

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Астрокосмический центр

На правах рукописи

Лукманов Владислав Рамильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ
МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА
РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН**

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Чашей Игорь Владимирович

Научный консультант:
доктор физико-математических наук
Тюльбашев Сергей Анатольевич

Москва – 2024

Содержание

Введение	4
Обзор работ по теме диссертации	4
Общая характеристика работы	14
Глава 1. Метод межпланетных мерцаний. Радиотелескоп БСА ФИАН	27
1.1. Основы метода межпланетных мерцаний.....	27
1.2. Радиотелескоп БСА ФИАН	32
1.3. Методика обработки наблюдений.....	34
1.4. Выводы по главе 1	39
Глава 2. Глобальная структура солнечного ветра на спаде 24-го цикла солнечной активности	40
2.1. Скорость солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний	40
2.2. Радиальная зависимость индекса мерцаний в 2015 – 2019 гг.....	50
2.3. О корреляции индекса мерцаний и скорости солнечного ветра.....	55
2.4. Выводы по главе 2.....	59
Глава 3. Модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды	61
3.1. Кинематическая модель распространения СМЕ и расчет индексов мерцаний на ее основе для построения модельных карт	61
3.2. Сравнение модельных карт индексов мерцаний с картами по данным наблюдений. Оценка времени прихода СМЕ к Земле	64
3.3. Корональные выбросы массы и магнитная буря 26 – 28 февраля 2023 г.	75
3.4. Выводы по главе 3.....	79
Глава 4. Модель распространения CIR/SIR в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды	81
4.1. Кинематическая модель распространения CIR/SIR и расчет индексов мерцаний на ее основе для построения модельных карт	81
4.2. Сравнение модельных карт индексов мерцаний с картами по данным наблюдений	84

4.3. Выводы по главе 4.....	98
Заключение.....	100
Список литературы.....	103
Список использованных сокращений.....	121
Список таблиц.....	123
Список иллюстраций.....	124

Введение

Обзор работ по теме диссертации

Солнечный ветер – это поток межпланетной плазмы, формирующийся за счет сверхзвукового расширения солнечной короны [1, 2], который истекает из Солнца в межпланетное пространство из-за высокой температуры короны Солнца ($\sim 10^6$ К) и дополнительных источников энергии-импульса. Солнечный ветер занимает область, называемую гелиосферой, в радиусе ~ 100 а.е. от Солнца до границы с межзвездной плазмой. Солнечный ветер состоит в основном из электронов и протонов с малым количеством гелия и более тяжелых ионов [3].

Косвенно солнечный ветер был обнаружен еще до начала космической эры по наблюдениям отклонения хвостов комет, геомагнитных возмущений и вариации космический лучей, были получены порядки величин плотности и скорости солнечного ветра.

Исследование солнечного ветра возможно с помощью космических аппаратов. Такой метод дает информацию о гидродинамических параметрах солнечного ветра, химическом составе. Недостатком данного метода является то, что он позволяет исследовать только области вблизи самих космических аппаратов.

Первые прямые измерения частиц солнечного ветра провели советские аппараты «Луна-2» в 1959 г. [4], она же первая в мире достигла поверхности Луны, а затем – «Луна-3» [5]. Космический аппарат Explorer 10 также проводил измерения солнечного ветра в 1961 г. [6]. Первые непрерывные длительные измерения (в течение трех месяцев), которые подтвердили непрерывность потока плазмы из Солнца со скоростями 300 – 800 км/с, были проведены в 1962 г. космическим аппаратом Mariner 2 [7 – 9]. Исследования, описанные в работах [10 – 15], позволили получить оценки скорости, плотности и прочих параметров солнечного ветра. Основные характеристики вблизи орбиты Земли составляют: скорость солнечного ветра $V = 300 - 800$ км/с, концентрация частиц $N = 5 - 10$

см⁻³, индукция магнитного поля $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Гс, протонная температура $T_p \approx 10^4 - 10^5$ К, электронная температура $T_e \approx 10^5$ К.

Помимо метода исследования солнечного ветра космическими аппаратами исследование также проводилось методом радиопросвечивания, предложенного В. В. Виткевичем в 1951 г. [16], суть которого заключается в просвечивании межпланетной плазмы излучением удаленных дискретных радиоисточников. Достоинство данного метода исследования перед использованием космических аппаратов заключается в том, что метод радиопросвечивания позволяет исследовать области, недоступные для космических аппаратов в настоящее время, относительная дешевизна метода. Недостатком метода радиопросвечивания является то, что свойства межпланетной плазмы измеряются не напрямую путем регистрации частиц, а через их воздействие на проходящее радиоизлучение от источников. Одними из первых наблюдений методом радиопросвечивания были проведены для Крабовидной туманности [17], где было обнаружено увеличение ее видимого углового размера по мере приближения к Солнцу. Таким образом, был сделан вывод о наличии турбулентного слоя плазмы за пределом солнечной короны (сверхкорона Солнца). Также этот вывод подтвердился наблюдениями множества радиоисточников [18]. Следующим этапом было обнаружение межпланетных мерцаний радиоисточников Хьюишем в 1964 г. [19]. Путем наблюдения мерцаний множества источников определены скорость солнечного ветра, его глобальная структура и динамика в течение цикла солнечной активности [20, 21]. Также метод позволил определить характерные масштабы неоднородностей межпланетной плазмы, флуктуации электронной плотности [22, 23]. По наблюдениям межпланетных мерцаний в трех пунктах возможно определить скорость и форму движений неоднородностей межпланетной плазмы [24 – 31]. Оценка скорости солнечного ветра по трехпунктовым наблюдениям в настоящее время проводится только в ISEE (Institute for Space-Earth Environmental Research) Университета Нагойя в Японии, где исследуется пространственное распределение скоростей солнечного ветра и их эволюция в циклах солнечной активности в последние три десятилетия [32, 33]. Также возможны

однопунктовые исследования солнечного ветра по спектрам мощности мерцаний. Разработанная методика для оценки скорости солнечного ветра, угловой структуры наблюдаемых мерцающих радиоисточников, а также спектра турбулентности межпланетной плазмы по спектрам мощности мерцаний описана в работах [34 – 37]. Данная методика использовалась для оценки скорости крупномасштабных возмущений [38, 39]. Проводилось сравнение методик оценки скоростей солнечного ветра по однопунктовым и трехпунктовым наблюдениям [36, 40 – 42]. Оценки скоростей солнечного ветра, полученные двумя методами, в целом сходятся друг с другом.

Метод межпланетных мерцаний используется для исследования крупномасштабной структуры межпланетной плазмы [43], оценки угловых размеров мерцающих источников [44] и скорости солнечного ветра [42, 45], детектирования крупномасштабных возмущений и оценки скорости их распространения для предсказания космической погоды [46 – 50].

С помощью описанного метода просвечивания [51, 52], а затем и измерений космическими аппаратами [53, 54] была исследована глобальная структура солнечного ветра. Установлено, что электронная плотность плазмы убывает обратно пропорционально квадрату гелиоцентрического расстояния (расстояния от центра Солнца) $n \sim \frac{1}{R^2}$ [55]. При этом скорость солнечного ветра вблизи Солнца возрастает с расстоянием от Солнца, затем перестает зависеть от этого расстояния (режим сформировавшегося течения). Это означает, что в режиме сформировавшегося течения действие внешних сил на поток межпланетной плазмы незначительно.

Первые теоретические модели солнечного ветра были созданы задолго до исследования его космическими аппаратами. До конца 1950-х гг. корона Солнца и ее продолжение в межпланетное пространство рассматривались как гидростатическое образование. Одной из первых моделей солнечного ветра была модель, предложенная Чепменом [56 – 58]. В рамках данной модели предполагалось, что корона и удаленные области являются сферически-

симметричными и находятся в гидростатическом равновесии, энергия передается только через теплопроводность. Результатом данной модели было высокое значение плотности ($100 - 1000 \text{ см}^{-3}$) и температуры ($4 \cdot 10^5 \text{ К}$) вблизи орбиты Земли. Модель показала, что корона не заканчивается вблизи Солнца, а продолжается в межпланетное пространство, подчеркивается роль теплопроводности в поддержании и расширении короны. Это явилось важным астрофизическим результатом. Однако, модель Чепмена имеет значительные трудности на больших гелиоцентрических расстояниях.

Более полная теория потока коронального вещества была опубликована Паркером в 1958 г. [1, 59]. Данный поток он впервые назвал «солнечным ветром». В рамках модели Паркера изотермическая сферически-симметричная корона находится в непрерывном движении, ее физические характеристики не меняются со временем и зависят только от расстояния от Солнца r (стационарное состояние плазмы), не учитывается вязкость, также не учитывается вращение Солнца и его магнитное поле. Модель Паркера описывает физику солнечного ветра в общих чертах. Качественно показано, что солнечный ветер ускоряется несмотря на притяжение Солнца. С гелиоцентрическим расстоянием гравитационное притяжение уменьшается, плазма из дозвукового режима переходит в сверхзвуковой. Однако, данная модель содержит недостатки: не описывает физические причины ускорения плазмы в силу предположения об изотермичности короны. Также модель дает слишком большие значения потока частиц вблизи Земли и скорости расширения в короне (подробнее об этом описано в работе [60]).

Затем разрабатывались модели солнечного ветра, которые учитывали факторы, не учитываемые моделью Паркера. Учитывалась вязкость плазмы [61 – 64], межпланетное магнитное поле [65 – 70]. Рассмотрены двухжидкостные модели солнечного ветра [71], экзосферные модели [72 – 73]. К настоящему моменту создано множество моделей солнечного ветра [12, 74 – 85], ни одна из которых не объясняет все наблюдаемые свойства солнечного ветра. Неизвестно даже, являются ли свойства солнечного ветра типичными для ветров других звезд

солнечного типа. Также не выявлены с нужной точностью все свойства солнечного ветра, важные для выбора той или иной модели.

Наблюдаемые свойства солнечного ветра напрямую связаны с процессами в солнечной короне. Температура солнечной фотосферы всего лишь несколько тысяч градусов, в то время как температура вышележащей короны порядка миллиона градусов. В литературе обсуждаются разные механизмы нагрева короны: альвеновские волны, магнитное пересоединение, диссипация токов, и т.д. В работах [79 – 81] описана модель, согласно которой нагрев солнечной короны и ускорение солнечного ветра происходят за счет волнового источника энергии, установившаяся скорость солнечного ветра определяется потоком энергии волн в солнечной короне. Тем же исходным источником в солнечной короне, по-видимому, формируется и турбулентность солнечного ветра, так как она наблюдается на всех наблюдаемых расстояниях, даже на самых малых. По этой причине исследование турбулентности на больших расстояниях от Солнца важно не только для изучения природы локальных флуктуаций, но и для определения природы источников солнечного ветра в солнечной короне. Скорее всего, полная теоретическая модель солнечного ветра может быть создана только вместе с моделью солнечной короны.

Все параметры солнечного ветра флуктуируют на всех временных и пространственных масштабах доступных наблюдению. Пространственные спектры плотности и скорости солнечного ветра, магнитного поля представляют собой типичные спектры турбулентности согласно результатам измерений [86 – 92]. Установлено, что имеется внешний масштаб турбулентности – масштаб, на котором структуры порождаются источником; инерционный интервал – в нем структуры дробятся на более мелкие до внутреннего масштаба турбулентности; внутренний масштаб турбулентности – масштаб, на котором структуры разрушаются диссипацией. Физическая природа данных структур до конца не выявлена, возможно, это нелинейные волны. Пространственный спектр электронной плотности в инерционном интервале, согласно [20], имеет степенной вид:

$$\Phi_{N_e} \propto \vec{q}^{-n},$$

где Φ_{N_e} – пространственная спектральная плотность, \vec{q} – трехмерная пространственная частота, n – индекс турбулентности (по радиоастрономическим данным близок к 3,6 [20]).

Известны теоретические спектры с близким значением индекса турбулентности. В частности, известен спектр Колмогорова с $n = 11/3$, полученный для вихрей в несжимаемой жидкости (сильная турбулентность) [93], а также спектр Ирошникова – Крэчнана с $n = 7/2$, полученный для нелинейных волновых взаимодействий в слаботурбулентной плазме [94, 95]. В настоящее время наблюдения недостаточно точные для определения какой из двух спектров ближе к наблюдаемому. Однако установлено, что для быстрых высокоширотных потоков солнечного ветра индекс турбулентности выше, чем для медленных низкоширотных потоков [44].

Главной причиной актуальности исследования солнечного ветра является тот факт, что проявления солнечной активности могут вызывать магнитные бури, которые могут влиять на здоровье людей, работоспособность различного рода аппаратуры, спутники, связь, и т.д. Потоки солнечного ветра делятся на рекуррентные и спорадические. Рекуррентные потоки делятся на медленные (300 – 500 км/с) и быстрые (500 – 800 км/с). Определены характеристики отдельно для быстрых потоков [96, 97]: $n_e \sim 2-4 \text{ см}^{-3}$, $B \sim 3-4 \text{ нТл}$, $T_p \sim 2-3 \cdot 10^5 \text{ К}$, для медленных потоков [98, 99]: $n_e \sim 5-10 \text{ см}^{-3}$, $B \sim 4-8 \text{ нТл}$, $T_p \sim 0,5-1 \cdot 10^5 \text{ К}$. При этом в максимуме солнечной активности наблюдаются медленные потоки на всех гелиоширотах, а в минимуме солнечный ветер имеет бимодальную структуру [20, 33, 54, 100]: на низких гелиоширотах преобладают медленные потоки солнечного ветра, на высоких преобладают быстрые потоки солнечного ветра из корональных дыр [101]. К возмущенным потокам относят корональные выбросы массы (CME – coronal mass ejections) и коротирующие структуры (CIR – corotating interaction regions). Именно они могут вызвать магнитные бури. При этом чаще всего причиной магнитных бурь являются CME вблизи максимума цикла солнечной активности и CIR – вблизи минимума [102]. Оба типа возмущений могут быть

обнаружены в наблюдениях межпланетных мерцаний до их прихода к Земле [103 – 107].

СМЕ – это высвобождение значительного количества плазмы с «вмороженным» в нее магнитным полем из солнечной короны в межпланетное пространство. Схематически СМЕ выглядит как замкнутая петля магнитного поля со сгустком коронального вещества, оторвавшаяся от Солнца.

Чаще всего СМЕ, согласно статистике, связаны с солнечными вспышками, связанными с энерговыделением в короне и наблюдаемыми в рентгеновском диапазоне. Вероятность того, что после той или иной вспышки произойдет СМЕ, зависит от мощности и длительности данной вспышки. По мощности солнечные вспышки характеризуются классом А, В, С, М или Х: минимальная мощность для класса А составляет 10^{-8} Вт/м², минимальная мощность для каждого следующего класса в 10 раз больше, чем для предыдущего класса. Для конкретизации мощности после обозначения класса вспышки пишут число, означающее во сколько раз значение пиковой мощности данной вспышки больше минимальной мощности для данного класса вспышки, например, М3.7 означает мощность вспышки $3,7 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² при минимальной мощности для вспышек М-класса 10^{-5} Вт/м². Согласно ранним исследованиям [108], вероятность того, что после вспышки произойдет СМЕ, возрастает от 0,07 до 1 при изменении класса вспышки от В к Х и от 0,06 до 0,5 при увеличении продолжительности вспышки от 1 до 6 ч. Согласно результатам многолетних наблюдений [109] с 1976 по 2006 гг. длительность подавляющего числа вспышек составляла не более 1 ч. Из анализа 1301 рентгеновской вспышки [110] установлено, что вероятность СМЕ после С-вспышки составляет 0,16 – 0,25, после М-вспышки – 0,42 – 0,55, после Х-вспышки – 0,90 – 0,92. По данным работы [111] СМЕ возникают после 90% Х-вспышек, 30% М-вспышек и 24% С-вспышек. Таким образом, не все вспышки связаны с СМЕ и в то же время не все СМЕ связаны со вспышками. Согласно [108, 112] только около половины СМЕ связаны со вспышками. Связь между вспышками и СМЕ активно изучается. Существуют три гипотезы связи между ними:

- 1) Вспышки являются причиной СМЕ [113];
- 2) Вспышки являются следствием СМЕ [114];
- 3) Вспышки и СМЕ имеют общую причину [115].

Для выбора в пользу той или иной гипотезы необходимо установить, что происходит раньше: вспышка или СМЕ. Данные в литературе разнятся. Так в работе [115] говорится, что СМЕ обычно происходит на несколько минут раньше, чем вспышка. Однако, в работе [111] отмечается, что около двух трети СМЕ происходят после ассоциированных с ними вспышек. В работе [116] проанализированы 578 событий с СМЕ и ассоциированными с ними вспышками, в которых разница между моментом регистрации СМЕ и временем вспышки составила не меньше 5 мин. Ассоциированной с СМЕ считалась вспышка, если она произошла в пределах 100 мин. до или после этого СМЕ. Распределение этой разницы получилось нормальным со средним временем 0, разность не превышала 30 мин. для 80% таких событий. Выбросы, произошедшие после вспышек, имеют отрицательное ускорение, при этом наблюдается высокая корреляция (коэффициент корреляции 0,8) между энергией СМЕ и пиковым значением мощности вспышки. Выбросы до вспышек имеют положительное ускорение, их мощность не коррелирует с пиковой мощностью вспышки (коэффициент корреляции всего 0,1). Природа связи между выбросами и вспышками до конца не изучена в настоящее время. Однако СМЕ часто связывают со вспышками. Также открытым остается вопрос о взаимосвязи СМЕ и крупномасштабных событий [117] (например, изменение корональных дыр и глобальной структуры межпланетного магнитного поля).

Скорости распространения СМЕ, зарегистрированными космическими аппаратами, показывают разные значения. Чаще всего скорость распространения СМЕ близка к скорости солнечного ветра, однако скорость некоторых выбросов может быть больше 1000 км/с [118]. С удалением от Солнца они тормозятся [119, 120], их скорость стремится к скорости окружающего солнечного ветра даже за пределами орбиты Земли [121, 122]. Медленные же СМЕ ускоряются до скорости

солнечного ветра. Это явление в англоязычной литературе обозначается как «drag force».

В данных межпланетных мерцаний СМЕ обнаруживаются по усилениям мерцаний в области расстояний от 0,4 до 1,0 а.е. (зона слабых мерцаний). В работе [123] рассмотрены 9 СМЕ после М- и Х-вспышек с июля 2011 г. по июнь 2012 г., которые в итоге привели к магнитным бурям. Усиление мерцаний наблюдалось еще до начала магнитных бурь, на гелиоцентрических расстояниях 0,5 – 0,65 а.е. В среднем время между вспышкой и началом усиления мерцаний составляет примерно половину времени между вспышкой и магнитной бурей.

Существуют эмпирические модели предсказания времени прихода СМЕ к Земле [124 – 131], которые опираются на те или иные предположения о кинематике выброса. Также есть глобальные магнитогидродинамические модели, такие как ENLIL [132 – 134], SUSANOO [135, 136], MSFLUKSS [137, 138], EUHFORIA [139, 140], при расчете которых задается распределение магнитных полей, скоростей и плотностей солнечного ветра на определенной сферической поверхности с центром в центре Солнца и радиусом около 0,1 а.е. Указанные модели не достигают нужной точности. В работе [49] описана простая кинематическая модель формы и распространения СМЕ, которая позволяет обнаруживать выбросы за 15 – 20 ч. до начала магнитной бури по усилениям межпланетных мерцаний, при этом средняя погрешность предсказания магнитной бури составила 3,6 ч.

Другим видом возмущений, приводящим к магнитным бурям, являются CIR/SIR. Когда быстрые потоки солнечного ветра из корональных дыр догоняют медленные потоки, то образуется сжатая плазма – область взаимодействия потоков (SIR – stream interaction region), которая вращается вместе с Солнцем и образует архимедову спираль. Если структура SIR живет более одного оборота Солнца и приходит на Землю более одного раза, то она классифицируется как коротирующая структура (CIR – corotating interaction region). Такие структуры приходят на Землю примерно каждые 27 суток. Еще в 1956 г. Вальдмайер [141], наблюдая за солнечной короной, обнаружил взаимосвязь темных областей в

короне (M-области) с повторяющейся геомагнитной активностью, обнаруженной Маундером [142]. Следовательно, такая геомагнитная активность должна быть следствием высокоскоростных потоков, исходящих из темных областей в короне Солнца, которые позже назвали корональными дырами [143, 144]. Таким образом, количество CIR/SIR и магнитных бурь, связанных с ними, тесно связаны с количеством корональных дыр в короне Солнца. Корональные дыры наблюдаются преимущественно в периоды вблизи минимума солнечной активности на высоких гелиоширотах.

Для предсказания прихода CIR/SIR к Земле, как и для предсказания CME, было разработано множество моделей. Большая часть моделей, которые имитируют CIR/SIR в трехмерном пространстве, являются гелиосферными моделями, основанными на эмпирических корональных моделях (такие как WSA-ENLIL и EUHFORIA). Работы, которые обсуждают результаты моделирования CIR и сравнение их с данными наблюдений, следующие: результаты по WSA-ENLIL [145], по EUHFORIA – [146 – 148]. Ни одна из существующих на сегодняшний день моделей не достигает нужной точности.

