленные на рис. 7, показывают, что характер поведения ММП в эти сутки сохранялся тот же, что и в предыдущие: наблюдалось прохождение магнитного облака.

26 апреля

Как видно на рис. 8, 26 апреля к орбите Земли подошел высокоскоростной поток солнечного ветра.

Каждый из перечисленных доминирующих процессов имеет отображение в профиле векторного графа ММП и позволяет частично восстановить параметры плазменных потоков на основе анализируемых векторных графов ММП как детекторов состояния гелиосферы.

ДЕФОРМАЦИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Использование нормированной опорной поверхности для сравнения профилей векторных графов позволяет разделять пространственную модуляцию фигуры графа в масштабе радиуса кривизны поверхности и модуляцию локальных группировок населенности доступных состояний. Такой подход корректен при слабых и умеренных возмущениях магнитного поля, сохраняющих связность графа. При сильных возмущениях как на фазе возрастания, так и убывания поля может возникать глубокая пространственно-временная модуляция, сопровождающаяся разрывами, многослойностью и иными деформациями структуры графа.

Нормирующие коэффициенты для кривизны, обеспечивающие единичные значения всех трех радиусов кривизны опорной поверхности

определяются на начальном этапе анализа динамики графов и в дальнейшем могут синхронно корректироваться для всех трех осей вращения опорной фигуры. На каждом из представленных графов в верхней информационной строке указаны значения коэффициентов кривизны опорной фигуры, относящиеся к времени синхронизации, выполненной на начальной границе исследуемого интервала.

Строгие методы вычисления кривизны поверхности описаны в работах [17–19] и созданы в основном для решения аналитических задач о контактах поверхностей. При определении кривизны используются методы дифференциальной геометрии и соответствующие им количественные меры. Однако большая часть подобных мер не рассчитана на дискретный набор позиций узлов векторного графа. Используя дополнительные условия на сферический профиль опорной поверхности, возможно построить оптимальную аппроксимацию обтекания поверхности узлами векторного графа, ограничивая вычислительный алгоритм определением и сопоставлением экстремальных значений. Одна из эффективных реализаций алгоритма, минимизирующего суммарное отклонение множества узлов графа от сферической опорной поверхности выглядит так:

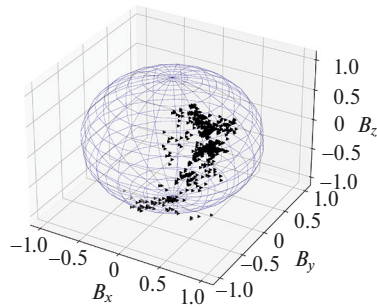
```
def find_max_min(arr):
    if max(arr) > abs(min(arr)):
        koeff = max(arr)
        return arr / max(arr), 1 / koeff
    else:
        koeff = abs(min(arr))
        return arr / abs(min(arr)), 1 / koeff,
```

где arr — столбец значений координат узлов графа. Отметим, что алгоритм работает лишь для графов компонент магнитного поля, другие физические характеристики будут сопровождаться иными инвариантами и методом поиска оптимального обтекания. Еще одно ограничение области применения алгоритма — использование выборок, достаточных для реализации однокомпонентных координатных позиций узлов графа, но недостаточных для потери информации за счет наложения значений отсчета. Для выборок длительностью от 1000 отсчетов это условие выполняется практически всегда.

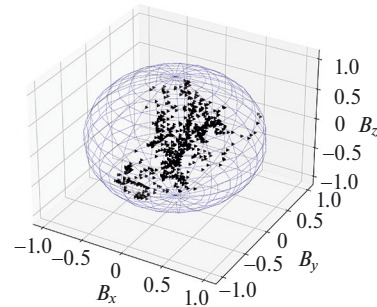
Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать основные правила отбора параметров опорной поверхности:

- исследуемый временной интервал должен содержать область калибровки параметров

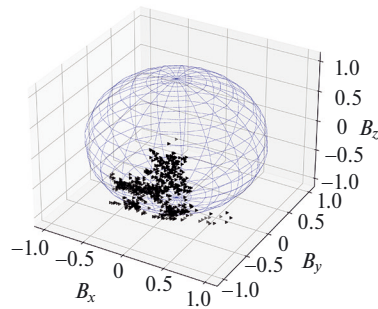
Коэффициент: $x = 0.2545$ $y = 0.1570$ $z = 0.1613$
22.IV.2023 00:00:00–02:59:45



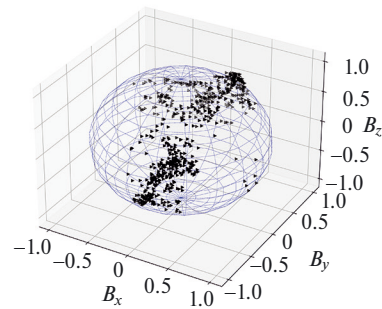
Коэффициент: $x = 0.2439$ $y = 0.1795$ $z = 0.1701$
22.IV.2023 03:00:00–05:59:45