В данных межпланетных мерцаний CIR/SIR могут быть обнаружены по ослаблению ночных мерцаний за 2 – 3 суток до их прихода к Земле [47, 149 – 152]. Также в работе [50] рассмотрена простая модель для ведущей части возмущения CIR/SIR с повышенной концентрацией плазмы, наблюдалось качественное согласие расчетов и наблюдательных данных. Показано, что данные возмущения могут проявляться в усилениях мерцаний по наблюдениям на радиотелескопе БСА ФИАН за трое суток до магнитной бури: за 2 – 3 суток усиление начинается в 13 – 15 ч. московского времени и продолжается несколько часов, затем ближе к приходу возмущения начало усиления смещается чуть к более раннему времени и усиление растягивается во времени, а в утреннем секторе усиление отсутствует до прихода возмущения к Земле. В период магнитной бури, вызванной CIR/SIR, происходит усиление ночных мерцаний. Следует, однако, отметить, что приход CIR/SIR к Земле, как и приход CME, не всегда приводит к магнитной буре. Для более точного предсказания космической

погоды, помимо наблюдения межпланетных мерцаний, желательны данные о компоненте B_z межпланетного магнитного поля [153].

Индикатором геомагнитных возмущений является квазилогарифмический планетарный геомагнитный индекс K_p . В случае, если $K_p < 4$, то магнитосфера спокойная, если $K_p = 4$, то магнитосфера возбужденная (но еще не магнитная буря), если $K_p \geq 5$, то это магнитная буря. Магнитные бури, в свою очередь, характеризуются G-индексом: G1 – слабая буря ($K_p = 5$), G2 – средняя буря ($K_p = 6$), G3 – сильная буря ($K_p = 7$), G4 – очень сильная буря ($K_p = 8$), G5 – экстремально сильная буря ($K_p = 9$). Также используется геомагнитный индекс Dst (Disturbance storm time index). Чем больше по модулю отрицательное значение Dst, тем сильнее буря. Слабым бурям соответствуют значения Dst-индекса от -25 до -50 нТл, умеренным бурям – от -50 до -100 нТл, сильным – от -100 до -200 нТл, экстремальным – ниже -200 нТл.

Более подробно про историю и современное состояние исследования солнечного ветра изложено в работах [154 – 156]. Про СМЕ подробную информацию можно найти в работах [157 – 159]. В работе [159] также кратко дана информация по CIR. Подробно про CIR изложено в обзоре [160].

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Изучение солнечного ветра является одной из важнейших задач современной радиоастрономии. Существует ряд факторов, которые способствуют интересу к этому объекту, самый важный из которых это то, что от солнечного ветра зависят явления космической погоды, такие как магнитные бури, полярные сияния. Это актуально для решения проблем солнечно-земных связей. Понимание природы солнечного ветра также важно для анализа наблюдений радиоисточников, так как сигнал, идущий от них, искажается при прохождении через межпланетную плазму. Кроме того, наблюдение мерцаний радиоисточников

позволяет заблаговременно обнаружить распространяющиеся корональные выбросы масс и коротирующие структуры, которые потенциально могут привести к магнитной буре.

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в понимании природы солнечного ветра. Однако имеется ряд нерешенных вопросов. В настоящее время, по сути, нет модели солнечного ветра, которая учитывала бы бимодальную структуру в минимумах 11-летних циклов солнечной активности и эволюции этой структуры в течение солнечного цикла. Также далека от завершения и модель турбулентности солнечного ветра, которая описывала бы генерацию возмущений, формирование и эволюцию энергетических спектров, связь средних параметров плазмы и параметров турбулентности. Также нет завершенных теоретических моделей, описывающих динамику корональных выбросов масс и коротирующих структур. Учитывая прогресс в последние несколько десятилетий, можно надеяться, что указанные проблемы в понимании солнечных процессов будут решены и будет создана количественная теория солнечного ветра.

Цель и задачи диссертации

Исследование глобальной структуры и крупномасштабных возмущений солнечного ветра на спаде 24-го и начале 25-го циклов солнечной активности по наблюдениям межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Разработка методик, позволяющих по длительным сериям наблюдений индивидуальных источников получать оценки скорости солнечного ветра и информацию о пространственном распределении уровня турбулентности межпланетной плазмы.

2. Разработка адаптированных к реальным наблюдениям моделей, позволяющих использовать данные мониторинга межпланетных мерцаний для краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений (проблема «Космическая погода»).

Научная новизна

Впервые для длительной серии наблюдений на интервале 2014 – 2019 гг. выполнены оценки скоростей солнечного ветра на спаде цикла солнечной активности по наблюдениям межпланетных мерцаний сильных мерцающих радиоисточников в зоне слабых мерцаний путем вписывания теоретических временных спектров мерцаний в спектр мерцаний по наблюдениям источника (однопунктовые оценки скорости солнечного ветра). Сравнения полученных оценок с соответствующими трехпунктовыми оценками в ISEE Университета Нагойя в Японии показали, что для компактного источника среднегодовые оценки скоростей солнечного ветра однопунктовые и трехпунктовые совпадают в пределах погрешностей измерений, для протяженного источника среднегодовые однопунктовые оценки превышают соответствующие трехпунктовые оценки, сделан вывод о значительном влиянии анизотропии межпланетной среды и радиоисточника на однопунктовые оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям протяженного источника. Впервые выполнено моделирование радиальной зависимости индекса мерцаний с учетом приэкваториального слоя с повышенной плотностью, установлено, что толщина слоя вблизи максимума цикла солнечной активности примерно вдвое больше, чем в минимуме. Впервые показано, что обратная пропорциональность между индексом мерцаний и скоростью солнечного ветра по наблюдениям одиночного источника проявляется при усреднениях на интервалах порядка года. Отсюда следует, что для более коротких серий следует использовать данные по большому числу источников.

Разработана простая кинематическая модель распространяющихся возмущений солнечного ветра типа CME и методика оценки времени прихода

СМЕ к Земле путем сравнения наблюдательных двумерных динамических карт индексов мерцаний с соответствующими картами на основании разработанной модели СМЕ.

Разработана простая кинематическая модель ведущей части распространяющихся возмущений солнечного ветра типа CIR. Качественно определены признаки, по которым в данных наблюдений межпланетных мерцаний могут быть обнаружены возмущения типа CIR в дополнение к ослаблению ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода CIR к Земле и их 27-суточной периодичности прихода.

Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Методология и методы

Результаты, описанные в настоящей работе, получены с использованием метода межпланетных мерцаний радиоисточников. Использовались известные методы обработки данных [42, 47], математической статистики (среднее значение, дисперсия, линейная аппроксимация, коэффициент корреляции). Для обработки данных использовались программы, написанные автором диссертации на языке C++ Builder специально для этих целей.

Достоверность результатов

Результаты, приведенные в настоящей диссертации, опубликованы в научных журналах, прошли апробацию на различных конференциях. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным представлениям о турбулентном солнечном ветре, а также качественном и количественном согласии с результатами, полученными другими методами, и данными по мерцаниям, полученными на других инструментах.

Практическая значимость работы

Исследование крупномасштабной структуры солнечного ветра и крупномасштабных возмущений имеет практическую ценность, так как позволяет их фиксировать еще до их прихода к Земле. Приход CME или CIR к Земле может вызвать ряд нежелательных последствий. Например, возможно повреждение аппаратуры на космических аппаратах, вплоть до выхода их из строя, ухудшение радиосвязи. Также они представляют серьезную опасность для экипажа пилотируемых космических кораблей. В случае взаимодействия CME или CIR с магнитным полем Земли могут произойти магнитные бури, которые приводят к образованию наведенных токов в линиях электропередач, что может стать причиной технических проблем, вплоть до полного отключения трансформаторов электросетей из-за перегрузок. С участием автора диссертации разработан и создан сайт [161], на котором в пробном режиме выполняется краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений на основе данных радиотелескопа БСА ФИАН с использованием упрощенных моделей распространения CME и CIR в межпланетном пространстве.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка использованных сокращений, списка таблиц и списка иллюстративного материала. Работа содержит 129 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 3 таблицы, список литературы из 193 наименований на 18 страницах.

Во **введении** дан обзор по истории исследования солнечного ветра и основных результатов, полученных к настоящему времени. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, описана научная новизна и практическая значимость работы, описаны примененные методы, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, приведен

список публикаций диссертанта, отражен его личный вклад и апробация полученных результатов.

В **первой главе** описаны основы метода межпланетных мерцаний и методика обработки данных, радиотелескоп БСА ФИАН, на котором выполнялись наблюдения.

Во **второй главе** описано исследование глобальной структуры солнечного ветра на спаде 24-го цикла солнечной активности. В частности, проводились оценки скорости солнечного ветра на элонгациях $25^\circ - 60^\circ$ по наблюдениям двух радиоисточников: компактного 3C48 и протяженного 3C298, проводилось сравнение полученных оценок с соответствующими оценками, полученным по трехпунктовым наблюдениям ISEE в Университете Нагойя в Японии. Несовпадение среднегодовых оценок скоростей по наблюдениям протяженного источника 3C298 может говорить об анизотропии межпланетной среды или самого радиоисточника, влияющие на оценки скорости солнечного ветра именно по наблюдениям протяженных источников. Исследовались зависимости индекса мерцаний от скорости солнечного ветра и от расстояния от Солнца по данным наблюдений компактного радиоисточника 3C48. Из первой из них был сделан вывод о пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению, из второй – о наличии приэкваториального плотного токового слоя.

В **третьей главе** описана модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве и методика оценки времени прихода возмущения к Земле путем сравнения двумерных динамических карт индексов мерцаний, полученных по данным наблюдений и рассматриваемой модели СМЕ. На примере 11 событий с магнитными бурями в 2021 – 2022 гг. обоснована возможность краткосрочного прогноза магнитных бурь за 15 – 20 ч. до начала бури. Также отдельно рассмотрен случай магнитной бури 26 – 28 февраля 2023 г.

В **четвертой главе** описана модель ведущей части крупномасштабных возмущений типа CIR/SIR в межпланетном пространстве. На примере 4 событий в 2022 – 2023 гг. качественно обоснована возможность заблаговременно

предсказать приход возмущения к Земле путем сравнения наблюдательных и модельных карт вместе с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до начала магнитной бури, вызванной CIR/SIR, а также 27-суточной периодичностью прихода CIR к Земле.

В **заключении** кратко сформулированы основные выводы, результаты диссертации, перспективы дальнейшего развития темы исследования.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Исследования глобальной структуры солнечного ветра указывают на существенное отличие пространственного распределения межпланетной плазмы от сферически симметричного, в частности из данных наблюдений сделан вывод о наличии плотного приэкваториального токового слоя как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности, причем в максимуме солнечной активности толщина слоя по полученным оценкам оказывается вдвое больше, чем в минимуме.

2. Значимая антикорреляция скорости солнечного ветра и индекса мерцаний в наблюдениях индивидуального радиоисточника проявляется при усреднении на временных промежутках порядка года, поэтому для исследования глобальной структуры солнечного ветра по данным мерцаний на более коротких временных интервалах необходимы одновременные наблюдения большого числа компактных радиоисточников.

3. Предложена простая кинематическая модель распространения CME в межпланетном пространстве. Обоснована возможность использования данной модели и двумерных динамических карт распределения уровня мерцаний для оценки времени прихода возмущения к Земле за 15 – 20 ч.

4. Предложена простая кинематическая модель крупномасштабных возмущений типа CIR. Качественно определены признаки, по которым возможно обнаружить CIR в данных наблюдений межпланетных мерцаний до его прихода к

Земле вместе с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода, а также 27-суточной периодичностью прихода.

Личный вклад диссертанта

Личный вклад диссертанта во всех результатах, выносимых на защиту, является определяющим. Методика обработки данных наблюдений индивидуальных источников разрабатывалась автором совместно с научным консультантом, все расчеты выполнялись по программам, написанным лично автором, результаты анализировались совместно с научным руководителем. Основы кинематических моделей крупномасштабных возмущений разрабатывались автором совместно с научным руководителем, реализация моделей, а также сравнение с данными массовых измерений выполнялись лично автором на основе подготовленных лично им численных программ.

Рисунки 1, 4 – 11, 13 – 33, 35, 37, 39, 40 в диссертации получены лично автором. Рисунки 2, 3, 12, 34, 36, 38, 41 в диссертации получены другими авторами, ссылки приведены.

Список публикаций диссертанта

Основные результаты диссертации изложены в 8 научных статьях (статьи 1 – 8 нижеперечисленного списка) в журналах, рекомендованных ВАК. Другие публикации по теме диссертации представлены в материалах конференций (статьи 9 – 19).

1. Chashei I. V., Lukmanov V. R., Tyul'bashev S. A., Tokumaru M. Comparison of Solar Wind Speed Estimates from Nearly Simultaneous IPS Observations at 327 and 111 MHz. // Solar Physics. – 2021. – V. 296. – Article 63. – 14P.

2. Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Lukmanov V. R., Subaev I. A. ICMEs and CIRs monitored in IPS data at a frequency of 111 MHz. // *Advances in Space Research*. – 2023. – V. 72. – P. 5371 – 5375.

3. Лукманов В. Р., Чашей И. В. Вариации радиальной зависимости уровня межпланетных мерцаний на фазе спада 24 цикла солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – С. 160 – 164.

Lukmanov V. R., Chashei I. V. Variations in the Radial Dependence of the Interplanetary Scintillation Level in the Descending Phase of Solar Cycle 24. // *Astronomy Reports*. – 2022. – V. 66. – P. 174 – 178.

4. Лукманов В. Р., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. О возможности краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений на примере выброса корональной массы в ноябре 2021 г. // *Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета*. – 2022. - № 4. – 2240201. – С. 1 – 5.

5. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра. // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – С. 1280 – 1283.

Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyul'bashev S. A. On Correlation of the Interplanetary Scintillation Level and Solar Wind Speed. // *Astronomy Reports*. – 2022. – V. 66. – P. 1325 – 1328.

6. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Анализ возможностей краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений по наблюдениям корональных выбросов массы на радиотелескопе БСА ФИАН. // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – С. 535 – 545.

Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Subaev I. A. Analysis of the Possibilities of Short-Term Prediction of Geomagnetic Perturbations from Observations of Coronal Mass Ejections at the BSA LPI Radio Telescope. // *Astronomy Reports*. – 2023. – V. 67. – P. 607 – 617.

7. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. Выбросы корональной массы и магнитная буря 27 февраля 2023 года по наблюдениям межпланетных

мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – Т. 50. – № 7. – С. 3 – 12.

Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyul'bashev S. A. Coronal Mass Ejections and the Magnetic Storm on February 27, 2023 from Interplanetary Scintillation Observations with the BSA LPI Radio Telescope. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – V. 50. – P. 259 – 265.

8. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Коротящие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний: моделирование и наблюдения. // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – С. 546 – 556.

Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Subaev I. A. Corotating Disturbances of the Solar Wind in the Monitoring Data of Interplanetary Scintillations: Simulation and Observation. // *Astronomy Reports*. – 2023. – V. 67. – P. 618 – 628.

9. Чашей И. В., Лукманов В. Р., Тюльбашев С. А., Токумару М. Динамика скоростей солнечного ветра на фазе спада 24 цикла солнечной активности по одновременным наблюдениям межпланетных мерцаний на частотах 327 и 111 МГц. // Сборник тезисов XVI ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2021 г. – С. 86.

10. Лукманов В. Р. Исследование динамики скоростей солнечного ветра на спаде 24-го цикла солнечной активности по наблюдениям мерцаний радиоисточников ЗС48 и ЗС298 на радиотелескопе БСА ФИАН. // *Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2021»*, Москва, 2021 г.

11. Чашей И. В., Лукманов В. Р., Тюльбашев С. А., Tokumaru M. Сравнение оценок скоростей солнечного ветра по однопунктовым и трехпунктовым наблюдениям мерцаний компактного и протяженного радиоисточников. // *Сборник Всероссийской Астрономической Конференции «ВАК – 2021: Астрономия в эпоху многоканальных исследований»*, Москва, 2021 г. – С. 384.

12. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С.А. Измерение скорости солнечного ветра по однопунктовым наблюдениям. // Сборник тезисов «Магнетизм и активность солнца и звезд –2021», Крым, пос. Научный, 2021 г. – С. 60.

13. Лукманов В. Р. Уровень межпланетных мерцаний на спаде 24 цикла солнечной активности. // Сборник тезисов XVII ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2022 г. – С. 94.

14. Лукманов В. Р. Корональные выбросы масс и коротирующие структуры по данным мониторинга межпланетных мерцаний на частоте 111 МГц. // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2022», Москва, 2022 г.

15. Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А. Корональные выбросы масс и коротирующие структуры по наблюдениям межпланетных мерцаний на частоте 111 МГц. // Сборник тезисов «Магнетизм и активность солнца и звезд – 2022», Крым, пос. Научный, 2022 г.

16. Лукманов В. Р. О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра. // Сборник тезисов XVIII ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2023 г. – С. 154.

17. Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Корональные выбросы массы в наблюдениях межпланетных мерцаний: данные мониторинга на радиотелескопе БСА ФИАН и моделирование. // Сборник тезисов симпозиума «Физические основы прогнозирования гелиофизических процессов и событий (Прогноз – 2023)», Троицк, 2023 г. – С. 54.

18. Лукманов В. Р. Выбросы корональной массы и магнитная буря 27 февраля 2023 года по наблюдениям межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН. // Сборник тезисов I конференции им. М. И. Панасюка «Проблемы космофизики», Дубна, 2023 г.

19. Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Коротирующие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний. // Сборник тезисов XXIV межвузовской молодежной

научной школы-конференции имени Б. С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, 2023 г.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1. XVI ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2021).
2. XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» (Москва, 2021).
3. Всероссийская астрономическая конференция «ВАК – 2021: Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (Москва, 2021).
4. Всероссийская астрономическая конференция с международным участием "Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2021" (Крым, пос. Научный, 2021).
5. XVII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2022).
6. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022» (Москва, 2022).
7. Всероссийская астрономическая конференция "Магнетизм и активность Солнца – 2022" (Крым, пос. Научный, 2022).
8. XVIII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2023).
9. Семинар ПРАО 14 марта 2023 г. (Пушино, 2023).
10. Симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» («Прогноз – 2023») (Троицк, 2023).
11. I конференция им. М. И. Панасюка «Проблемы космофизики» (Дубна, 2023).

12. XXIV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 2023).

Благодарности

Диссертант выражает благодарность своему научному руководителю Чашею И. В. за общее руководство, помощь в подготовке публикаций, и интерпретации результатов; научному консультанту Тюльбашеву С. А. за постановку наблюдений, помощь в обработке данных, обсуждение результатов; Субаеву И. А. за предоставление данных межпланетных мерцаний, необходимых для прогноза прихода возмущений к Земле; Тюльбашевой Г. Э. за создание сайта для прогноза геомагнитных возмущений; технической группе БСА ФИАН за обеспечение непрерывных наблюдений.

Глава 1. Метод межпланетных мерцаний. Радиотелескоп БСА ФИАН

В Пушинской радиоастрономической обсерватории ведутся наблюдения межпланетных мерцаний радиоисточников на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН в круглосуточном режиме с 2014 г. За все это время накоплен огромный объем данных, которые могут использоваться для решения различных научных задач. Результаты исследований, описанных в настоящей работе, получены с использованием данных радиотелескопа БСА ФИАН. В данной главе кратко описан метод межпланетных мерцаний, методика оценки индекса мерцаний и скорости солнечного ветра, используемые в настоящей работе, радиотелескоп БСА ФИАН.

1.1. Основы метода межпланетных мерцаний

Межпланетные мерцания были обнаружены Хьюишем в 1964 г. [19] и сразу начали применяться для исследования глобальной неоднородной и нестационарной структуры солнечного ветра. Основное преимущество данного метода состоит в том, что он позволяет исследовать области солнечного ветра, недоступные для прямых измерений с помощью космических аппаратов. Мерцания обусловлены рефракцией и дифракцией излучения от удаленных компактных радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы. В разных точках фронта плоской волны, прошедшей через межпланетную плазму, формируется разный набег фазы, в результате чего и интенсивность приходящего излучения в каждый фиксированный момент времени в разных точках будет разной. При движении межпланетной плазмы относительно наблюдателя радиотелескоп попадает то в минимумы, то в максимумы распределения интенсивности, таким образом, в записи сигнала видны флуктуации с характерным временным масштабом ~ 1 с. для рабочей частоты радиотелескопа БСА ФИАН. На рис. 1 показан пример записи сигнала мерцающего радиоисточника.

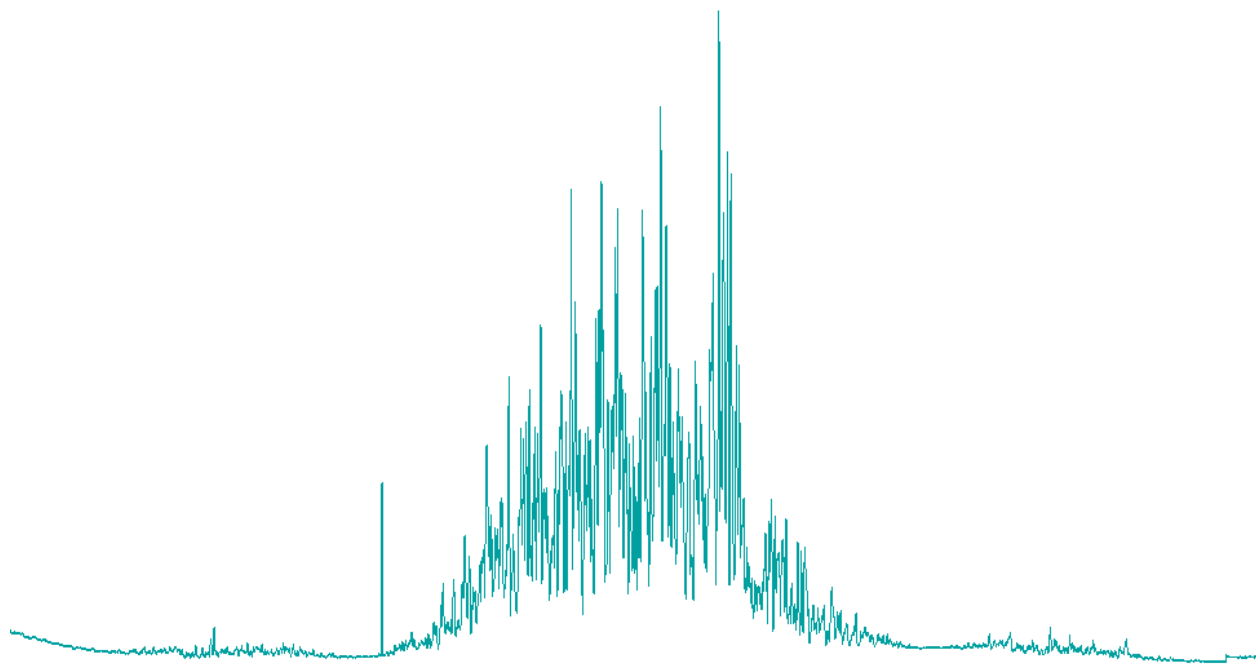


Рис. 1. Запись мерцающего радиоисточника 3С48 на радиотелескопе БСА ФИАН от 27 мая 2014 г. По горизонтальной оси время, по вертикальной – плотность потока приходящего сигнала. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

На рис. 2 показана схема наблюдений мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы. Ось Z на рис. 2 направлена на наблюдаемый радиоисточник, это луч зрения. Точка $Z = 0$ на луче зрения является прицельной точкой, самой ближайшей к Солнцу точкой на луче зрения. Поскольку в области сформировавшегося солнечного ветра электронная плотность межпланетной плазмы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца [55], то именно в данной прицельной точке самое высокое значение концентрации электронной плотности на пути излучения от источника к наблюдателю, и именно в окрестности данной точки сосредоточен эффективный модулирующий слой, дающий основной вклад в наблюдаемые межпланетные мерцания радиоисточника.

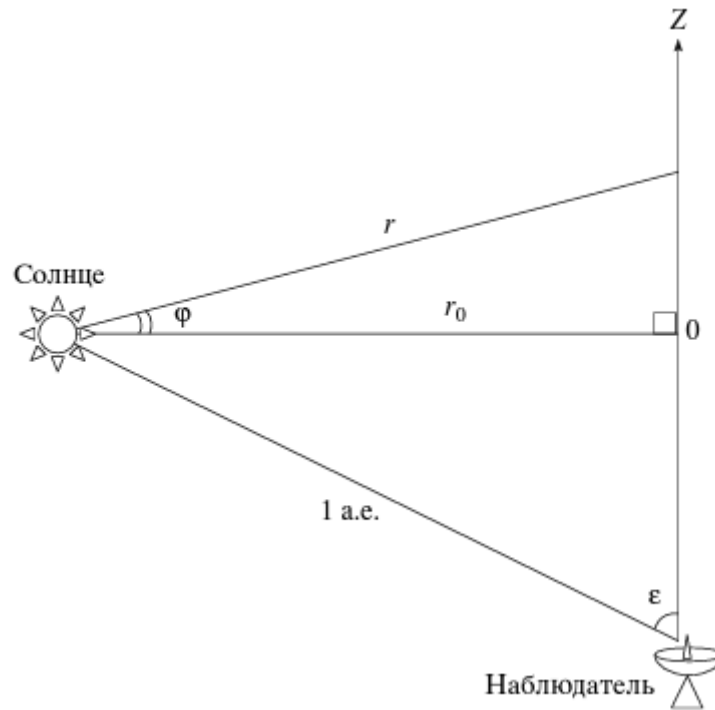


Рис. 2. Схема наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника (в случае изотропной межпланетной среды) [44]. Ось Z направлена на наблюдаемый радиоисточник.

Характерный масштаб неоднородностей, на которых происходят мерцания радиоисточников, порядка френелевского, определяется по формуле

$$a_{\phi} = \sqrt{\frac{z}{k}},$$

где z – расстояние от наблюдателя до эффективного модулирующего слоя, k – волновое число [20]. Для частоты наблюдений БСА ФИАН 111 МГц данный масштаб составляет порядка сотен километров.

В первые годы теория межпланетных мерцаний рассматривалась в приближении фазового экрана [162, 163]. Суть его заключается в том, что изменением амплитуды излучения, проходящего через модулирующий слой, можно пренебречь в виду тонкости этого слоя и считать, что меняется только фаза излучения. Данное приближение справедливо только для случаев малых элонгаций наблюдаемых радиоисточников (угловых расстояний от Солнца до источника при наблюдении с Земли) ($\epsilon < 50^\circ$). Существенным недостатком модели фазового экрана является то, что она пренебрегает протяженностью среды и изменением параметров вдоль луча зрения. Современная теория

распространения волн в случайно неоднородных протяженных средах изложена в работах [164 – 166].

Для исследования межпланетных мерцаний используются наблюдения компактных радиоисточников с угловыми размерами меньше 1'' (например, активные ядра галактик), поскольку мерцания подавляются в случае, когда проекция радиоисточника на эффективно модулирующую область больше размеров неоднородностей.

Основной характеристикой межпланетных мерцаний является индекс мерцаний, который выражается формулой:

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – измеряемая плотность потока излучения в зависимости от времени, $\langle I \rangle$ – ее усредненное по времени значение.

Индекс мерцаний с достаточно хорошей точностью можно определить только для сильных источников (когда плотность потока излучения от источника значительно превосходит шумы).

Индекс мерцаний зависит от параметров межпланетной плазмы, в том числе от флуктуаций электронной плотности (а значит есть зависимость и индекса мерцаний от элонгации источника). В случае распространения возмущений типа СМЕ или СІR распределение электронной плотности значительно меняется, а значит меняется и индекс мерцаний.

Существует теоретическая формула для индекса мерцаний в режиме слабых мерцаний [20, 167]:

$$m^2 = 2\pi \int_{-1AU \cos \varepsilon}^{+\infty} C(r) dZ \int_0^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2 \left(\frac{q^2 Z'}{2k} \right) F^2(q) q dq, \quad (2)$$

где $C(r) \sim n_e^2(r)$ – структурная константа, $n_e(r)$ – электронная плотность межпланетной плазмы, $r = \sqrt{r_0^2 + Z^2}$ – расстояние до точки на луче зрения от центра Солнца, $r_0 = 1AU \sin \varepsilon$ – расстояние прицельной точки от центра Солнца, ε – элонгация источника, координата Z на луче зрения отсчитывается от

прицельной точки в направлении к радиоисточнику; $\Phi_e(q)$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы; $\sin^2\left(\frac{q^2 Z'}{2k}\right)$ – фильтр Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, длина волна $\lambda = 2,7$ м. при частоте 111 МГц, q – пространственная частота; $F(q) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint d^2\theta \exp(-i\theta Z' q) I(\theta)$ – пространственный спектр радиоисточника, $I(\theta)$ – распределение яркости по источнику; $Z' = Z + 1 \text{ a. e.} \cdot \cos \varepsilon$ – расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя.

Еще одной характеристикой межпланетных мерцаний является временной спектр мерцаний, который используется для оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям на радиотелескопе БСА ФИАН. Скорость солнечного ветра можно оценить при наблюдении межпланетных мерцаний на нескольких радиотелескопах [24 – 31], так как с этой скоростью движется дифракционная картина, созданная неоднородностями межпланетной плазмы, по Земле. В случае однопунктовых наблюдений оценить скорость солнечного ветра можно, используя временной спектр мерцаний [36, 42], который вычисляется по формуле [34, 42]:

$$P(f) = 4A\lambda^2 \int_{-1AU \cos \varepsilon}^{+\infty} C(r) \frac{dZ}{v_{\perp}(Z)} \int_0^{+\infty} dq_{\perp} \Phi_e(q) \sin^2\left(\frac{q^2 Z'}{2k}\right) F^2(q) \Big|_{q_{\parallel} = \frac{2\pi f}{v_{\perp}(Z)}}, \quad (3)$$

где f – временная частота, $A = 5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$, $v_{\perp}(Z) = v \cos \varphi = v \frac{r_0}{\sqrt{Z^2 + r_0^2}}$ – проекция скорости солнечного ветра в точке (r, z) на картинную плоскость, v – величина скорости солнечного ветра ($v \approx 400$ км/с в окрестности Земли), q_{\parallel} – составляющая пространственной частоты вдоль луча зрения, q_{\perp} – составляющая пространственной частоты в картинной плоскости, $q = \sqrt{q_{\perp}^2 + q_{\parallel}^2}$, остальные величины описаны после формулы (2).

В рамках настоящей работы индекс мерцаний и временной спектр мерцаний вычислялись по формулам (2) и (3) соответственно с учетом ряда предположений

аналогичных предположениям в работах [40, 44] (за исключением отдельно оговоренных случаев), а именно:

1) Трехмерный спектр турбулентности является степенным и выражается формулой $\Phi_e(q) \sim q^{-n}$, где n – индекс турбулентности (предполагалось, что в соответствии с данными наблюдений [20] $n = 3,6$ – промежуточный случай между спектром Ирошникова-Крэнана [94, 95] с $n = 3,5$ и спектром Колмогорова [93] с $n \approx 3,67$);

2) Распределение межпланетной плазмы в невозмущенном случае является сферически-симметричным относительно центра Солнца, а ее электронная плотность обратно пропорциональна квадрату расстояния от Солнца $n_e(r) \sim \frac{1}{r^2}$, и в предположении о пропорциональности между абсолютным уровнем турбулентности и средней концентрации плазмы структурная константа обратно пропорциональна четвертой степени расстояния от Солнца: $C \sim \frac{1}{r^4}$;

3) Скорость солнечного ветра v всюду постоянна и направлена радиально от Солнца;

4) Распределение яркости по источнику гауссовское, сферически-симметричное, $I(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_0^2}\right)$, где θ_0 – радиус источника по уровню $\frac{1}{e}$. В этом случае пространственный спектр радиоисточника $F(q) \sim \exp\left(-\frac{1}{4}\theta_0^2 Z'^2 q^2\right)$.

В вычислениях по формулам (2) и (3) интегрирование по пространственной частоте проводилось в пределах от 0 до 10^{-4} м^{-1} с шагом 10^{-6} м^{-1} , по координате – от $-1 \text{ а. е.} \cdot \cos \varepsilon$ до 2 а. е. (после данного значения вклад незначительный) с шагом $0,05 \text{ а. е.}$

1.2. Радиотелескоп БСА ФИАН

Радиотелескоп БСА (Большая Синфазная Антенна, рис. 3) введен в эксплуатацию в 1974 г. Он представляет собой прямоугольную двумерную антенную решетку размером 187×384 метра в направлениях «Восток-Запад» и

«Север-Юг» соответственно, фазируемую по одной координате. Радиотелескоп обладает самой высокой чувствительностью в мире среди радиотелескопов метрового диапазона.

Антенна состоит из 16384 диполей, ориентированных в направлении «Восток-Запад» [168]. БСА ФИАН является радиотелескопом меридионального типа, таким образом наблюдения проводятся за счет суточного вращения Земли, одни и те же участки неба наблюдаются не чаще раза в сутки.



Рис. 3. Радиотелескоп БСА ФИАН [169].

Изначально наблюдения на радиотелескопе проводились на частоте 102,5 МГц. Однако из-за появления FM-радиовещания радиотелескоп был перестроен на частоту 111 МГц, вследствие чего эффективная площадь антенны с 25000 – 30000 м² упала до 10000 – 15000 м² [170]. Однако средства, выделенные на модернизацию радиотелескопа, позволили увеличить эффективную площадь антенны до 45000 – 50000 м² при геометрической площади ~72000 м². Ширина полосы приема модернизированного радиотелескопа составляет 2,4 МГц вместо

прежних 600 кГц, постоянная времени 0,1 с. Диаграмма направленности имеет 96 лучей, перекрывающих склонения от -8° до $+42^\circ$ [171], на них проводятся круглосуточные наблюдения с 2014 г. по настоящее время, данные которых и используются в настоящей работе. Ведутся работы по увеличению количества лучей в диаграмме направленности антенны до 128, которые будут перекрывать склонения от -8° до $+55^\circ$.

1.3. Методика обработки наблюдений

Для исследования мерцающих радиоисточников применяются несколько различных методик. Для сильных радиоисточников, таких как 3C48 и 3C298, возможно определение индекса мерцаний и их временного спектра мощности. Они дают информацию об электронной плотности межпланетной плазмы, угловом размере радиоисточников, скорости солнечного ветра. Для слабых источников считается коэффициент асимметрии и определяется структурная функция. В исследовании глобальной структуры солнечного ветра использовались наблюдения исключительно сильных радиоисточников. Обработка наблюдений основана на методах, описанных в работах [34, 35, 172, 173]. Согласно методике, изложенной в работе [172], сигнал на выходе (рис. 4) выражается следующей формулой:

$$u(t) = y(t) + I(t) \cdot K(t - \alpha) + \Delta I(t) \cdot K(t - \alpha) + n(t), \quad (4)$$

где

1. $y(t)$ – нулевой уровень записи, который хорошо аппроксимируется прямой на малых промежутках времени порядка времени прохождения источника через диаграмму направленности (около 7 мин.);

2. $I(t) \cdot K(t - \alpha)$ – «спокойная» (немерцающая) составляющая потока, $I(t)$ – интегральная плотность потока радиоисточника, $K(t - \alpha)$ – диаграмма направленности антенны, α – прямое восхождение источника;

3. $\Delta I(t) \cdot K(t - \alpha)$ – мерцающая составляющая потока, $\Delta I(t)$ – флуктуации плотности потока радиоисточника, вызванные эффектом мерцаний;

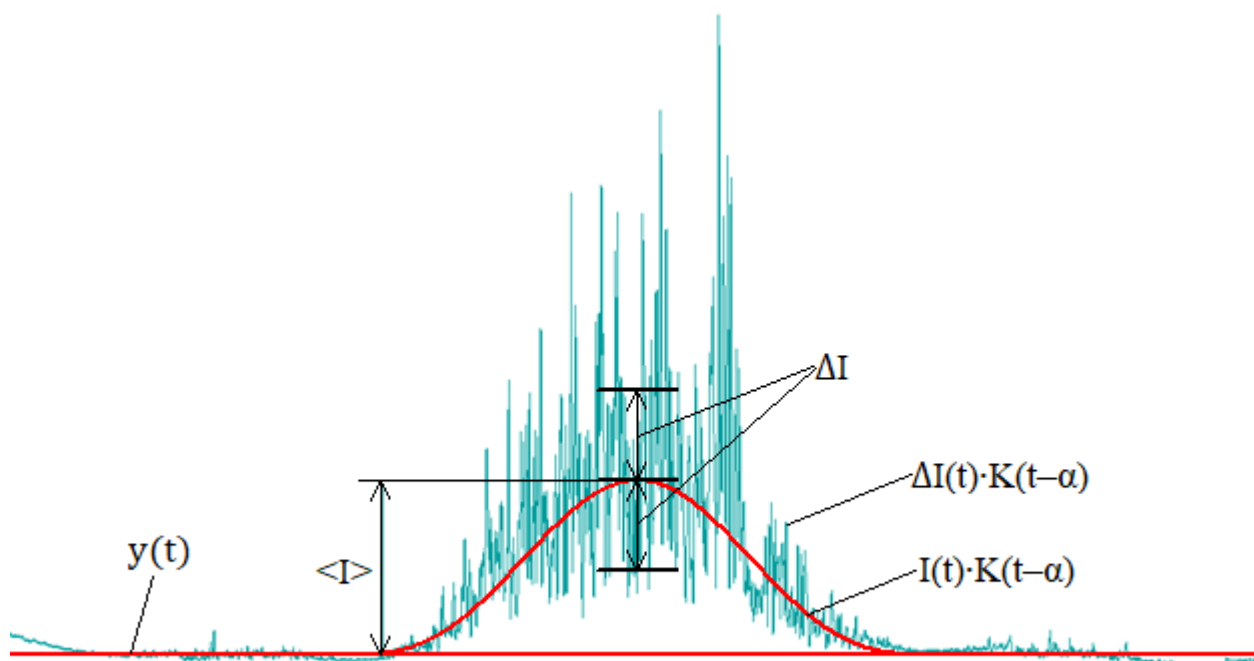
4. $n(t)$ – шумы.

Рис. 4. Сигнал от мерцающего радиоисточника 3С48. По горизонтальной оси время, по вертикальной – плотность потока приходящего сигнала. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

Для анализа наблюдений необходимо получить величины $\langle I \rangle$ и $\langle \Delta I^2 \rangle$ для оценки индекса мерцаний по формуле (1), а также временной спектр мерцаний по формуле (3) для дальнейшей оценки скорости солнечного ветра. Сигнал от источника, принятый антенной, автоматически оцифровывается. Наибольшие значения сигнала приходятся на время прохождения источника через максимум диаграммы направленности антенны. В окрестности этого максимума отношение сигнал/шум максимально.

Обработка данных в настоящей работе осуществлялась по методике, описанной в работе [42]:

1) Для каждой рассматриваемой записи сигнала оценивалось теоретическое время прохождения радиоисточника через пик диаграммы направленности радиотелескопа.

2) Время прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа оценивалось как $\frac{425^s}{\cos \delta}$, где δ – склонение источника. Для дальнейшего анализа рассматривался интервал длиной вдвое больше этого времени, с центром, соответствующим теоретическому моменту прохождения источника через пик диаграммы направленности. Такой интервал выбирался, чтобы он гарантировано содержал всю запись радиоисточника (теоретически рассчитанный и реальный момент прохождения источника через пик диаграммы направленности обычно не совпадают из-за влияния ионосферы и других факторов).

3) Вычислялся центр источника (реальное время прохождения источника через пик диаграммы направленности). Для этого рассматриваемый интервал делился на 32 части длиной примерно 30 с. (точнее, $\frac{425^s}{16 \cos \delta}$). Получался массив из средних значений сигнала на каждом из 32 интервалов чтобы, с одной стороны, компенсировать шумы и мерцания, а с другой стороны сохранить информацию о времени прохождения источника через центр диаграммы направленности. Затем вычислялись значения свертки полученного массива из 32 точек с диаграммой направленности $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ на интервале $(-\pi; \pi)$: $s_i = \sum_{j=0}^{16} u_{i+j} \left(\frac{\sin x_j}{x_j}\right)^2$ ($i = 1, \dots, 16$), где u_k – k -й элемент массива ($k = 1, \dots, 32$), $x_j = -\pi + \frac{\pi}{8}j$. Заметим, что $\left(\frac{\sin x_j}{x_j}\right)^2 \rightarrow 1$ при $x_j \rightarrow 0$. Находился максимум свертки s_m . Для более точного определения центра источника рассматривалась парабола, проходящая через точки $(m - 1, s_{m-1})$, (m, s_m) , $(m + 1, s_{m+1})$, вершина которой и принималась за искомый центр источника.

4) Вычисление индекса мерцаний. Для этого определялись необходимые значения интегральной плотности потока $\langle I \rangle$ и его флуктуации $\langle \Delta I^2 \rangle$. Для вычисления $\langle I \rangle$ определялись нули диаграммы направленности, находились усредненные сигналы в этих нулях (\min_1 и \min_2) а также в центре диаграммы направленности (\max) путем усреднения сигналов на интервалах с длиной $\frac{425^s}{16 \cos \delta}$

и центром в нулях и центре диаграммы направленности соответственно. Нулевой уровень определялся как $\min = \frac{\min_1 + \min_2}{2}$. А интегральная плотность потока вычислялась как $\langle I \rangle = \max - \min$. $\langle \Delta I^2 \rangle$ считалось путем усреднения величины $(I - \langle I \rangle)^2$ на двухминутном интервале с центром в центре диаграммы направленности, где I – плотность потока излучения от источника (измеряемый сигнал минус нулевой уровень). Далее, по формуле (1) вычислялся индекс мерцаний.

5) Вычислялся временной спектр мерцаний с использованием быстрого дискретного преобразования Фурье массива из 2048 последовательных измерений сигнала (за вычетом вписанной диаграммы направленности) с центром в центре источника (что соответствует примерно половине мощности излучения). Полученный спектр из 1024 точек делился на 256 интервалов с 4 точками в каждом. Каждый интервал усреднялся, в итоге получался спектр из 256 точек.

6) Затем полученный спектр сравнивался с теоретическими спектрами, посчитанными по формуле (3) с учетом приведенных в разделе 1.1 предположений для фиксированных величин индекса турбулентности ($n = 3,6$), углового размера источника в соответствии с данными в работе [174], его элонгации на момент наблюдения, но для разных скоростей солнечного ветра от 200 до 1200 км/с с интервалом 10 км/с. Сравнение спектров проводилось начиная с 4-й точки спектров и до точки, где разница между значением наблюдательного спектра и фоновыми шумами на высоких частотах составляют около 70% от разницы значения на вершине спектра и фоновыми шумами. Значение на вершине спектра определялось как среднее значение точек с 4-й по 8-ю. Фоновые шумы определялись как среднее значение последних 20 точек спектра. Перечисленные сравнения проводились в логарифмическом масштабе. Такой выбор конечной точки сравнения обоснован тем, что неизвестен точный угловой размер источника, поэтому из сравнения убиралась та часть спектра, которая сильно зависит от углового размера. Первые три точки не рассматривались из-за влияния ионосферных мерцаний на низких частотах с характерным временным масштабом

~ 10 с. (у межпланетных мерцаний характерный временной масштаб ~ 1 с, что позволяет отделить их от ионосферных мерцаний). Наилучшее вписывание теоретического спектра в спектр по наблюдениям выбиралось методом наименьших квадратов в линейном масштабе (рис. 5). Скорость солнечного ветра, для которой посчитан наилучший теоретический спектр и являлась оценкой скорости солнечного ветра на момент обнаружения данного источника.