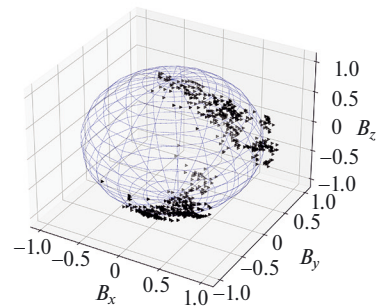
Коэффициент: $x = 0.2415$ $y = 0.1689$ $z = 0.1908$
22.IV.2023 06:00:00–08:59:45



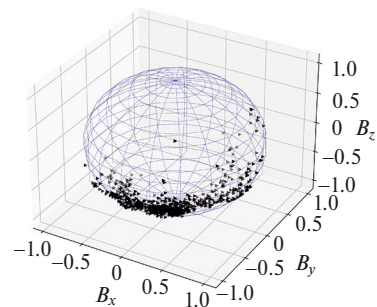
Коэффициент: $x = 0.2247$ $y = 0.1637$ $z = 0.1608$
22.IV.2023 09:00:00–11:59:45



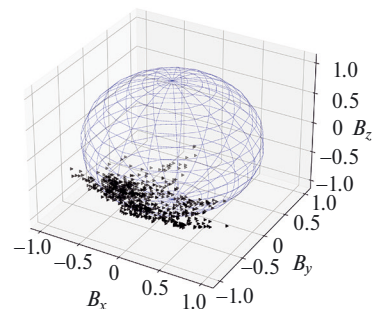
Коэффициент: $x = 0.2577$ $y = 0.1686$ $z = 0.1681$
22.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1779$ $y = 0.1675$ $z = 0.1553$
22.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2667$ $y = 0.1890$ $z = 0.1495$
22.IV.2023 18:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1799$ $y = 0.1927$ $z = 0.1504$
22.IV.2023 21:00:00–23:59:45

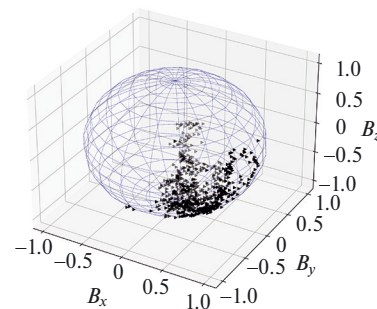
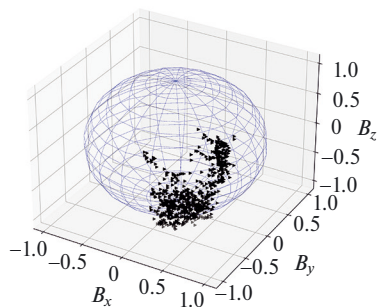
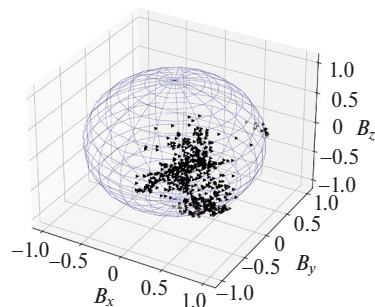


Рис. 4. Графы состояний 22.IV.2023.

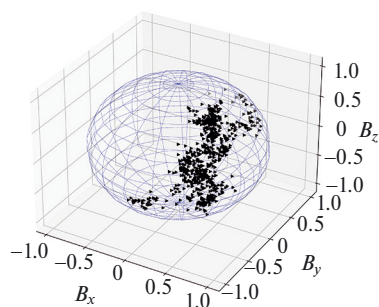
Коэффициент: $x = 0.2342$ $y = 0.1912$ $z = 0.2227$
23.IV.2023 00:00:00–02:59:45



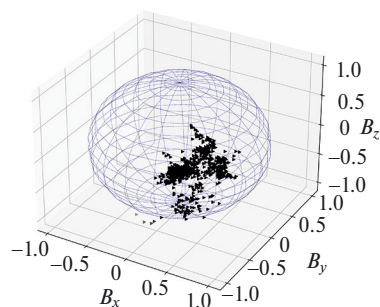
Коэффициент: $x = 0.2110$ $y = 0.1770$ $z = 0.1901$
23.IV.2023 03:00:00–05:59:45



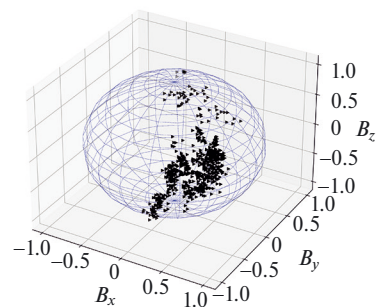
Коэффициент: $x = 0.2058$ $y = 0.1842$ $z = 0.2151$
23.IV.2023 06:00:00–08:59:45