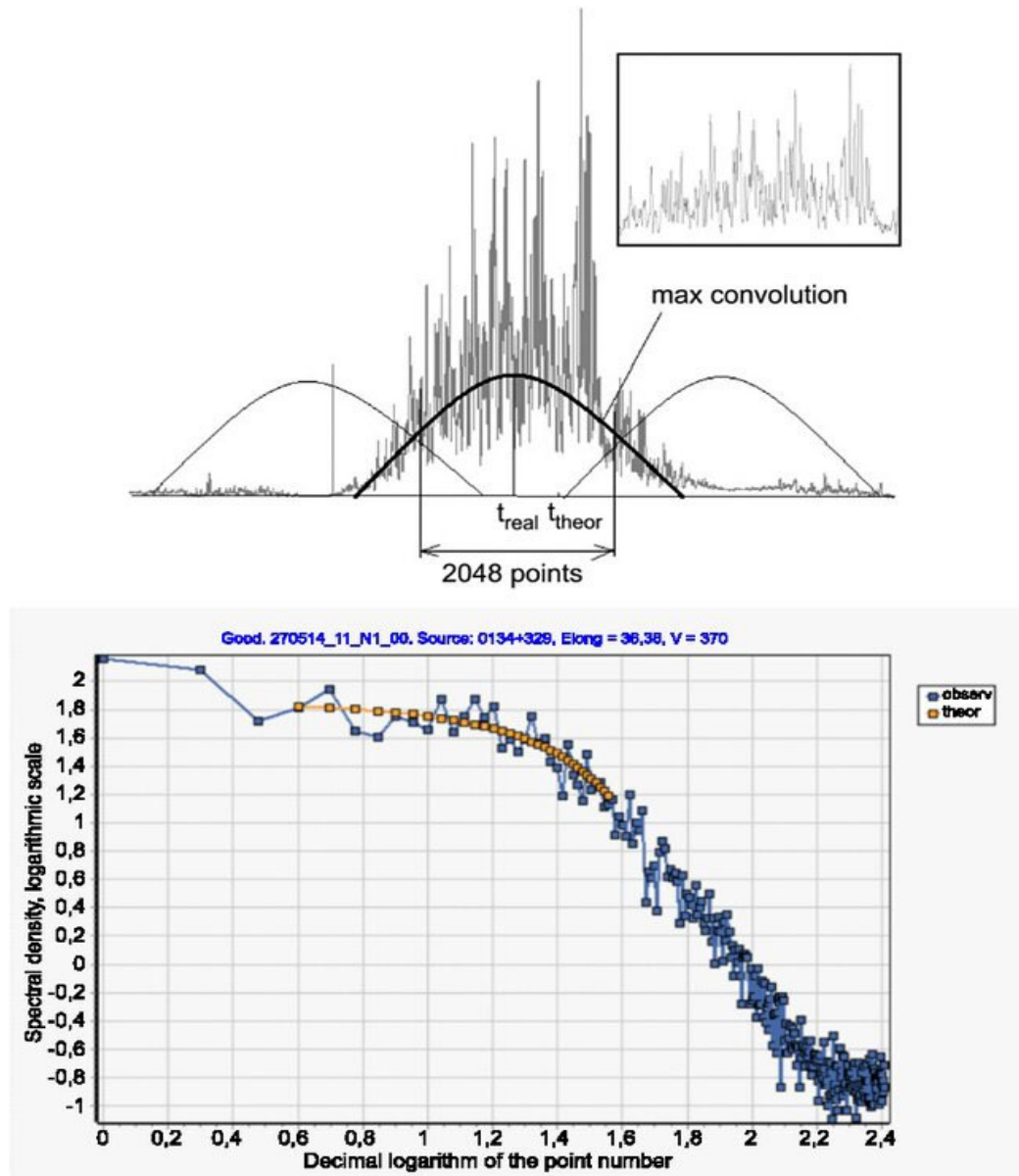


Рис. 5. Пример обработки данных. Верхняя панель – исходная запись источника 3C48, t_{theor} и t_{real} – прямые восхождения, соответственно, теоретическое, вычисленное по координатам источника, и реальное, полученное методом максимальной свертки. Вкладка в верхней панели показывает 2048 точек в центральной части записи, которые использовались для построения спектра мерцаний. Нижняя панель – наблюдаемый спектр мерцаний источника 3C48 (синий) и вписанный в него теоретический спектр (оранжевый). Результат диссертанта из работы [42].

1.4. Выводы по главе 1

В Пушинской радиоастрономической обсерватории для исследования солнечного ветра используются наблюдения межпланетных мерцаний радиоисточников. Причиной межпланетных мерцаний является рефракция и дифракция излучения от радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы. Наибольший вклад в мерцания дают области межпланетной плазмы с наибольшей электронной плотностью. Поскольку электронная плотность межпланетной плазмы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Солнца, то наибольший вклад в мерцания дают области вблизи прицельной (ближайшей к центру Солнца) точки на луче зрения к радиоисточнику. Основными характеристиками межпланетных мерцаний являются индекс мерцаний (отношение среднеквадратичного отклонения плотности принимаемого потока к среднему значению плотности потока радиоисточника) и временной спектр мерцаний.

Круглосуточные наблюдения межпланетных мерцаний проводятся на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН на склонениях от -8° до $+42^\circ$ с 2014 г. БСА ФИАН – радиотелескоп меридионального типа, то есть наблюдения проводятся в плоскости земного меридиана, за счет вращения Земли, одни и те же участки неба наблюдаются не чаще раза в сутки. В настоящей работе используются данные, полученные с 2014 по 2023 гг. на центральной частоте 111 МГц. Характерный пространственный масштаб межпланетных мерцаний на этой частоте порядка сотен километров, временной – порядка 1 с.

Описанная в настоящей главе методика оценки индекса мерцаний и скорости солнечного ветра позволила в дальнейшем получить результаты исследования глобальной структуры солнечного ветра, описанные в следующей главе.

Глава 2. Глобальная структура солнечного ветра на спаде 24-го цикла солнечной активности

В главе 2 изложены совместные результаты диссертанта в работах [42, 167, 175].

Проводилось исследование глобальной структуры солнечного ветра на спаде 24 цикла солнечной активности с 2014 по 2019 гг. Получены оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний сильных радиоисточников 3C48 и 3C298. Получена радиальная зависимость индекса мерцаний за период с 2015 по 2019 гг. по наблюдениям мерцаний радиоисточника 3C48, сделан вывод о наличии приэкваториального плотного токового слоя. По тем же данным исследована зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Сделан вывод о пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению.

2.1. Скорость солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний

Получены оценки скоростей солнечного ветра по методике, описанной в разделе 1.3, с 2014 по 2019 гг. по наблюдениям межпланетных мерцаний сильных радиоисточников 3C48 и 3C298. Проводилось сравнение полученных оценок скоростей солнечного ветра с соответствующими оценками [176], полученными в Институте исследования околоземного космического пространства (Institute for Space-Earth Environmental Research, сокр. ISEE) Университета Нагоя (Япония), по методике, описанной в [33], суть которой заключается в использовании временной задержки прихода сигнала между тремя радиотелескопами. Предыдущие сравнения однопунктовых и трехпунктовых оценок скоростей солнечного ветра [40, 41, 177] показали хорошее соответствие оценок. В настоящей работе использовались более расширенные данные, которые позволяют сравнить однопунктовые и трехпунктовые оценки в максимуме и на фазе спада цикла солнечной активности, что дает возможность для использования

однопунктовых данных межпланетных мерцаний для исследования динамики пространственного распределения скоростей солнечного ветра.

В сравнительный анализ включались не все оценки скорости солнечного ветра, а только те, которые удовлетворяют нижеперечисленным критериям [42]:

1) Оценки скорости солнечного ветра были проведены только за те дни, когда элонгация данного источника была в диапазоне от 25° до 60° . Это обосновывается тем, что на малых элонгациях (меньше 25°) мерцания переходят в режим насыщения и подавляются эффектами, связанными с угловым размером источника. На элонгациях больше 60° точность оценок ISEE падает, поэтому элонгации больше 60° также исключались из рассмотрения. Кроме того, на больших элонгациях может влиять анизотропия межпланетного пространства из-за близлежащих к Земле областей.

2) Проводился анализ мерцаний. Для этого проводилось вычисление дисперсии флуктуаций на пике диаграммы направленности и в ее нулях с использованием трехточечного медианного фильтра с шагом 2 (то есть среди 1-й, 3-й и 5-й точки исходного массива для расчета дисперсии выбиралась точка с медианным значением, затем медианное значение выбиралось среди точек 2-й, 4-й и 6-й, затем среди 3-й, 5-й и 7-й и так до конца массива). Если отношение дисперсии флуктуации на вершине диаграммы направленности к меньшей из дисперсий в нулях диаграммы направленности оказывалось меньше 2, то этот случай исключался из рассмотрения, так как в этом случае мерцания радиоисточника подавляются шумами.

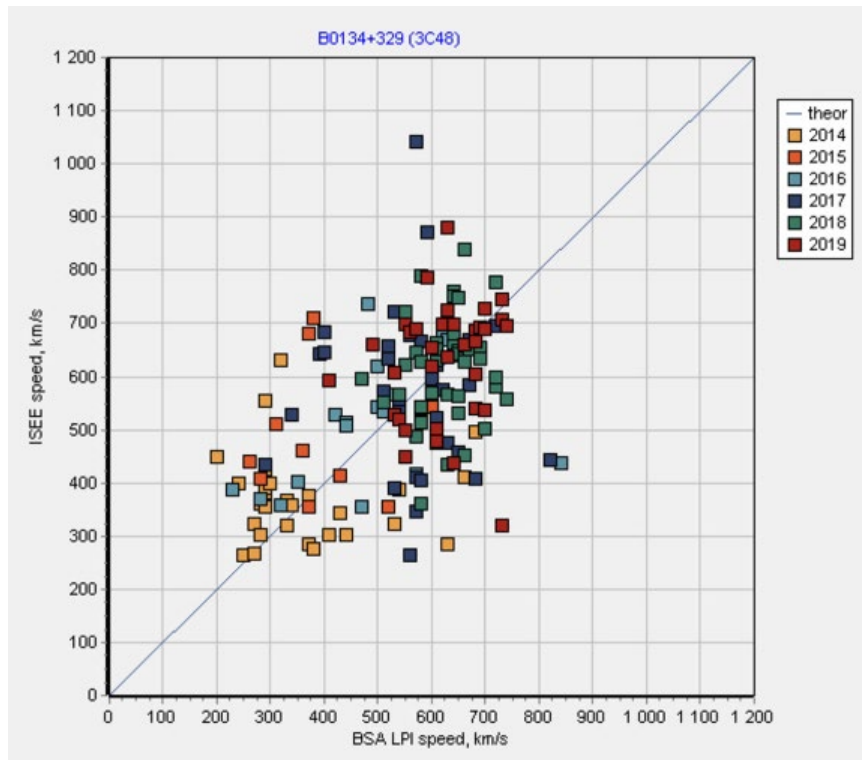
3) Если номер конечной точки для сравнения наблюдаемого спектра с теоретическими был 12 или меньше, то этот случай также исключался из рассмотрения, чтобы исключить возможное влияние ионосферных мерцаний.

4) Оставшимся спектрам присваивался статус «плохих» и «хороших». Для этого вычислялась вариация для каждого наблюдаемого спектра (среднеквадратичное отклонение значений в его точках от соответствующих точек в выбранном теоретическом спектре начиная с 4-й точки и до точки конца промежутка сравнения). Затем для каждого источника и за каждый год

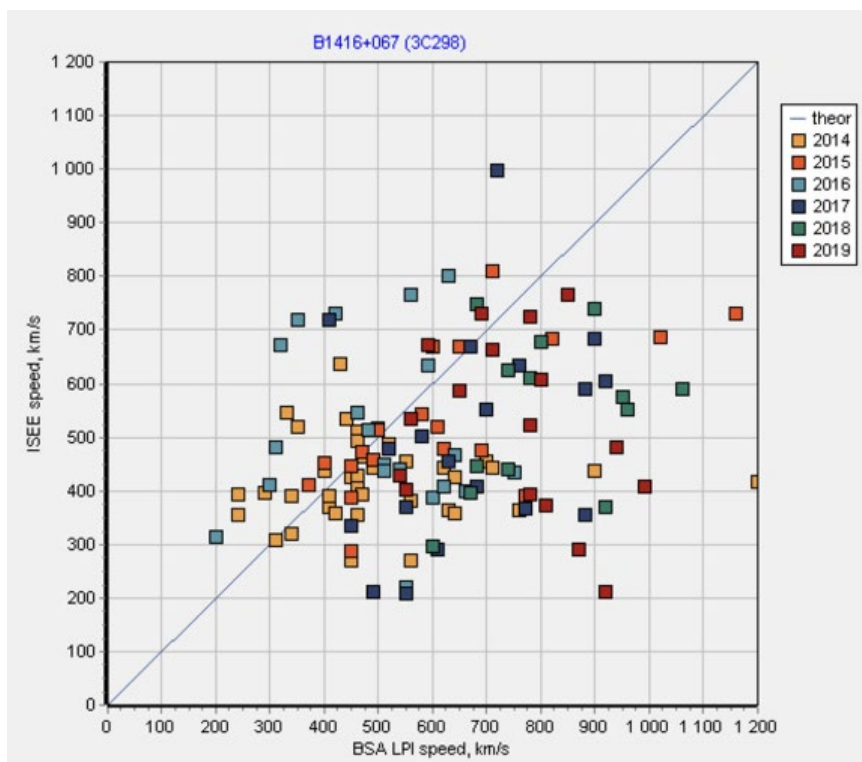
наблюдений вычислялась средняя вариация. Спектры, для которых вариация получилась как минимум в 1,5 раза выше средней вариации, классифицировались как «плохие», остальные спектры классифицировались как «хорошие». Этот критерий использовался для автоматического отсеивания записей, время которых совпадает со временем калибровки радиотелескопа, проводимой каждые 4 часа. Для дальнейшего анализа использовались случаи с «хорошими» спектрами.

5) Затем отсеивались точки, которые находились заведомо далеко от остальных точек на графиках сравнения оценок скоростей солнечного ветра, полученным по наблюдениям на БСА ФИАН, и в ISEE (рис. 6). Для этого проводилась аппроксимация функцией $y = x + b$, где x соответствует оценке скорости, полученной по данным БСА ФИАН, y – по данным наблюдений в ISEE. Величина b определялась с использованием метода наименьших квадратов. Вычислялось среднеквадратичное отклонение точек от аппроксимирующей прямой линии. Если отклонение от прямой конкретной точки в 3 или более раза превышает среднеквадратичное отклонение, то такая точка исключалась из рассмотрения (на рис. 6 такие точки не отмечены).

На рис. 6 показаны результаты сравнения оценок скоростей солнечного ветра, полученных двумя указанными выше способами. В случае источника 3C48 видно, что теоретическая прямая $y = x$ проходит вблизи центра облака точек, то есть в среднем оценки скоростей солнечного ветра совпадают. В случае же источника 3C298 оценки на БСА превышают оценки в ISEE. Наглядно это можно видеть на рис. 7, где приведен график среднегодовых оценок скорости солнечного ветра, полученных двумя способами, по данным на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Сравнение оценок скоростей солнечного ветра по наблюдениям на БСА ФИАН в ПРАО и в ISEE (Университет Нагойя в Японии) источников: а) 3С48, б) 3С298. По оси абсцисс оценка скорости по наблюдениям на БСА ФИАН, по оси ординат – в ISEE. Цвет за каждый год наблюдений показан в панели справа. Нанесена теоретическая прямая $y = x$. Результат диссертанта из работы [42].

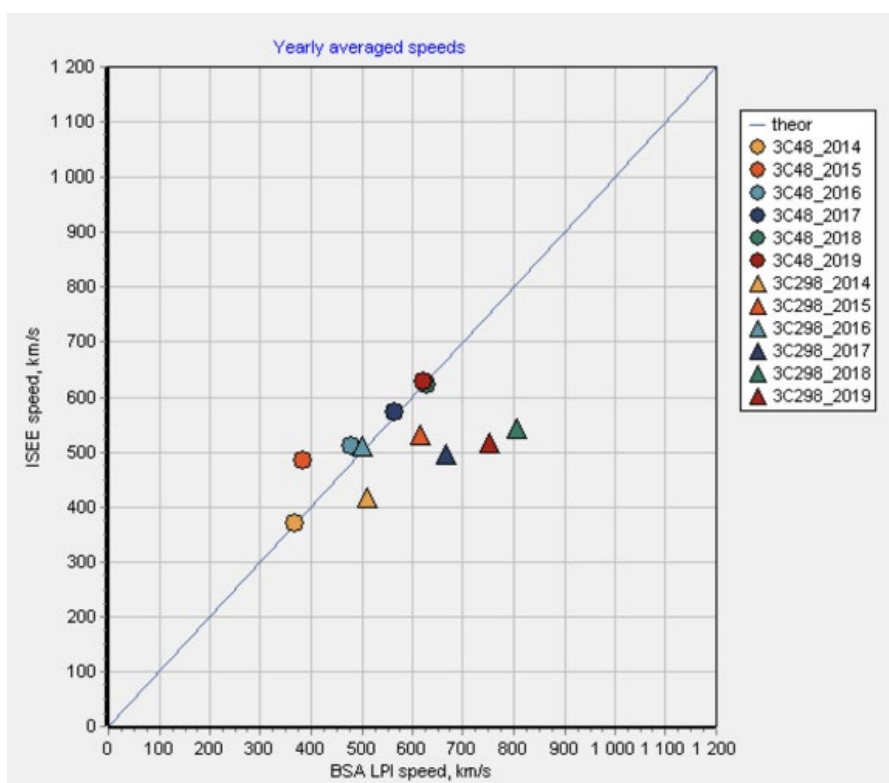


Рис. 7. Сравнение среднегодовых оценок скоростей солнечного ветра по наблюдениям на БСА ФИАН в ПРАО и в ISEE (Университет Нагойя в Японии). Аналогично рис. 6, кружочки – для источника 3C48, треугольники – для 3C298. Результат диссертанта из работы [42].

Из рис. 7 видно, что оценки скоростей солнечного ветра, полученные обоими методами по наблюдениям обоих источников, показывают рост на спаде 24-го цикла солнечной активности, максимум которого пришелся на 2014 г. и продолжался до конца 2019 г., что согласуется с теорией, согласно которой в максимуме солнечной активности медленный ветер наблюдается на всех гелиоширотах, а в минимуме имеются высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр на высоких гелиоширотах. Этот результат уже был показан в работе [54] по данным измерений на космическом аппарате Ulysses, а также по многолетним наблюдениям межпланетных мерцаний [33, 100].

Вычисленные значения коэффициентов кросс-корреляции по всем данным рис. 6 составили 0,48 для источника 3C48 и 0,25 для источника 3C298. Невысокая корреляция означает, что существует большой разброс скоростей. Коэффициенты кросс-корреляции на годовых интервалах еще ниже, чем для всего 6-летнего интервала. Очевидно, разброс связан с шумами при оценке скоростей солнечного

ветра в каждый день наблюдений. В таблице 1 приведены среднегодовые значения скоростей солнечного ветра с погрешностями измерений и их среднеквадратичное отклонение. Погрешность измерения скорости оценивалась по формуле $\Delta v = v \frac{\sigma_{ш}}{h_c}$, где v – измеренная скорость солнечного ветра, $\sigma_{ш}$ – дисперсия шумов в логарифмическом масштабе ($\sigma_{ш} = \sqrt{\langle (\ln P_{теор} - \ln P_{набл})^2 \rangle}$) на отрезке сравнения теоретического спектра с наблюдательным, h_c – высота наблюдательного спектра в логарифмическом масштабе.

Таблица 1. Дополнительная информация, не включенная в рис. 6 – 7. Показаны среднегодовые значения оценок скорости солнечного ветра, их среднеквадратичное отклонение (RMS) для источников 3C48 и 3C298 в км/с и также включено количество точек для каждого источника за каждый год. Результат диссертанта из работы [42].

	Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019
3C48	BSA	368±24	385±29	479±32	565±15	629±9	623±13
	BSA RMS	127	96	137	98	58	76
	ISEE	369±16	485±34	511±27	571±22	623±15	627±19
	ISEE RMS	84	113	114	139	98	112
	Чисто точек	28	11	18	40	43	34
3C298	BSA	510±29	615±44	500±31	667±35	806±37	754±33
	BSA RMS	184	199	140	152	134	136
	ISEE	417±12	530±30	512±35	496±44	543±38	517±38
	ISEE RMS	73	132	155	192	138	158
	Число точек	39	20	20	19	13	17

Из таблицы 1 видно, что оценки скоростей, полученные для 3C48 по наблюдениям в ISEE слегка превышают оценки, полученные на БСА, но все же совпадают в пределах погрешностей измерений за исключением 2015 г., что в некоторой степени связано с самым высоким значением индекса мерцаний (усредненным за год) за весь 24-й цикл солнечной активности, наблюдавшимся именно в 2015 г. [174]. Совсем иная ситуация для источника 3C298, где оценки по БСА заведомо превышают оценки в ISEE за исключением оценок за 2016 г. Также

отличаются оценки скоростей, полученных по данным БСА для разных источников, для оценок в ISEE это разница существенно меньше. Эта разница может быть обусловлена недостаточной точностью модели распределения межпланетной плазмы вдоль луча зрения. Чтобы показать это, вычислялась разность оценок скоростей солнечного ветра $\Delta V = V_1 - V_3$, где V_1 – оценка скорости солнечного ветра по однопунктовым наблюдениям на БСА ФИАН, V_3 – по трехпунктовым наблюдениям в ISEE, в зависимости от верхнего предела интегрирования по координате в формуле (3) для временного спектра мерцаний. Зависимость разницы оценок скоростей солнечного ветра от верхнего предела интегрирования по координате в формуле для временного спектра мерцаний для обоих источников показана на рис. 8. Разница оценок скоростей маленькая, порядка нескольких процентов, при большом пределе интегрирования в случае компактного источника 3C48. В случае более протяженного источника 3C298 минимальная разница (10 – 20%) в случае интегрирования на симметричном интервале $-\cos \varepsilon < z < \cos \varepsilon$. При увеличении верхнего предела интегрирования разница оценок скоростей солнечного ветра для протяженного источника будет возрастать. Таким образом, чтобы уменьшить разницу оценок скоростей солнечного ветра, в случае компактного источника следует интегрировать до 2 а.е. (далее вклад будет незначительным, это также видно из рис. 8). В случае протяженного источника интегрировать следует по симметричному интервалу. Понятия «компактный» и «протяженный» радиоисточник следует разделять по угловому размеру Френеля [42]:

$$\theta_{\text{фр}} = (2k \cdot 1 \text{ а. е.} \cdot \cos \varepsilon)^{-1/2}, \quad (5)$$

где k – волновое число, ε – элонгация источника.

Угловые размеры для 3C48 $\theta_{3C48} \approx 0,33''$, для 3C298 $\theta_{3C298} \approx 0,52''$ [174], угловой размер Френеля при частоте 111 МГц составляет $\theta_{\text{фр}} \approx 0,35''$. Компактными радиоисточниками считаются те, угловой размер которых меньше углового размера Френеля, как у 3C48, а протяженными – у которых угловой размер больше френелевского, как у 3C298.

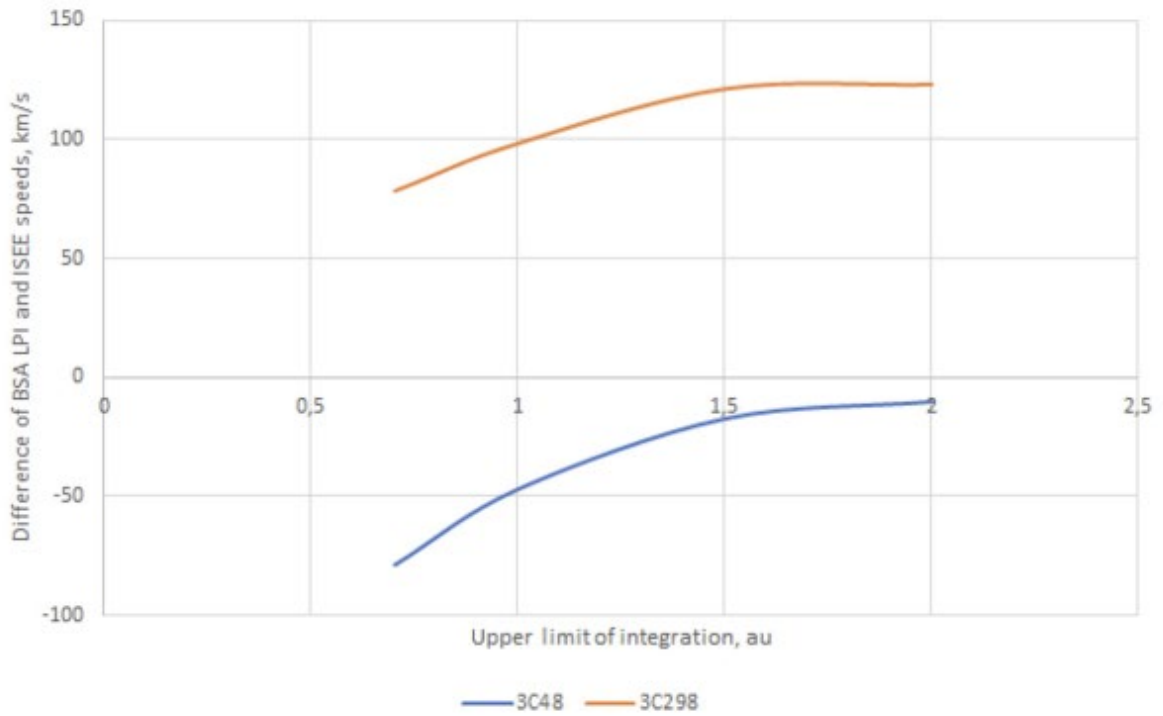
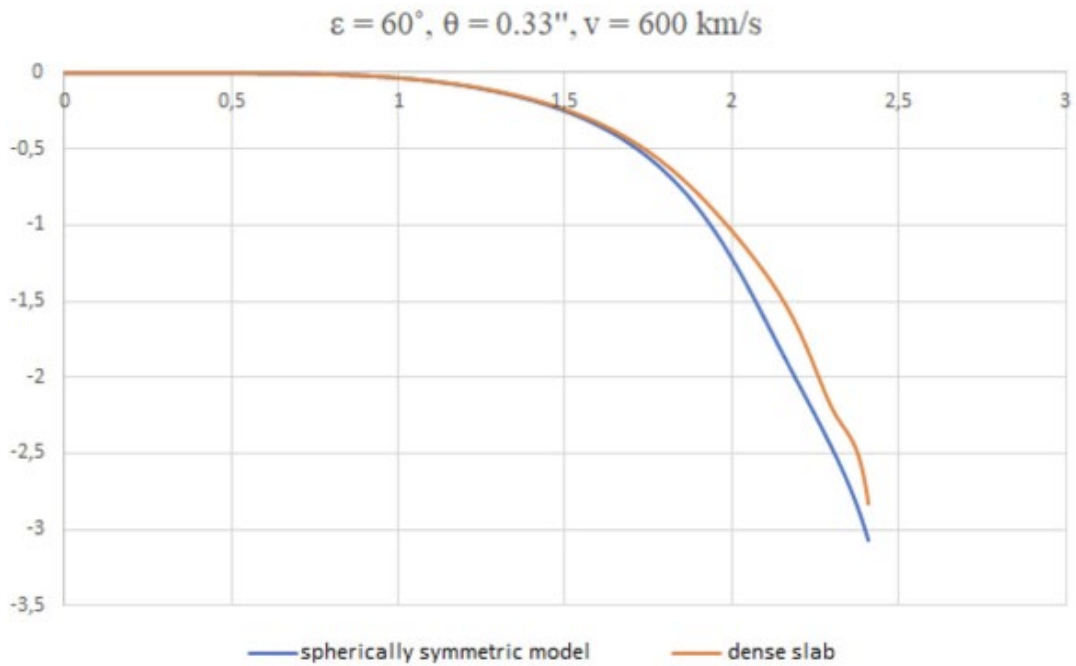
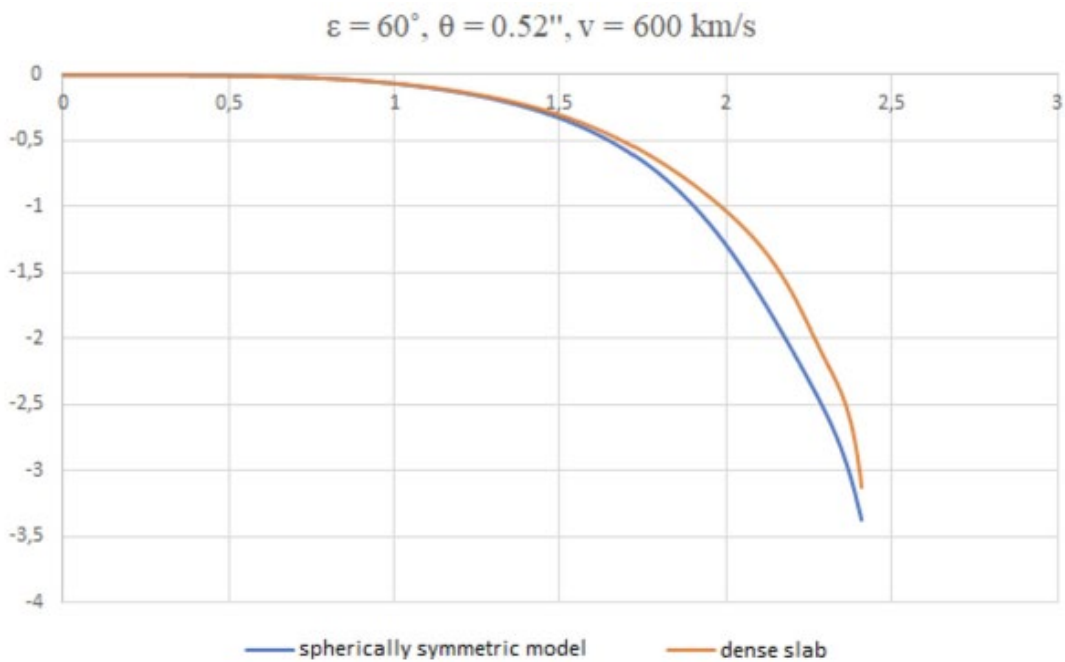


Рис. 8. Зависимость разницы оценок скоростей солнечного ветра ($V_1 - V_3$) от верхнего предела интегрирования по координате в формуле (3) для временного спектра мерцаний z_{max} . Результат диссертанта из работы [42].

В случае компактного радиоисточника слои межпланетной плазмы, расположенные симметрично относительно прицельной точки, дают сравнимый вклад в спектр межпланетных мерцаний, в то же время для протяженного источника мерцания более чувствительны к слою между прицельной точкой и наблюдателем, в том числе из-за влияния межпланетной плазмы вблизи Земли. Это можно видеть на рис. 9, где изображены спектры мерцаний на элонгациях 60° для источников 3C48 и 3C298 в случае наличия плотного слоя в окрестности 0,2 а.е. от Земли (оранжевая линия), в котором электронная плотность удвоена по сравнению со сферически-симметричным случаем, при этом структурная константа C внутри слоя будет в 4 раза выше, в сравнении с аналогичными спектрами без учета плотного слоя (синяя линия).



a)



б)

Рис. 9. Теоретические временные спектры мерцаний с учетом плотного слоя вблизи Земли (оранжевая линия) в сравнении со сферически-симметричным случаем (синяя линия) для источника: а) 3C48, б) 3C298. Результат диссертанта из работы [42].

Из рис. 9 видно, что наличие плотного слоя приводит к уширению теоретических спектров, что эквивалентно уменьшению оценки скорости V_1 . Это уширение наблюдается для компактного радиоисточника в меньшей степени по

сравнению со случаем протяженного радиоисточника. Для получения результатов на рис. 6 и 7 рассматривалась сферически-симметричная модель, что и привело к высоким оценкам скорости солнечного ветра для протяженного источника.

Также рассматривалась анизотропия протяженного источника 3C298. При оценках скоростей солнечного ветра источник предполагался сферически симметричным с угловым размером $0,52''$. Однако, как показали интерферометрические исследования [178], форма этого источника более сложная. Он состоит из двух примерно симметричных компонент с угловым размером $0,5''$, отделенных друг от друга на $1,6''$ в направлении “Восток – Запад” (E-W). Наблюдаемая разность между V_1 и V_3 может зависеть от угла между вектором скорости солнечного ветра в прицельной точке и главной осью радиоисточника. Этот угол меняется при прохождении источника за диском Солнца. Распределение яркости по источнику, входящее в формулу (3) для временного спектра мерцаний, в случае двойного источника приобретает вид [42]:

$$F^2(q) = \exp\left(-\frac{1}{2}\theta_0^2 Z'^2 q^2\right) \cos^2(Z'\vec{\theta}_1\vec{q}), \quad (6)$$

где θ_0 – угловой размер каждой из двух одинаковых компонент радиоисточника, $\vec{\theta}_1$ соответствует половине расстояния между двумя компонентами в направлении E-W, то есть $|\vec{\theta}_1| = 0,8''$.

Используя выражение (6) для распределения яркости по источнику в вычислении теоретических спектров, можно показать, как меняется оценка скорости солнечного ветра при изменении угла между вектором скорости солнечного ветра в прицельной точке и осью двойного источника. На примере данных за 9 сентября 2014 г. по источнику 3C298 показано, что оценка скорости солнечного ветра получается 500 км/с при ориентации источника параллельно вектору скорости солнечного ветра в прицельной точке (такой же результат получился без учета анизотропии), и 1250 км/с если источник ориентирован перпендикулярно вектору скорости. То есть, в зависимости от угла между осью источника и вектором скорости солнечного ветра в прицельной точке оценка скорости солнечного ветра может отличаться в 2,5 раза.

Таким образом, модель, описанная в данном разделе, может быть использована для оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям компактного источника. В случае протяженного источника необходимо уточнять модель межпланетной плазмы, учитывать влияние близлежащих к Земле слоев, а также анизотропию самого источника. Для получения дальнейших результатов в рамках текущей главы был использован только компактный радиоисточник 3С48.

2.2. Радиальная зависимость индекса мерцаний в 2015 – 2019 гг.

По методике, описанной в разделе 1.3, оценивался индекс мерцаний источника 3С48 в период с 2015 по 2019 гг. Учитывались оценки только за те дни, когда временной спектр мерцаний классифицировался как «хороший» по критериям, перечисленным в разделе 2.1. Таким образом, исследовалась динамика пространственного распределения индексов мерцаний на спаде 24-го цикла солнечной активности. На рис. 10 представлены зависимости индекса мерцаний от гелиоцентрического расстояния (синуса элонгации) за каждый год наблюдений в логарифмическом масштабе. Предполагалась степенная зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца, поэтому в экспериментальные точки в логарифмическом масштабе методом наименьших квадратов вписывалась аппроксимирующая прямая (оранжевая линия). При вписывании прямой для каждого года отбрасывались точки, отклонение которых от аппроксимирующей прямой в 3 и более раза превышало среднеквадратичное отклонение точек от этой прямой. Затем определялась аппроксимирующая прямая по оставшимся точкам, отбрасывались те точки, отклонение которых от новой прямой в 3 и более раза превышало среднеквадратичное отклонение, и так до тех пор, пока точки не переставали отсеиваться. Точки, отброшенные при вписывании прямой, дальше не учитывались и на рис. 10 не показаны. Также вписывалась теоретическая зависимость индекса мерцаний, вычисленного по формуле (2) с учетом предположений, перечисленных в разделе 1.1 (желтая линия).

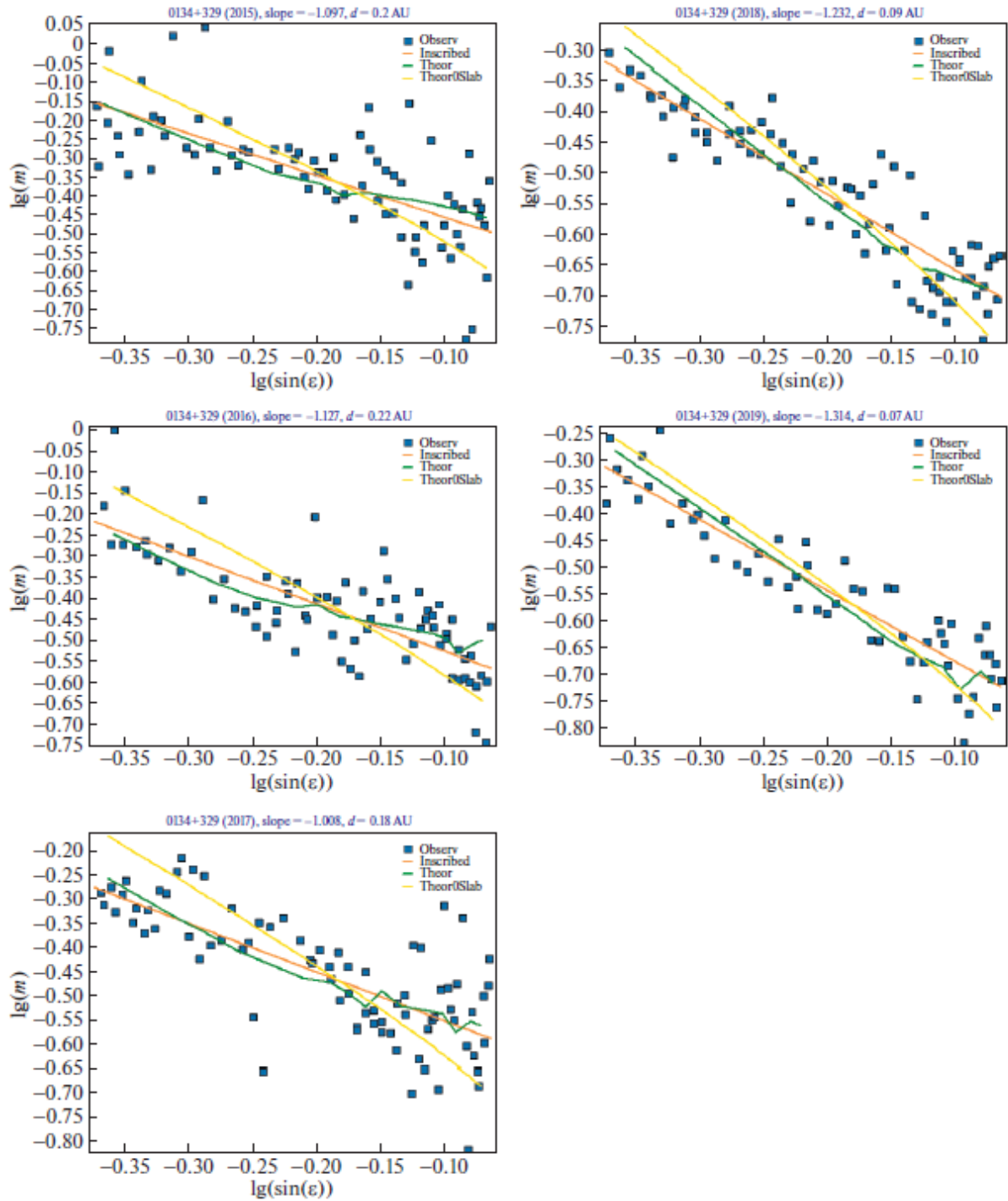


Рис. 10. Измеренная радиальная зависимость индекса мерцаний в логарифмическом масштабе по данным наблюдений источника 3С48 в 2015 – 2019 гг. Оранжевым показана вписанная методом наименьших квадратов прямая. Желтым показана теоретическая радиальная зависимость индекса мерцаний, рассчитанного по формуле (2), для случая сферически-симметричной межпланетной среды, зеленым – для случая наличия приэкваториального токового слоя. Информация сверху: источник 0134+329 (или 3С48) (год наблюдений), наклон вписанной прямой, полутолщина приэкваториального плотного токового слоя. Результат диссертанта из работы [167].

Как видно из рис. 10, теоретическая зависимость не совпадает со вписанной прямой. Желтая линия соответствует случаю сферически-симметричной межпланетной среды. В этой простейшей модели зависимость $m(r_0) \sim r_0^{-\gamma}$ определяется показателем степени в радиальной зависимости структурной константы $C \sim r^{-p}$. В случае $p = -4$ (сферически-симметричный случай) коэффициент γ близок к 1,8. Для вписанных прямых на рис. 10 этот коэффициент составил 1,097; 1,127; 1,008; 1,232; 1,314 для 2015 – 2019 гг. соответственно, то есть вписанная зависимость более пологая, чем теоретическая. Данное уплощение может быть связано с наличием токового слоя с повышенной концентрацией электронной плотности вблизи солнечного экватора. Для объяснения наблюдаемой радиальной зависимости предполагалось, что электронная плотность внутри плотного токового слоя в два раза выше, чем в случае сферически-симметричной модели, пренебрегалось наклоном эклиптики и считалось, что Земля обращается в плоскости солнечного экватора. Тогда структурная константа, входящая в формулу для индекса мерцаний, модифицируется следующим образом:

$$C(r) = \begin{cases} \frac{4}{r^4}, & \text{если } 0 < z' < \frac{d}{\sin \lambda}, \\ \frac{1}{r^4}, & \text{если } z' > \frac{d}{\sin \lambda}. \end{cases} \quad (7)$$

где d – полутолщина токового слоя, симметричного относительно плоскости экватора, λ – гелиоширота наблюдаемого источника. Соотношение (7) означает, что часть луча зрения, погруженная в слой, увеличивается при уменьшении гелиошироты источника. При расчетах теоретической зависимости индекса мерцаний от гелиоцентрического расстояния использовалась зависимость гелиошироты источника от его элонгации (рис. 11), гелиоширота рассчитывалась для каждого сеанса по специальной программе.