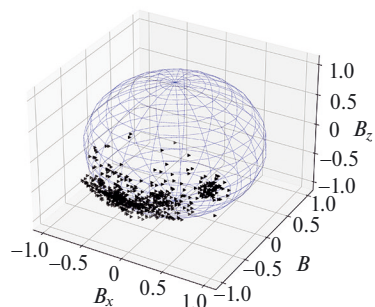
Коэффициент: $x = 0.2268$ $y = 0.1972$ $z = 0.2198$
23.IV.2023 09:00:00–11:59:45



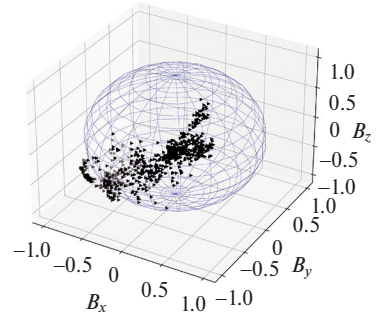
Коэффициент: $x = 0.2611$ $y = 0.2004$ $z = 0.2273$
23.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.3077$ $y = 0.2033$ $z = 0.2179$
23.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2639$ $y = 0.1923$ $z = 0.2123$
23.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.2004$ $y = 0.1792$ $z = 0.2222$
23.IV.2023 21:00:00–23:59:45

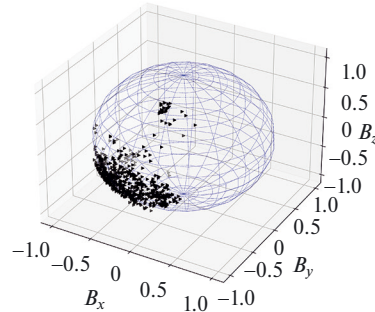
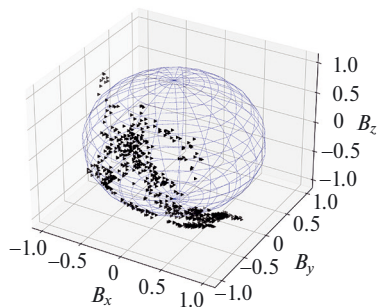
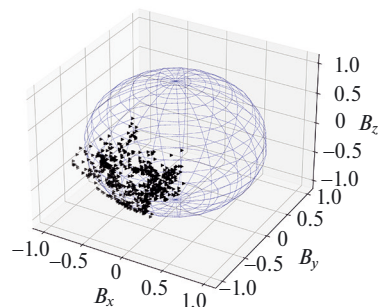


Рис. 5. Графы состояний 23.IV.2023.

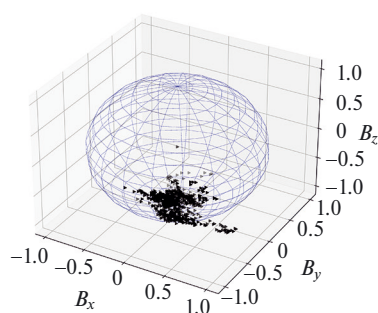
Коэффициент: $x = 0.2778$ $y = 0.1520$ $z = 0.1745$
 24.IV.2023 00:00:00–02:59:45



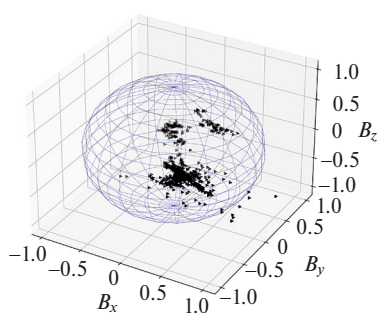
Коэффициент: $x = 0.2469$ $y = 0.1595$ $z = 0.1838$
 24.IV.2023 03:00:00–05:59:45



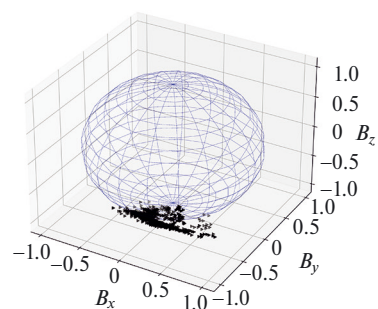
Коэффициент: $x = 0.3344$ $y = 0.1418$ $z = 0.1142$
 24.IV.2023 06:00:00–08:59:45



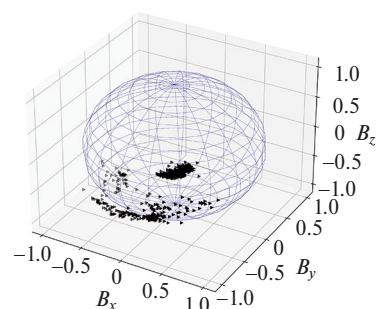
Коэффициент: $x = 0.3040$ $y = 0.0856$ $z = 0.0870$
 24.IV.2023 09:00:00–11:59:45



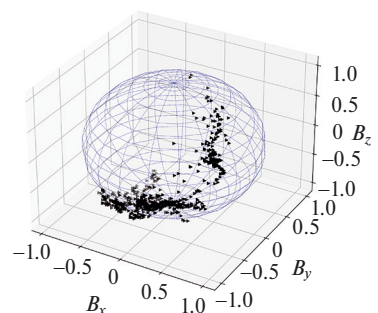
Коэффициент: $x = 0.2288$ $y = 0.1110$ $z = 0.0867$
 24.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.0697$ $y = 0.0392$ $z = 0.0431$
 24.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.0508$ $y = 0.0419$ $z = 0.0389$
 24.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.0512$ $y = 0.0371$ $z = 0.0351$
 24.IV.2023 21:00:00–23:59:45

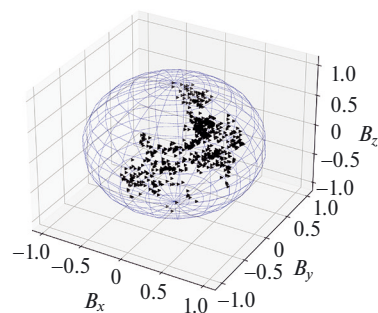
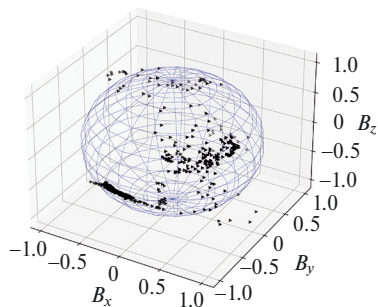
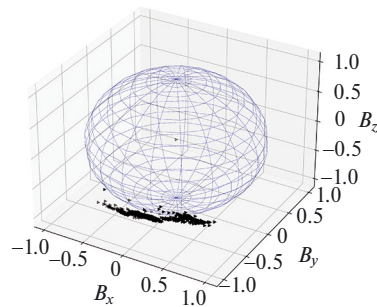


Рис. 6. Графы состояний 24.IV.2023.

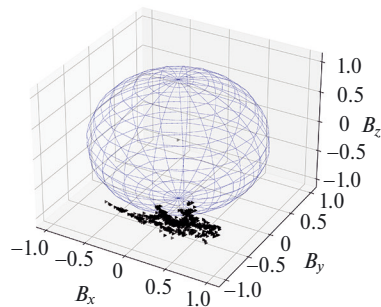
Коэффициент: $x = 0.0621$ $y = 0.0247$ $z = 0.0275$
25.IV.2023 00:00:00–02:59:45



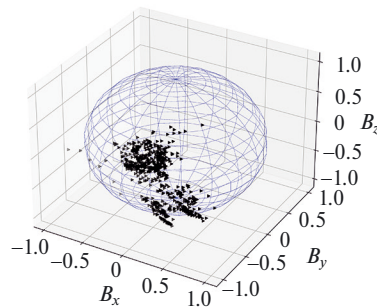
Коэффициент: $x = 0.0950$ $y = 0.0325$ $z = 0.0337$
25.IV.2023 03:00:00–05:59:45



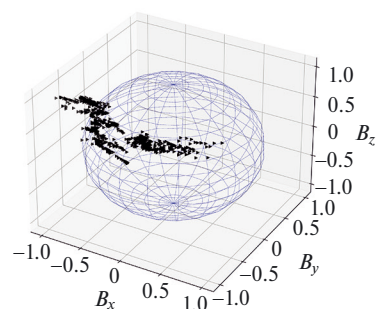
Коэффициент: $x = 0.0748$ $y = 0.0319$ $z = 0.0505$
25.IV.2023 06:00:00–08:59:45



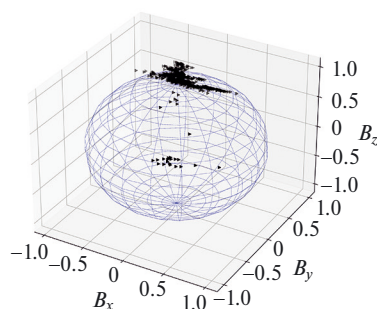
Коэффициент: $x = 0.1176$ $y = 0.0318$ $z = 0.0670$
25.IV.2023 09:00:00–11:59:45