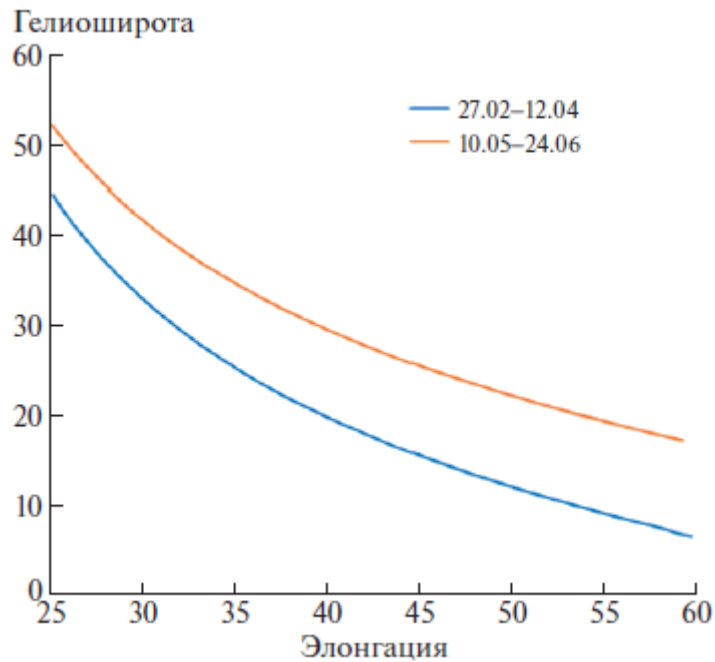


Рис. 11. Зависимость гелиошироты источника от его элонгации на фазе сближения с Солнцем (синяя линия) и на фазе удаления от него (оранжевая линия). Результат диссертанта из работы [167].

Для определения полутолщины приэкваториального слоя использовался метод наименьших квадратов, полутолщина d варьировалась от 0 до 0,5 а.е. с шагом 0,01 а.е. На рис. 10 теоретическая зависимость с учетом слоя показана зеленой линией. Изломы зеленой линии обусловлены разными значениями гелиошироты источника при одном и том же значении его элонгации на фазах сближения с Солнцем и удаления от него (рис. 11). Теоретические зависимости с учетом слоя оказываются ближе к вписанным прямым, чем зависимости в случае сферически-симметричной межпланетной среды, что обосновывает наличие плотного приэкваториального токового слоя. Результаты моделирования на рис. 10 показывают, что на фазе спада солнечной активности его полутолщина $d \approx 0,2$ а.е. в 2015 – 2017 гг., и $d \approx 0,1$ а.е. вблизи минимума в 2018 – 2019 гг.

Причиной утончения приэкваториального токового слоя, по-видимому, является взаимодействие межпланетной плазмы с корональными магнитными полями в области сформировавшегося течения плазмы. На рис. 12 показаны синоптические карты распределения радиальной составляющей магнитного поля

на поверхности источника на гелиоцентрическом расстоянии 2,5 радиуса Солнца, полученные в лаборатории Вилкокса для кэррингтоновских оборотов 2161 (2015 г.) и 2177 (2016 г.) в левой панели рис. 12, и 2201 (2018 г.) и 2218 (2019 г.) – в правой панели.

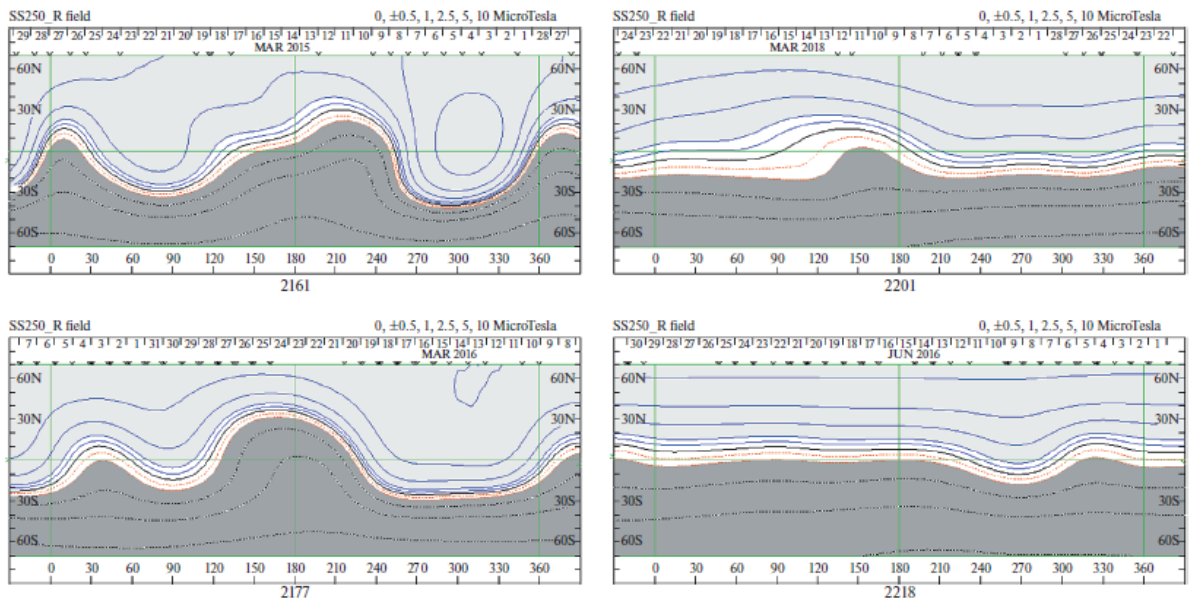


Рис. 12. Синоптические карты распределения радиальной составляющей магнитного поля на поверхности источника на гелиоцентрическом расстоянии 2,5 радиуса Солнца по данным лаборатории Вилкокса [179]: в левой панели для кэррингтоновских оборотов 2161 в 2015 г. и 2177 в 2016 г., в правой панели – 2201 в 2018 г. и 2218 в 2019 г.

На рис. 12 видно, что нейтральная линия магнитного поля вблизи максимума солнечной активности в 2015 – 2016 гг. имеет довольно сложную конфигурацию и за один оборот может несколько раз пересекать плоскость солнечного экватора. Вблизи минимума солнечной активности в 2018 – 2019 гг. магнитное поле имеет более упорядоченную структуру. Это может служить объяснением, почему вблизи максимума солнечной активности приэкваториальный плотный токовый слой значительно толще, чем вблизи минимума активности.

2.3. О корреляции индекса мерцаний и скорости солнечного ветра

Полученные ранее оценки скорости солнечного ветра и индекса межпланетных мерцаний использовались для анализа корреляции этих величин. Для анализа использовались те же точки, что и в разделе 2.2, из них отбрасывались точки, в которых оценка индекса мерцаний превышала максимальное наблюдаемое значение 0,6, что не было учтено в предыдущем исследовании. На рис. 13 показана измеренная зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра по наблюдениям мерцаний источника 3С48 за 2015 – 2019 гг.

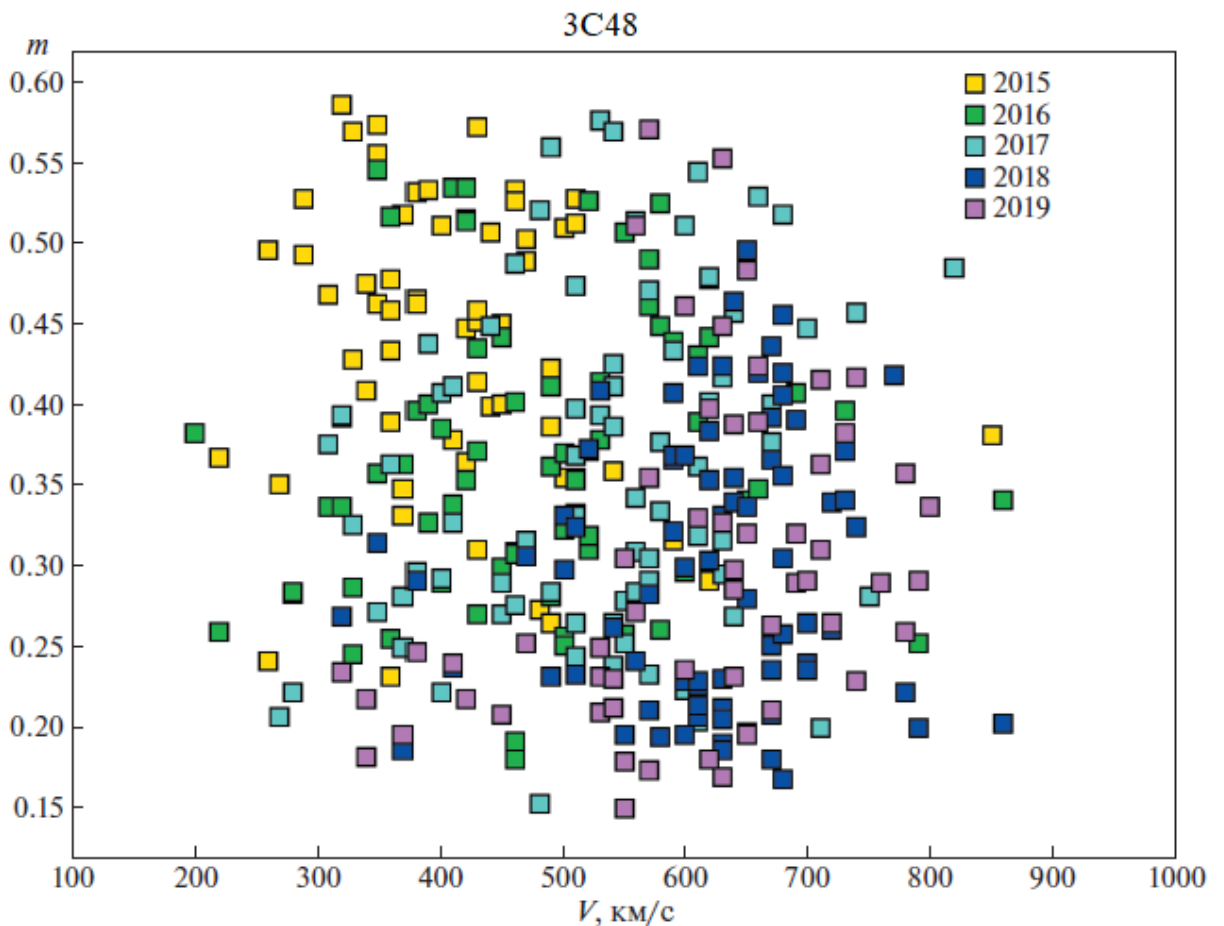


Рис. 13. Измеренные значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра по наблюдениям источника 3С48 за 2015 – 2019 гг. Результат диссертанта из работы [175].

Из рис. 13 видно, что четко выраженная зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра отсутствует. Это также видно из таблицы 2, в которой приведены результаты численного анализа: за каждый год количество наблюдений (n), среднегодовые значения скорости солнечного ветра и индекса мерцаний ($\langle v \rangle$ и $\langle m \rangle$), их среднеквадратичные отклонения (σ_v и σ_m), коэффициент корреляции по Пирсону ($r_{vm} = \frac{\langle vm \rangle - \langle v \rangle \langle m \rangle}{\sigma_v \sigma_m}$), доверительные интервалы для коэффициента корреляции при доверительной вероятности 0,95. Коэффициенты корреляции за каждый год наблюдений невысокие, что также говорит об отсутствии четкой зависимости индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Но при этом видно смещение облаков точек разных цветов соответствующих разным годам наблюдений. Коэффициент корреляции по всем данным на рис. 13 составил -0,15, что указывает на слабую, но убывающую зависимость.

Таблица 2. Результаты численного анализа зависимости индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Результат диссертанта из работы [175].

Год	n	$\langle v \rangle$, км/с	σ_v , км/с	$\langle m \rangle$	σ_m	r_{vm}	Довер. интервал для r_{vm}
2015	62	412	98	0,429	0,093	-0,156	от -0,391 до 0,098
2016	68	482	124	0,366	0,086	0,060	от -0,181 до 0,294
2017	77	530	114	0,362	0,102	0,260	от 0,038 до 0,457
2018	79	618	96	0,299	0,083	0,096	от -0,128 до 0,311
2019	57	604	118	0,300	0,100	0,353	от 0,102 до 0,562

На рис. 14 показаны данные из рис. 13, усредненные на годичных интервалах, в логарифмическом масштабе со вписанной в них методом наименьших квадратов прямой.

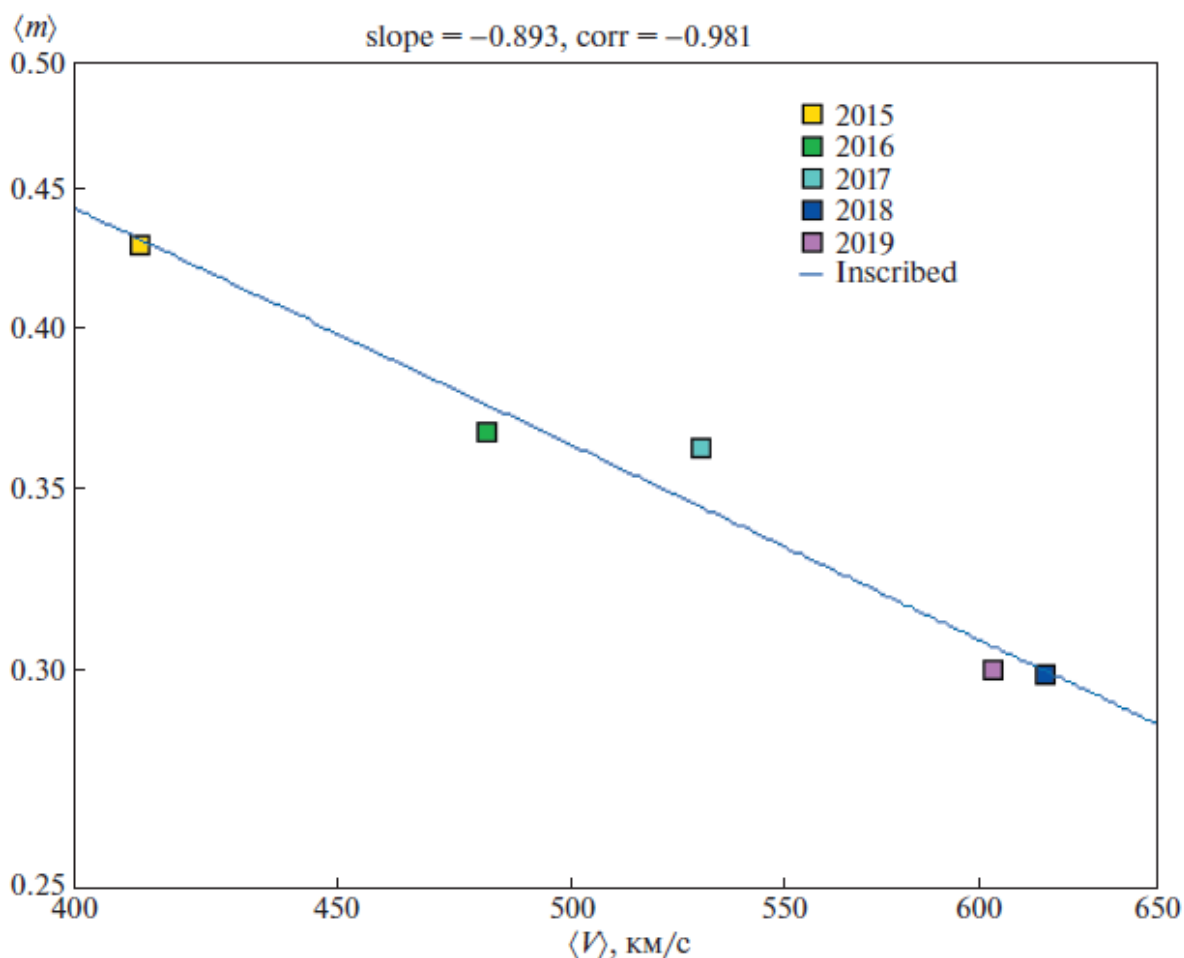


Рис. 14. Среднегодовые значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра в логарифмическом масштабе со вписанной прямой. Вверху приведены наклон вписанной прямой и коэффициент корреляции. Результат диссертанта из работы [175].

На рис. 14 видна четкая убывающая зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра, коэффициент корреляции $-0,981$, что очень близко к -1 при усреднении по годичным интервалам. Коэффициент наклона вписанной в логарифмическом масштабе прямой $-0,893$. Таким образом, на спаде солнечной активности среднегодовое значение скорости солнечного ветра возрастает, а индекс мерцаний убывает, что может быть объяснено разреженностью плазмы в высокоскоростных потоках солнечного ветра. Наблюдаемые данные указывают на примерно обратно пропорциональную зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Такая зависимость может рассматриваться как косвенное подтверждение пропорциональности флуктуаций электронной плотности, ответственных за мерцания, и средним значением электронной

плотности в предположении постоянства плотности потока частиц (и плотности потока массы) $\langle Nv \rangle \approx \text{const}$, что подтверждается данными измерений космического аппарата Ulysses [54].

Убывающая зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра также была установлена в работе [180] в результате трехпунктовых наблюдений большого количества радиоисточников в ISEE. В работе [181] показано, что зависимость, полученная в [180] согласуется с примерным постоянством плотности потока массы солнечного ветра. Зависимость между индексом межпланетных мерцаний и скоростью солнечного ветра является следствием пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению, и это может рассматриваться как основание для исследования глобальной структуры солнечного ветра. В работе [182] найдена высокая корреляция между индексом мерцаний и средней концентрацией плазмы по данным спутника ACE вблизи орбиты Земли. Этот результат был получен наблюдениями большого количества радиоисточников. Результаты, полученные в работах [180, 182], показывают, что наблюдения мерцаний большого количества радиоисточников в среднем описывают распределение концентрации межпланетной плазмы в пространстве. Наблюдения одиночных источников, как в рамках настоящей работы, также дают информацию, которая может быть использована при исследованиях циклической динамики структуры солнечного ветра, при усреднении на годовых интервалах. Также в недавней работе [183] рассмотрена антикорреляция концентрации частиц и скорости солнечного ветра на годовых интервалах вблизи Земли. Для исследований на интервалах порядка периода вращения Солнца целесообразно использовать наблюдения межпланетных мерцаний большого количества радиоисточников (когда их наблюдается тысячи за сутки) [184].

2.4. Выводы по главе 2

Получены оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний радиоисточников компактного 3С48 и протяженного 3С298 на радиотелескопе БСА ФИАН в период спада 24-го цикла солнечной активности с 2014 по 2019 гг. Проведен сравнительный анализ данных оценок скорости солнечного ветра с соответствующими оценками, полученными по трехпунктовым наблюдениям в ISEE Университета Нагойя в Японии. Полученные оценки скоростей солнечного ветра совпадают в пределах погрешностей измерений для компактного радиоисточника 3С48, но для протяженного источника 3С298 однопунктовые оценки по данным БСА превышают трехпунктовые оценки. Это может быть связано с недостаточной точностью модели межпланетной плазмы, которая, по-видимому, отличается от сферически-симметричной. Также возможно влияние анизотропии самого источника. Указанные факторы в значительной степени влияют на однопунктовые оценки скоростей солнечного ветра по наблюдениям протяженных радиоисточников. Таким образом, описанная методика однопунктовых оценок скорости солнечного ветра хорошо применима к наблюдениям компактных радиоисточников, а в случае протяженных источников необходимо уточнять указанные выше факторы. Среднегодовые оценки скорости солнечного ветра, полученные двумя методами, по наблюдениям обоих источников, показывают рост на спаде 24 цикла солнечной активности, что согласуется с динамикой структуры солнечного ветра на спаде цикла солнечной активности.

Исследована радиальная зависимость индекса мерцаний по данным источника 3С48 за 2015 – 2019 гг. Полученная за каждый год зависимость индекса мерцаний от гелиоцентрического расстояния не совпадает с теоретической зависимостью в предположении сферически-симметричной межпланетной среды, поэтому сделан вывод о наличии плотного приэкваториального токового слоя. Методом наименьших квадратов определялась его полутолщина. На спаде цикла

солнечной активности толщина слоя уменьшается, что может быть связано со структурой радиальной составляющей магнитного поля.

Также исследовалась зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра по тем же наблюдениям мерцаний источника ЗС48 за 2015 – 2019 гг. На годовых интервалах отсутствует четкая зависимость между этими величинами. За весь период наблюдений коэффициент корреляции составил $-0,15$, что указывает на слабую убывающую зависимость. При рассмотрении усредненных оценок индекса мерцаний и скорости солнечного ветра на годовых интервалах корреляция улучшается сразу до $-0,981$, что указывает на четкую убывающую зависимость. Установленная примерно обратная пропорциональность индекса мерцаний и скорости солнечного ветра косвенно указывает на пропорциональность флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению при условии постоянства плотности потока солнечного ветра $\langle Nv \rangle \approx \text{const}$. Аналогичный результат был получен ранее по наблюдениям большого количества радиоисточников. Данные по наблюдениям одиночного радиоисточника также могут быть использованы для исследования глобальной структуры солнечного ветра на интервалах порядка года. На меньших интервалах, порядка периода вращения Солнца, целесообразно использовать наблюдения большого количества радиоисточников.

Глава 3. Модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды

В главе 3 изложены совместные результаты диссертанта в работах [49, 185].

Описана упрощенная кинематическая модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве. Также описана методика оценки времени прихода распространяющегося после вспышки возмущения к Земле путем сравнения динамических карт индексов мерцаний по данным наблюдений с картами, построенными согласно модели. На примерах 11 событий магнитных бурь, произошедших после мощных и длительных вспышек в 2021 – 2022 гг., обоснована возможность использования данной модели совместно с данными о солнечных вспышках для краткосрочного предсказания времени прихода СМЕ к Земле за 15 – 20 ч. по усилению межпланетных мерцаний на расстояниях от 0,4 а.е. от Солнца. Также отдельно рассмотрен случай сильной магнитной бури 26 – 28 февраля 2023 г., произошедшей после серии мощных длительных вспышек.

3.1. Кинематическая модель распространения СМЕ и расчет индексов мерцаний на ее основе для построения модельных карт

В рамках настоящей работы СМЕ моделируется как область повышенной концентрации плазмы, распространяющаяся радиально от Солнца с постоянной скоростью, ограниченная двумя сферическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 с центром в центре Солнца и конической поверхностью с вершиной в центре Солнца (затемненная область на рис. 15).