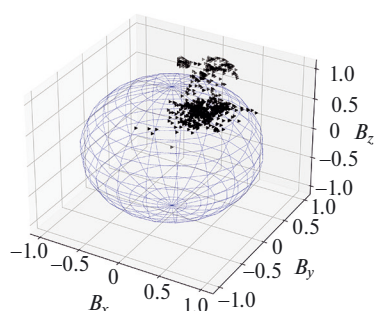
Коэффициент: $x = 0.2551$ $y = 0.0361$ $z = 0.0571$
25.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.2110$ $y = 0.0505$ $z = 0.0429$
25.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2351$ $y = 0.1021$ $z = 0.0533$
25.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.1083$ $y = 0.0917$ $z = 0.1618$
25.IV.2023 21:00:00–23:59:45

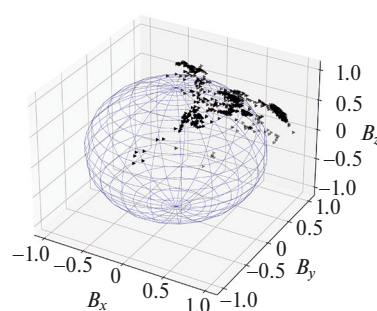
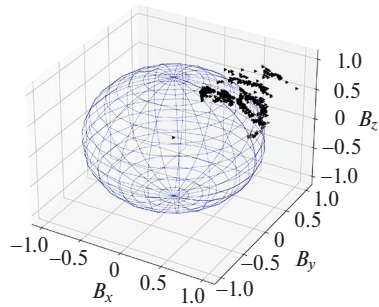
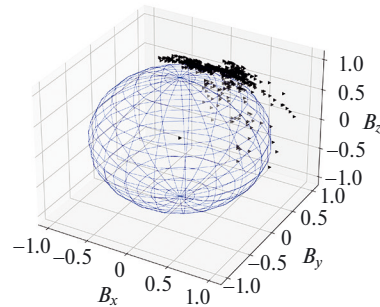


Рис. 7. Графы состояний 25.IV.2023.

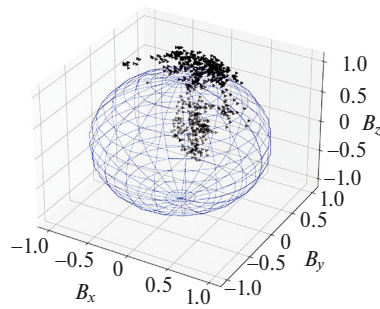
Коэффициент: $x = 0.1517$ $y = 0.1692$ $z = 0.1227$
26.IV.2023 00:00:00–02:59:45



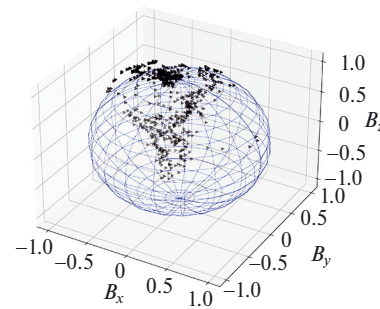
Коэффициент: $x = 0.3390$ $y = 0.2188$ $z = 0.2079$
26.IV.2023 03:00:00–05:59:45



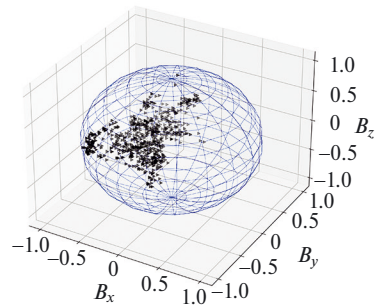
Коэффициент: $x = 0.2660$ $y = 0.2262$ $z = 0.3003$
26.IV.2023 06:00:00–08:59:45



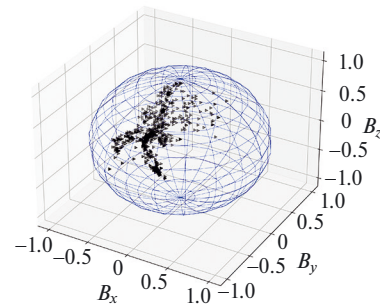
Коэффициент: $x = 0.2000$ $y = 0.1739$ $z = 0.1949$
26.IV.2023 09:00:00–11:59:45



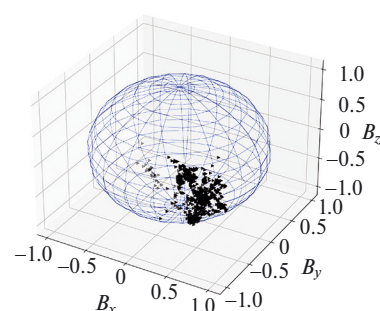
Коэффициент: $x = 0.1992$ $y = 0.1880$ $z = 0.1946$
26.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.2283$ $y = 0.02151$ $z = 0.2020$
26.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2037$ $y = 0.2016$ $z = 0.2151$
26.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.1890$ $y = 0.1890$ $z = 0.2155$
26.IV.2023 21:00:00–23:59:45

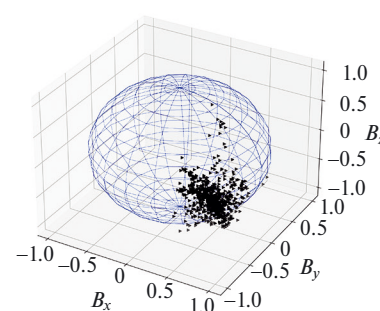


Рис. 8. Графы состояний 26.IV.2023.

опорной поверхности в режиме спокойного или слабо возмущенного магнитного поля,

- протяженность интервала калибровки должна быть достаточной для покрытия узлами векторного графа углового раstra не менее $\pi/4$ по сумме трех ортогональных направлений,
- из результатов анализа выборок следует возможность построения сферической начальной опорной поверхности, дальнейшая модификация кривизны в сторону возрастания сопровождается убыванием радиуса кривизны и уменьшением плотности потока энергии магнитного поля,
- при развитии магнитных возмущений кривизна поверхности наиболее явно меняется вдоль доминирующего направления возмущений. Например, вдоль B_z при развитии магнитной бури и вдоль B_x при прохождении корональных выбросов массы неустойчивость вычисляемых корректирующих значений кривизны возникает при формировании когерентных структур, расщеплении области локализации узлов графа.

Как следует из представленных на рис. 9 зависимостей, в отсутствии значимых внешних возмущений, т.е. при спокойном магнитном поле, опорная поверхность в пределах точности вычислений сохраняет сферическую форму. Изменение внешних условий в зоне наблюдения временных рядов сопровождается вариацией X -параметра кривизны, при событиях, связанных с корональным выбросом массы, и вариацией Z -параметра кривизны при развитии магнитной бури. Детальный анализ пространственно-временной модуляции может дать информацию о тонкой структуре ММП, релаксационных процессах, собственных временах формирования и распада кластеров узлов векторных графов.

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА ВЕКТОРНЫХ ГРАФОВ

Детальный количественный анализ структуры графов разработан и опирается на расчет тензора структуры графа, как тензора второго ранга с последующим определением ориентации главных осей графа, вектора сдвига центра пересечения осей в собственной системе координат графа относительно центра аппроксимирующего эллипсоида. Количественное описание графов матрицами тензоров второго ранга позволяет выполнять детальный сравнительный анализ различных структур, ввести системную функцию, необходимую

для описания эволюции графа, реконструировать на основе системной функции ядро разностного уравнения и определить собственные пространственные функции исследуемого процесса, контролировать значения инвариантов тензоров. Помимо тензорных и ориентационных характеристик графа информативны их картографические проекции и соответствующий им аппарат позиционного анализа.

Предложенный метод динамического анализа эволюции ММП на основе векторных графов, соответствующих 3D-временным рядам проекций поля в системы GSE, по информационной емкости превосходит стандартные линейные и нелинейные методы обработки, исключающие кластеризацию и сегментацию элементов временного ряда. Использование синтезированных графов уже на первой фазе анализа позволяет оценить связность структуры, характерные времена релаксации структуры графа к потенциальным метастабильным состояниям, время жизни, наследование структур элементов графа. Метод векторных графов имеет перспективы в задачах прогноза состояния гелиосферы, магнитосфер планет и специальных задач контроля состояния радиационных поясов [20–22].

Топологическая сложность синтезируемых графов требует дополнительных методик в описании и анализе их структур. В рассматриваемом случае предложен метод опорной поверхности, соответствующий режиму поддержания постоянного значения плотности потока энергии поля. Фактически на первой фазе анализа графа реконструируется опорная поверхность, далее отслеживается его динамика. По аналогии с теорией многоканального кодирования сигналов можно определить отдельный векторный граф как сигнальное созвездие, а последовательность векторных графов рассматривать как динамическую сигнально-кодую конструкцию. Продолжение такой аналогии не исключает разделения регистрируемого сигнального потока, как временного 3D-ряда магнитного поля, на две компоненты — информационную и поверочную. Поверочная компонента должна быть основана на инвариантах поля и обеспечивает помехоустойчивость решения задач прогнозирования и компенсации помех, например, на основе алгоритмов с низкой плотностью проверки регистрируемой сигнально-кодую конструкции.