Из предположения постоянства скорости распространения следует, что толщина выброса L остается постоянной на всем пути распространения СМЕ (так как с этой постоянной скоростью движутся внутренняя и внешняя сферические границы выброса).

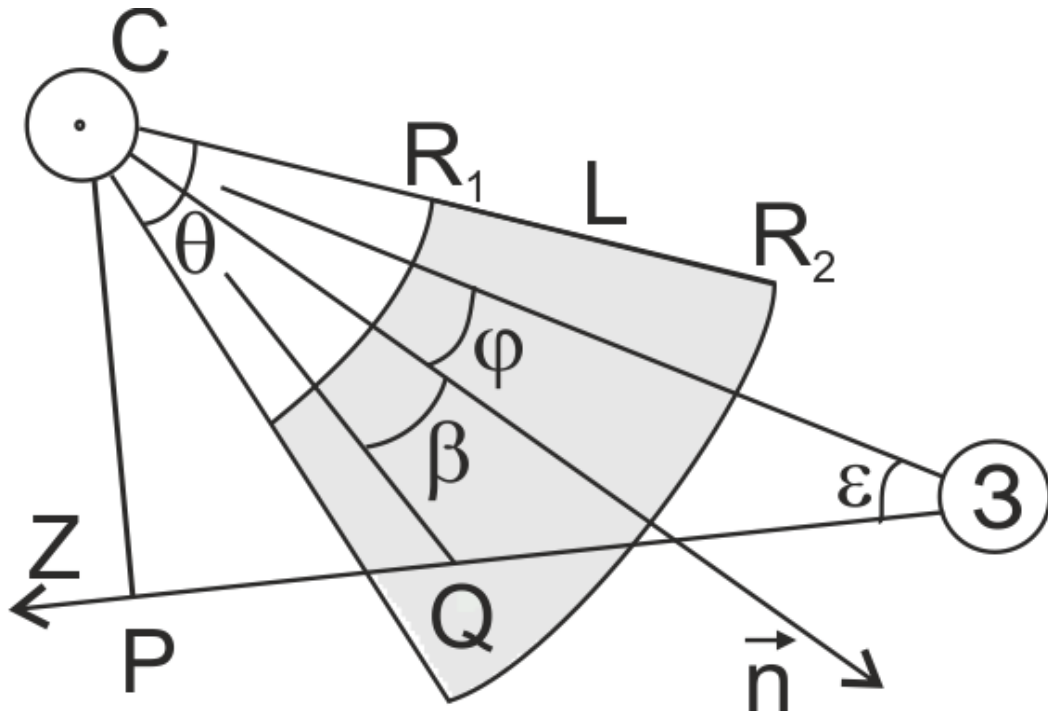


Рис. 15. Схема моделирования СМЕ (затемненная область). Результат диссертанта из работы [49].

Концентрация плазмы внутри выброса, как и вне его, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Параметрами используемой модели являются: толщина выброса L , угол раскрыва θ , направление распространения выброса \vec{n} (см. рис. 15), скорость распространения выброса v , коэффициент увеличения концентрации частиц внутри выброса N , начальное положение СМЕ, время начала распространения. Важным показателем является угол φ – угол между центральной осью выброса (вектором \vec{n}) и линией «центр Солнца – центр Земли». Чем этот угол меньше, тем более опасной может быть магнитная буря. Наиболее опасным случаем является центральное распространение СМЕ ($\varphi = 0$, СМЕ типа гало).

Индексы мерцаний для построения двумерных модельных карт вычислялись по формуле (2) с учетом предположений, перечисленных в разделе 1.1, наблюдаемые источники предполагались точечными ($F(q) \equiv 1$), а концентрация плазмы в каждой точке внутри выброса предполагалась выше концентрации плазмы в точках на том же расстоянии от Солнца, но вне выброса, в

фиксированное количество N раз. С учетом последнего предположения структурная константа модифицируется следующим образом:

$$C(r) = \begin{cases} \frac{C_0}{r^4} \text{ вне СМЕ,} \\ \frac{C_0}{r^4} N^2 \text{ внутри СМЕ,} \end{cases} \quad (8)$$

где r – расстояние от центра Солнца. Константа C_0 неизвестна *a priori* и введена, чтобы показать, что индекс мерцаний по формуле (2) определяется с точностью до константы. Для определения значения константы предполагалось, что в отсутствие возмущений индекс мерцаний принимает свое наибольшее наблюдаемое значение 0,6 на элонгации 25° .

Для оценки индекса мерцаний в данном направлении (α, δ) необходимо знать положение СМЕ в данный момент времени. Если известен момент вспышки, после которого сразу стал распространяться данный СМЕ, то через время Δt внешняя сферическая граница выброса будет на расстоянии $R_2 \approx v\Delta t$ от центра Солнца. Критерии попадания в область СМЕ точки Q на луче зрения, следующие: 1) очевидно, что расстояние точки Q от центра Солнца должно быть заключено в пределах от R_1 до R_2 ; 2) угол β между векторами \vec{CQ} и \vec{n} должен быть меньше, чем половина угла раскрыва $\frac{\theta}{2}$ (см. рис. 15). Иначе, данные критерии можно записать в виде формулы:

$$\begin{cases} R_1 \leq CQ \leq R_2, \\ \cos \beta = \frac{(\vec{CQ}, \vec{n})}{CQ} \geq \cos \frac{\theta}{2}. \end{cases} \quad (9)$$

Направление вектора \vec{n} определяется по координатам мест вспышек. Информация о времени вспышек (которое определялось как время пикового значения мощности вспышки), координатах активных областей, в которых они произошли, приведены по ссылке [186]. Солнечная широта отсчитывается от солнечного экватора, а солнечная долгота отсчитывается от меридиана, в плоскости которого расположена Земля (солнечная долгота Земли равна 0).

3.2. Сравнение модельных карт индексов мерцаний с картами по данным наблюдений. Оценка времени прихода СМЕ к Земле

В работах [48, 187] качественно была продемонстрирована возможность заблаговременного предсказания прихода СМЕ к Земле на примере события 3 ноября 2021 г.: усиления мерцаний на наблюдательной карте начались за 15 ч. до начала магнитной бури. Затем была разработана методика, по которой проводилась оценка времени прихода возмущения к Земле. Данная оценка осуществлялась следующим образом. По данным наблюдений строилась динамическая карта индексов мерцаний (цвет каждого пикселя динамических карт отображает отношение индекса мерцаний в данном направлении за рассматриваемый день к соответствующему значению за предыдущий день). При наблюдении усиления мерцаний на динамической карте по данным [186] подбирались солнечная вспышка ассоциированная с СМЕ в пределах от 1 до 3 суток до момента начала магнитной бури и скорость распространения возмущения после этой вспышки таким образом, чтобы наблюдательная и модельная карты визуально согласовывались наилучшим образом, при этом фиксировались значения коэффициента увеличения концентрации ($N = 3$), угла раскрытия конуса СМЕ ($\theta = 100^\circ$) и толщины СМЕ ($L = 0,1$ а.е.). Предполагалось, что СМЕ начинает распространяться сразу после ассоциированной солнечной вспышки (точнее, после пикового значения ее мощности). По подобранной вспышке и подобранной скорости распространения возмущения после этой вспышки оценивалось время прихода возмущения к Земле. Скорость распространения возмущения при этом предполагалась постоянной. В работе [48] оценивалось замедление распространения СМЕ из-за нагребания фоновой плазмы на примере события 3 ноября 2021 г. (этот эффект достаточно хорошо описывается эмпирической моделью drag force [188]). Средняя скорость СМЕ между Солнцем и зондируемой областью составила 1060 км/с, в то время как средняя скорость между Солнцем и Землей немного меньше – 990 км/с. В разработанной методике эффектом замедления из-за drag force пренебрегается.

За 2021 – 2022 гг. были найдены 11 событий, для которых удалось получить оценки времени прихода СМЕ к Земле вышеописанным способом, о них описано в работе [49]. Информация о K_p -индексах содержится по ссылке [189], если $K_p \geq 5$, то это магнитная буря. Сравнивались динамические карты индексов мерцаний наблюдательная и модельная для дней, предшествовавших магнитной буре (рис. 16 – 26). Индекс мерцаний для одиночного источника в наблюдениях определяется по формуле (1). В наблюдениях на БСА ФИАН наблюдаются несколько тысяч мерцающих радиоисточников в сутки. Вся наблюдаемая область неба разбивается на квадратные пиксели размером $3^\circ \times 3^\circ$, в каждую из которых попадает до 10 мерцающих радиоисточников. Считается среднее значение индекса мерцаний для каждого пикселя. Так как БСА ФИАН является радиотелескопом меридионального типа, то на горизонтальной оси отложено всемирное время (UT) с 20 ч. дня, предшествующего рассматриваемому, до 20 ч. рассматриваемого дня. По вертикальной оси отложено склонение от -8° до $+42^\circ$. Красный и оттенки красного цветов пикселей соответствуют усилению мерцаний по сравнению с предыдущим днем, оранжевый цвет означает, что мерцания остались примерно на том же уровне, желтый цвет соответствует ослаблению мерцаний. Дуги на приведенных ниже картах мерцаний показывают гелиоцентрическое расстояние прицельной точки (ближайшей к Солнцу точке на луче зрения): зеленая дуга – 0,4 а.е., синяя – 0,6 а.е., бордовая – 0,8 а.е., черная – 1 а.е. Самая внутренняя дуга соответствует границе зоны сильных и слабых мерцаний. В настоящей работе рассматривалась только зона слабых мерцаний. При построении модельных карт считалось, что значение индекса мерцаний не превышает значения максимального наблюдаемого значения 0,6 (если полученное по формуле (2) значение получалось больше, то оно заменялось на 0,6).

На рис. 16 – 26 приведены карты для периодов, соответствующих магнитным бурям, вызванным СМЕ, для всех рассмотренных событий верхняя панель – наблюдательная карта, нижняя – модельная. На наблюдательных картах в верхней части показана дата наблюдений. В верхней части модельных карт слева-направо дана следующая информация: дата, для которой была построена

данная модельная карта; коэффициент увеличения электронной плотности плазмы внутри СМЕ ($N = 3$); угол раскрыва ($\theta = 100^\circ$); подобранная скорость солнечного ветра; гелиографические координаты места вспышки; время UT подобранной вспышки ($t0.0$); время, когда СМЕ достигает границы зон сильных и слабых мерцаний ($t0.4$); время, когда СМЕ достигает орбиты Земли ($t1.0$); угол ϕ – угол между осью выброса и направлением от Солнца к Земле (см рис. 15). Следует отметить, что на модельных картах области, не затронутые СМЕ, выглядят идеально оранжевыми, в то время как на наблюдательных картах имеется пятнистость из-за локальных областей усиления и ослабления мерцаний. В модели рассматривалась идеальная среда, в которой распространяется только одиночный выброс, поэтому в областях, не затронутых возмущением, индекс мерцаний не меняется. В реальности даже в случае отсутствия возмущений типа СМЕ или CIR («спокойное» Солнце) постоянно меняются скорость солнечного ветра и концентрация межпланетной плазмы, а вместе с ними и индекс мерцаний, иными словами, имеется случайная компонента [190]. Этим и объясняется пятнистость наблюдательных карт.

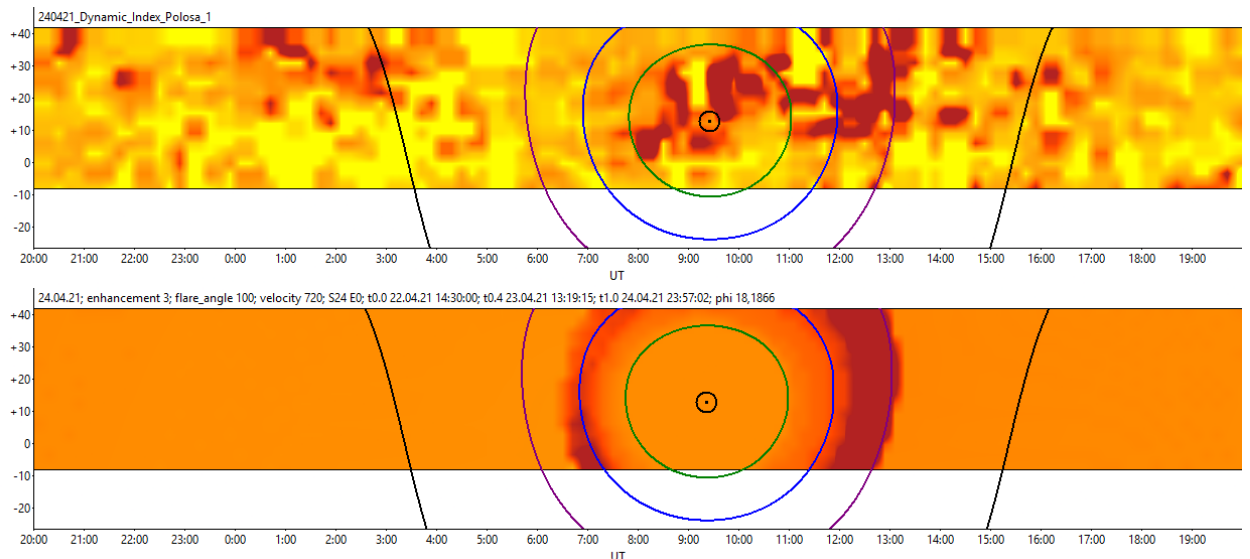


Рис. 16. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 24 апреля 2021 г. Магнитная буря произошла 25 апреля 2021 г. Результат диссертанта из работы [49].

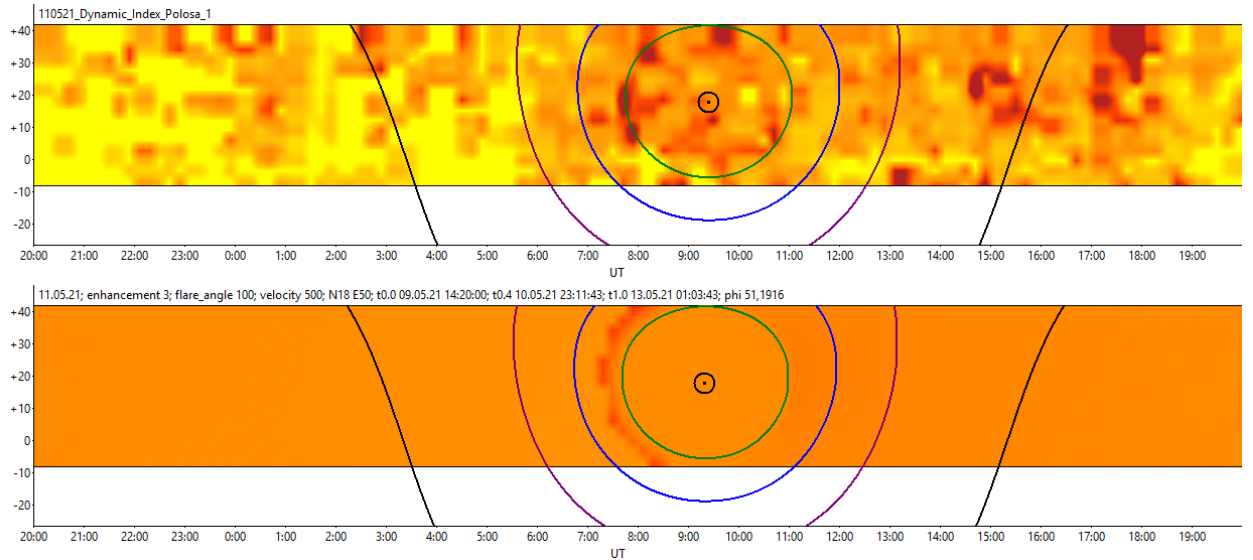


Рис. 17. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 11 мая 2021 г. Магнитная буря произошла 12 мая 2021 г. Результат диссертанта из работы [49].

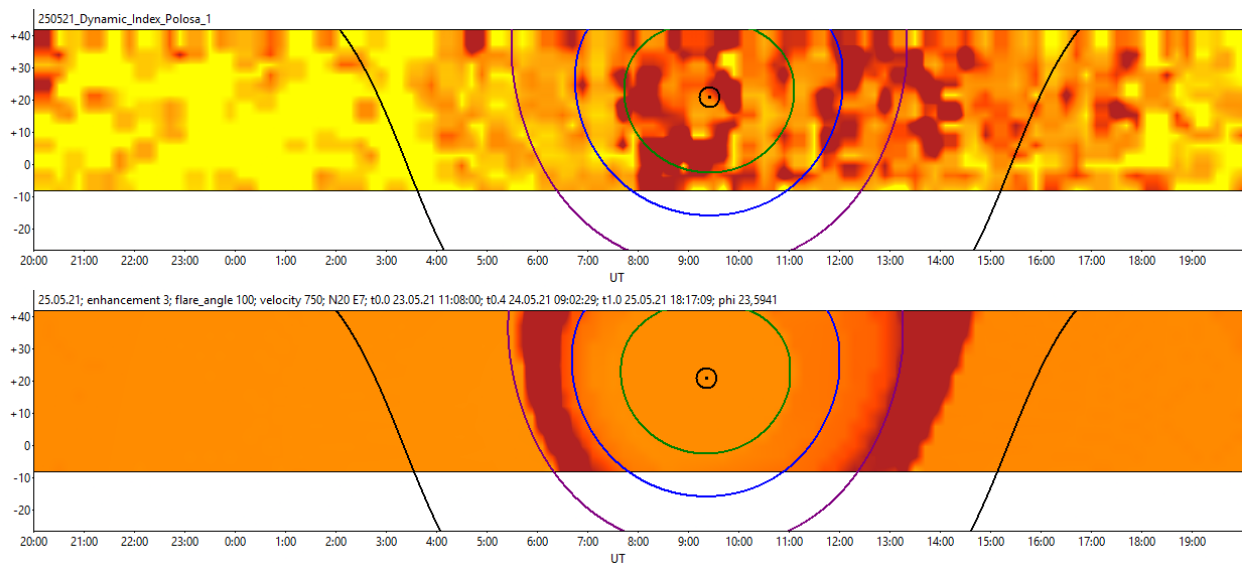


Рис. 18. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 25 мая 2021 г. Магнитная буря произошла 26 мая 2021 г. Результат диссертанта из работы [49].

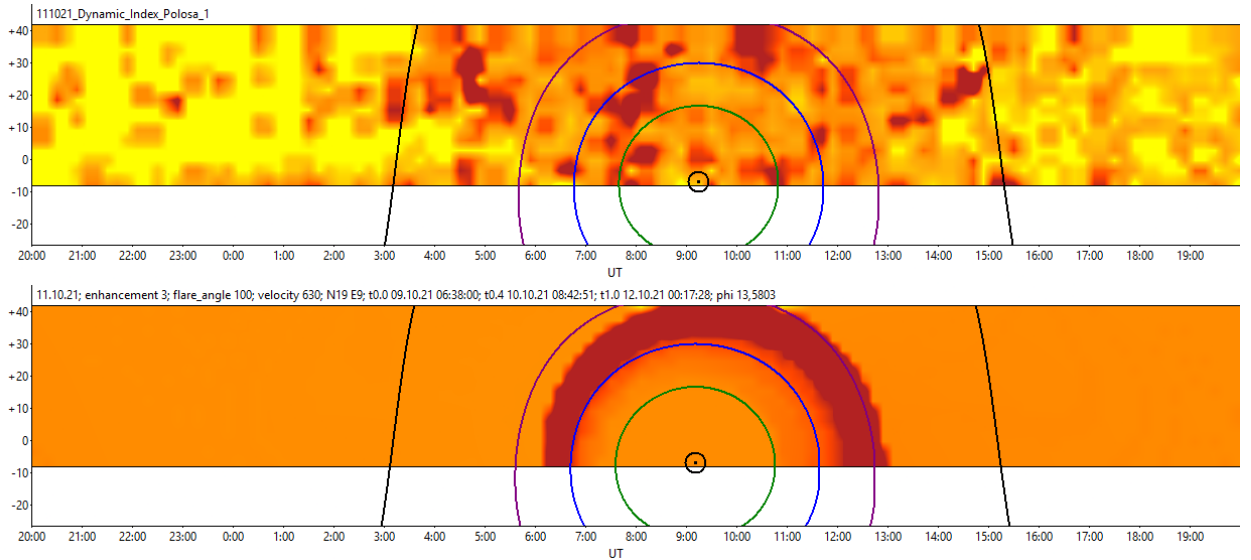


Рис. 19. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 11 октября 2021 г. Магнитная буря произошла 12 октября 2021 г. Результат диссертанта из работы [49].