Структура векторных графов с различным кинематическим смещением соответствует структуре фазовых траекторий в заданном подпространстве. Вынужденное ограничение числа рассматриваемых переменных экспериментально наблюдаемыми значениями не позволяет требовать от предлагаемого

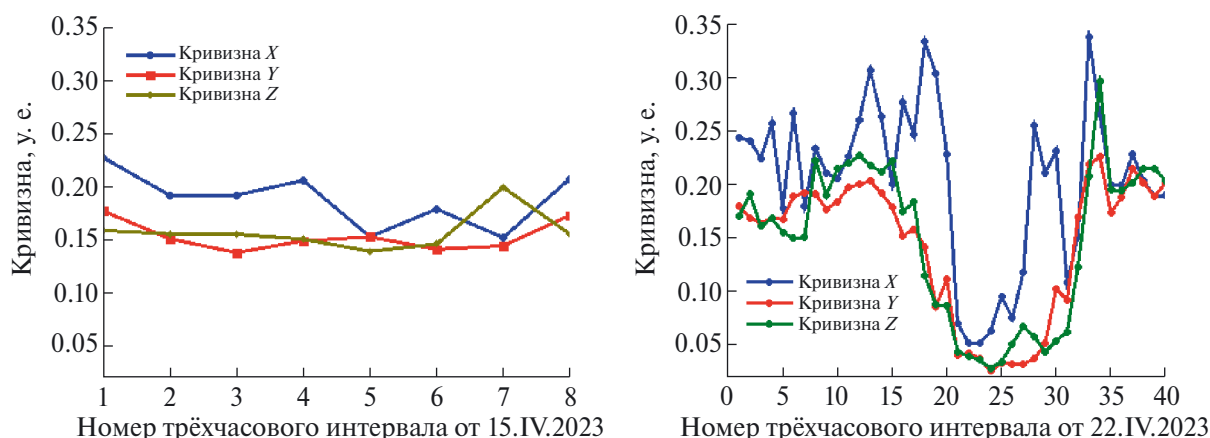


Рис. 9. Вариация нормирующих коэффициентов кривизны со временем: слева — для 15 апреля, справа — для интервала 22–26 апреля 2023 г.

метода реконструкции фазового портрета с соблюдением условия единственности решения соответствующего эволюционного уравнения или отсутствия самопересечения фазовой траектории. Определение на основе геометрии расположения узлов векторного графа вспомогательной топологической характеристики, опорной поверхности, соответствующей закону сохранения плотности потока энергии ММП, позволяет в первом приближении характеризовать структуру магнитного поля, его собственную и индуцированную внешними факторами анизотропию.

Перспективность разработанного подхода для прикладных задач связана с возможностью перейти от прогноза отдельных событий к прогнозу цепочки коллективных событий [23]. Характеристики опорных поверхностей для векторных графов позволяют проводить количественное сравнение коллективных структур как по уединенным, так и смешанным состояниям [24–26]. Отметим, что аналогичный подход разрабатывается для векторных графов скорости солнечного ветра, а также для комбинированных векторных характеристик анализируемой физической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод векторных графов впервые применен для анализа состояний ММП и переходов между состояниями. Структура и сложность графа зависят от длительности выборки значений компонент векторного поля, что позволяет управлять информационной емкостью графа и менять значение временного разрешения исследуемого процесса. Интерпретация синтезируемого векторного графа как фазовой траектории, а в ряде случаев фазового портрета, позволяет привлекать аппарат

статистической механики, теории дифференциальных уравнений, теории динамических систем [27–30]. Например, если анализируемая система является гамильтоновой, следует ожидать сохранения ее фазового объема. Определение эволюционных уравнений состояния исследуемой системы требует синхронного анализа фазовых траекторий в фазовом подпространстве магнитного поля и фазовом подпространстве векторов потока частиц солнечного ветра. Обсуждение правил объединения фазовых подпространств и построение объединенных траекторий на основе парциальных векторных графов будут рассмотрены в следующих работах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания “Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве” (номер ЦИТИС: 122071200023-6) и госзадания “Волновые пучки и импульсы в случайно-неоднородных и стратифицированных средах” (номер ЦИТИС: 117121890022-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Birkeland K.* Are the solar corpuscular rays that penetrate the Earth's Atmosphere Negative or Positive Rays? // I. Mat.-Naturv. Klasse. Videnskapselskapets Skrifter. 1916. Iss. 1. P. 1–27.
2. *Biermann L.F.* Solar corpuscular radiation and the interplanetary gas // A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975. Harvard University Press, 1979. P. 147–148.

3. *Parker E.N.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophysical J.* 1958. V. 128. Art.ID. 664. <https://doi.org/10.1086/146579>
4. *Parker E.* Dynamical theory of the solar wind // *Space Science Reviews.* 1965. V. 4. Iss. 5–6. P. 666–708.
5. *Réville V., Velli M., Panasenco O. et al.* The role of Alfvén wave dynamics on the large-scale properties of the solar wind: comparing an MHD simulation with Parker Solar Probe E1 data // *Astrophysical J. Supplement Series* 2020. V. 246. Iss. 2. Art.ID. 24. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac532e>
6. *Svirzhevsky N., Bazilevskaya G., Kalinin M. et al.* Heliospheric magnetic field and the Parker model // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. P. 299–311. <https://doi.org/10.1134/S0016793221030154>
7. *Adhikari L., Khabarova O., Zank G.P. et al.* The role of magnetic reconnection—associated processes in local particle acceleration in the solar wind // *Astrophysical J.* 2019. V. 873. Iss. 1. Art.ID. 72. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab05c6>
8. *Bale S., Badman S., Bonnell J. et al.* Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole // *Nature.* 2019. V. 576. P. 237–242. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1818-7>
9. *Alberti T., Consolini G., Carbone V. et al.* Multifractal and chaotic properties of solar wind at MHD and kinetic domains: An empirical mode decomposition approach // *Entropy.* 2019. V. 21. Iss. 3. Art.ID. 320. <https://doi.org/10.3390/e21030320>
10. *Prasad P.K., Gowrisankar A., Saha A. et al.* Dynamical properties and fractal patterns of nonlinear waves in solar wind plasma // *Physica Scripta.* 2020. V. 95. Iss. 6. Art.ID. 065603. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab833c>
11. *Godsil C., Royle G.F.* Algebraic graph theory. Graduate Texts in Mathematics Series. V. 207. Springer Science & Business Media, 2001.
12. *Kalofolias V.* How to learn a graph from smooth signals // *Artificial intelligence and statistics.* P. 920–929. PMLR, 2016.
13. *Pal M., Samanta S., Ghorai G.* Modern trends in fuzzy graph theory. Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8803-7>
14. *Cheng S.-W., Cheong O., Lee T. et al.* Fitting a graph to one-dimensional data // *Theoretical Computer Science.* 2021. V. 867. P. 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2021.03.020>
15. *Daitch S.I., Kelner J.A., Spielman D.A.* Fitting a graph to vector data // *Proc. the 26th Annual International Conference on Machine Learning.* Montreal, Canada. 2009. P. 201–208. <https://doi.org/10.1145/1553374.1553400>
16. *Shugay Y., Slemzin V., Veselovsky I.* Magnetic field sector structure and origins of solar wind streams in 2012 // *J. Space Weather and Space Climate.* 2014. V. 4. Art.ID. A24.
17. *Svec A.* Global differential geometry of surfaces. Springer Science & Business Media, 2001.
18. *Abbena E., Salamon S., Gray A.* Modern differential geometry of curves and surfaces with Mathematica. CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315276038>
19. *Banchoff T.F., Lovett S.* Differential geometry of curves and surfaces. CRC Press, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003295341>
20. *Myagkova I., Shiroky V., Dolenko S.* Prediction of geomagnetic indexes with the help of artificial neural networks // *E3S Web of Conferences.* 2017. V. 20. Art.ID. 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172002011>
21. *Myagkova I., Shirokii V., Vladimirov R. et al.* Comparative efficiency of prediction of relativistic electron flux in the near-earth space using various machine learning methods // *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV.* Springer, 2021. P. 222–227. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60577-3_25
22. *Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Iyudin A.F. et al.* Space weather effects from observations by moscow university cubesat constellation // *Universe.* 2022. V. 8. Iss. 5. Art.ID. 282. <https://doi.org/10.3390/universe8050282>
23. *Shugay Y.S., Kaportseva K.* Forecast of the quasi-stationary and transient solar wind streams based on solar observations in 2010 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. Iss. 2. P. 158–168. <https://doi.org/10.1134/S001679322102016X>
24. *Bhowmik P., Jiang J., Upton L. et al.* Physical models for solar cycle predictions // *Space Science Reviews.* 2023. V. 219. Iss. 5. Art.ID. 40. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00983-x>
25. *Vidotto A.A.* The evolution of the solar wind // *Living reviews in solar physics.* 2021. V. 18. Iss. 1. Art.ID. 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-021-00029-w>
26. *Viall N.M., Borovsky J.E.* Nine outstanding questions of solar wind physics // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2020. V. 125. Iss. 7. Art.ID. e2018JA026005. <https://doi.org/10.1029/2018JA026005>
27. *Sadovnikov B., Inozemtseva N., Perepelkin E.* Generalized phase space and conservative systems // *Doklady Mathematics.* 2013. V. 88. P. 457–459. <https://doi.org/10.1134/S1064562413040285>
28. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Universal density matrix for the phase space. 2019. arXiv preprint arXiv:1904.04950
29. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Exact time-dependent solution of the Schroedinger equation, its generalization to the phase space and relation to the Gibbs distribution,” *Physica Scripta.* 2022. V. 98. Iss. 1. Art.ID. 015221. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acab39>
30. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Dispersion chain of quantum mechanics equations // *J. Physics A: Mathematical and Theoretical.* 2023. V. 56. Iss. 14. Art.ID. 145202.