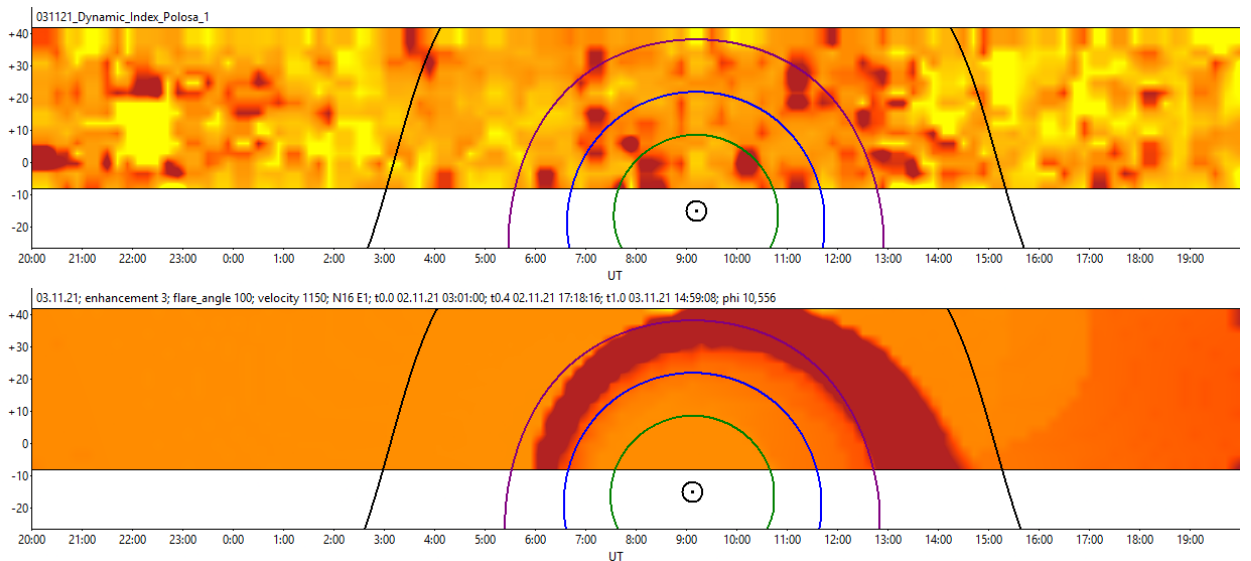


Рис. 20. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 3 ноября 2021 г. Магнитная буря произошла 4 ноября 2021 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49].

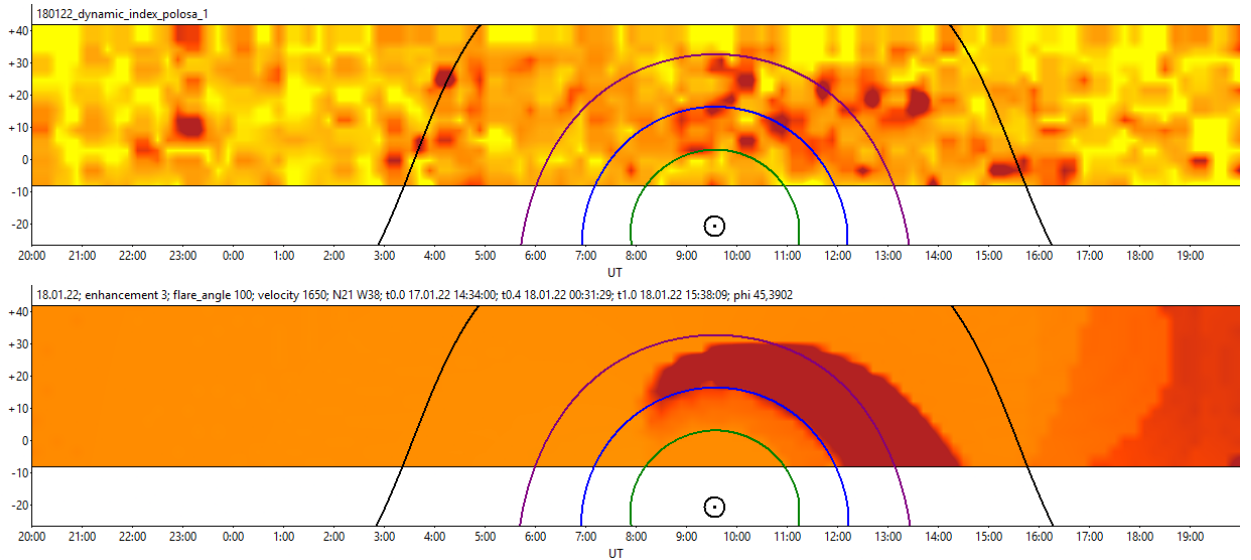


Рис. 21. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 18 января 2022 г. Магнитная буря произошла 19 января 2022 г. Результат диссертанта из работы [49].

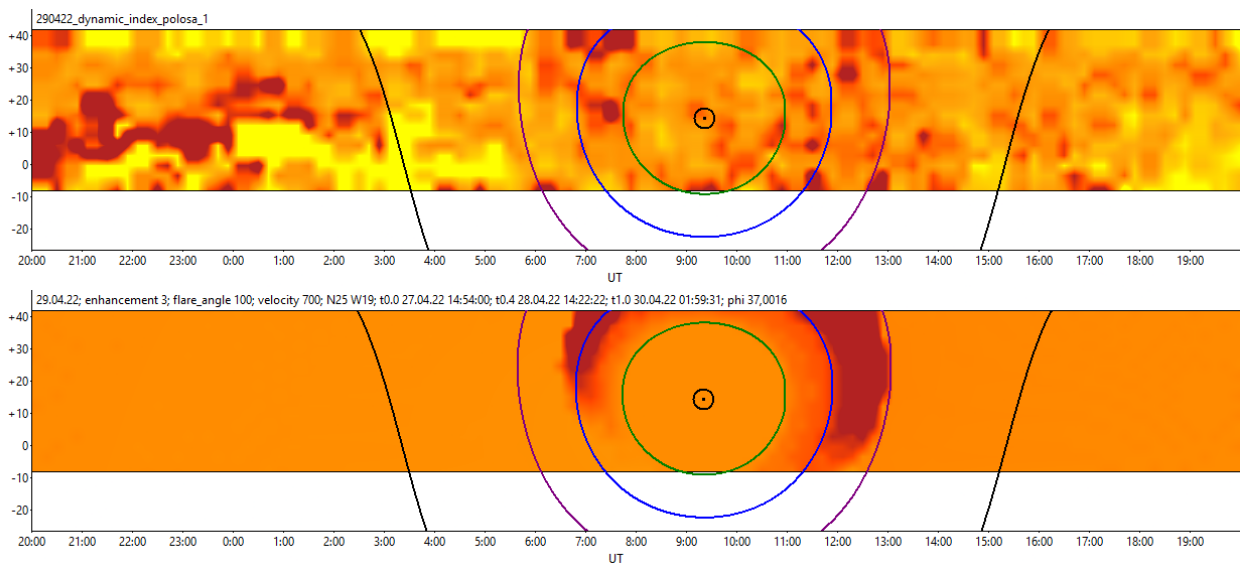


Рис. 22. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 29 апреля 2022 г. Магнитная буря произошла 30 апреля 2022 г. Результат диссертанта из работы [49].

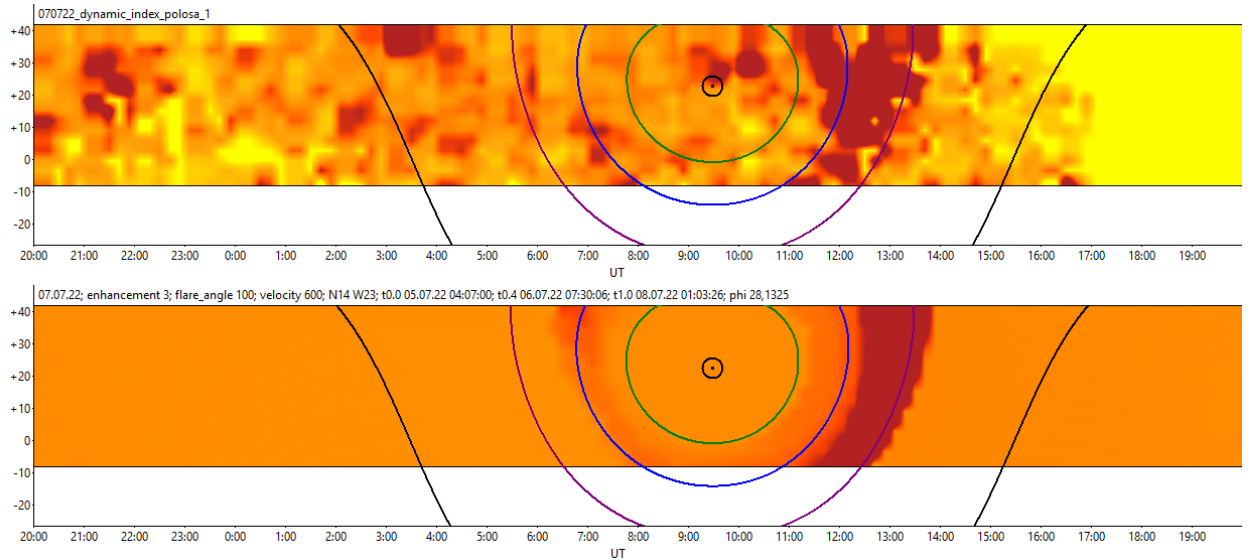


Рис. 23. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 7 июля 2022 г. Магнитная буря произошла 8 июля 2022 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49].

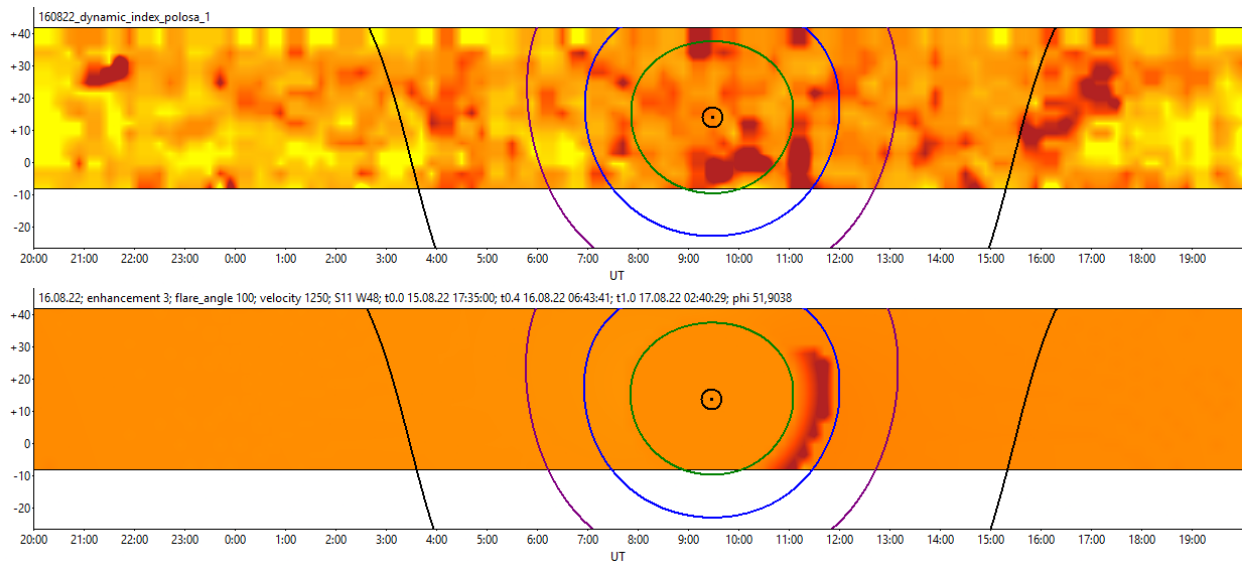


Рис. 24. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 16 августа 2022 г. Магнитная буря произошла 17 августа 2022 г. Результат диссертанта из работы [49].

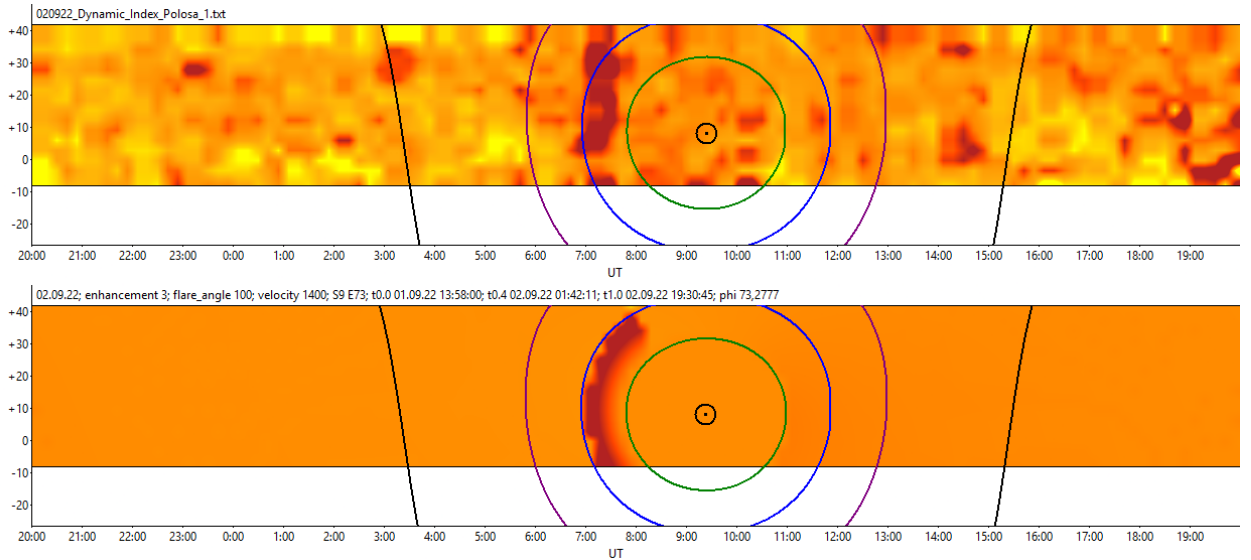


Рис. 25. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 2 сентября 2022 г. Магнитная буря произошла 3 сентября 2022 г. Результат диссертанта из работы [49].

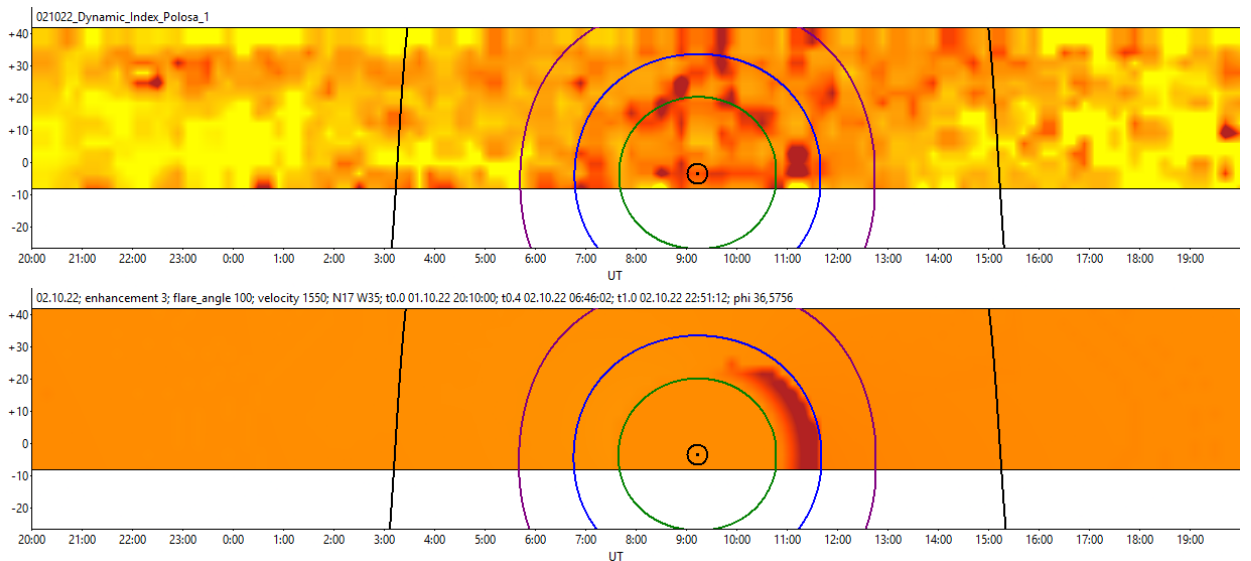


Рис. 26. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 2 октября 2022 г. Магнитная буря произошла 3 октября 2022 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49].

В таблице 3 представлены результаты моделирования и сравнения предсказанного и реального времени начала магнитной бури по данным рис. 16 – 26.

Таблица 3. Информация о рентгеновских вспышках на Солнце, ассоциированных с ними магнитных бурях на Земле и результатах модельных расчетов времени прихода выбросов к Земле. Результат диссертанта из работы [49].

№	Вспышка			v, км/с	φ, град.	Буря				
	Класс вспышки	Место вспышки	Время вспышки, UT			Оценочное время прихода, UT	Интервал времени прихода, UT	Время между началом обнаружения усиления мерцаний и началом бури, ч.	Разница реального и предсказанного времени, ч.	G-индекс
1	C2.5	S24 E00	22.04.2021 14:30	720	18,2	24.04.2021 23:57	25.04.2021 00:00-03:00	13,5	0,05	G1
2*	C4.0	N18 E50	09.05.2021 14:20	500	51,2	13.05.2021 01:04	12.05.2021 12:00-15:00	28,25	-13,07	G3
3*	M1.1	N20 E07	23.05.2021 11:08	750	23,6	25.05.2021 18:17	26.05.2021 18:00-21:00	35,5	23,72	G1
4	M1.6	N19 E09	09.10.2021 06:38	630	13,6	12.10.2021 00:17	12.10.2021 00:00-03:00	18	-0,28	G2
5	M1.7	N16 E01	02.11.2021 03:01	1100	10,6	03.11.2021 14:59	03.11.2021 21:00-24:00	13,5	6,02	G3
6*	C2.8	N21 W38	17.01.2022 14:34	1600	45,4	18.01.2022 15:38	19.01.2022 00:00-03:00	14,25	8,37	G2
7	C7.6	N25 W19	27.04.2022 14:54	700	37,0	30.04.2022 02:00	30.04.2022 03:00-06:00	20,5	1	G1
8	C9.8	N14 W23	05.07.2022 04:07	600	28,1	08.07.2022 01:03	07.07.2022 21:00-24:00	14	-4,05	G1
9*	C9.0	S11 W48	15.08.2022 17:35	1250	51,9	17.08.2022 02:40	17.08.2022 18:00-21:00	34	15,33	G2
10	C4.1	S09 E73	01.09.2022 13:58	1400	73,2	02.09.2022 19:31	03.09.2022 00:00-03:00	17	4,48	G1
11	M5.8	N17 W35	01.10.2022 20:10	1550	36,6	02.10.2022 22:51	02.10.2022 21:00-24:00	13	-1,85	G1

*помечены случаи, когда роль указанных вспышек в магнитных бурях неочевидна.

Данные колонок по времени начала усиления мерцаний до начала магнитной бури однозначно указывают на то, что в данных наблюдений межпланетных мерцаний во всех 11 случаях выброс был обнаружен раньше, чем он пришел на Землю. Это обосновывает возможность краткосрочного прогноза прихода возмущений к Земле путем анализа двумерных динамических карт индексов мерцаний. Однако, как следует из данных в колонке с разницей реального и предсказанного времени начала магнитной бури (положительное значение в данной колонке означает, что буря реально началась после

предсказанного времени, отрицательное – до), прогноз космической погоды рассматриваемым методом не всегда возможен и точен по нескольким причинам:

1) Неизвестна точная модель среды. В рамках модели межпланетная среда предполагалась сферически симметричной, тогда как реальная межпланетная среда в некоторой степени отличается от сферически-симметричного случая. В частности, в разделе 2.2 было показано, что асимметричность межпланетной среды может быть объяснена наличием приэкваториального плотного токового слоя.

2) Неизвестна также точная модель СМЕ, его форма, распределение электронной плотности внутри него. Возможно, электронная плотность убывает при отклонении от центральной оси выброса, плавно переходя к значениям за пределом выброса при приближении к его коническим краям. Неизвестны реальные размеры выброса (угол раскрытия, толщина) и как они меняются с удалением от Солнца.

3) Описанная модель рассматривает распространение одиночного выброса, пренебрегая остальными возмущениями в межпланетной среде. После серии вспышек возможно наложение нескольких СМЕ, при этом неизвестно распределение электронной плотности в каждом из них, в наблюдаемые мерцания каждый выброс может вносить значительный вклад. В этом случае становится сложным выделение конкретного СМЕ, который в итоге приведет к магнитной буре, и оценка времени его прихода к Земле становится неточной. Также возможно взаимодействие СМЕ с CIR. 4 таких случая в таблице 3 отмечены знаком *.

4) Если СМЕ распространяется так быстро, что достигает Земли менее или чуть более, чем за 24 ч., то из-за ограниченности возможностей радиотелескопа БСА ФИАН данный выброс может быть не обнаружен и усиление мерцаний не зафиксируется. Так как в каждый момент времени БСА ФИАН «смотрит» только в определенные участки неба, все наблюдаемые участки неба пробегает за 24 ч., то, когда радиотелескоп «смотрит» прямо на выброс, то выброс может еще не достичь зоны слабых мерцаний (0,4 а.е. от Солнца и дальше), а

когда достигнет, радиотелескоп будет «смотреть» уже в другую сторону. Таким образом, иногда возможны магнитные бури без наблюдаемых прежде усиления межпланетных мерцаний на картах.

5) Возможны помехи самой антенны, которые вызывают усиление мерцаний. В этом случае возможен ошибочный прогноз космической погоды.

Пункты 3 – 5, также частично пункт 2 могут быть решены путем использования другого вида радиотелескопов для наблюдения мерцаний. Так, антенные решетки такие как LOFAR/MWA имеют поле зрения несколько сотен квадратных градусов, их диаграммы направленности управляются как по склонению, так и по прямому восхождению. Таким образом, на таких решетках могут строиться квазиодновременные карты индексов мерцаний по всему небу за примерно полчаса-час с учетом их реальной чувствительности. По ежечасным картам (а не ежесуточным, как в случае с БСА ФИАН) можно будет увидеть в деталях распространение выброса во времени, его форму, размеры. По ежечасным картам можно будет заметить самые быстрые выбросы со скоростью 2000 км/с, время распространения которых от 0,4 а.е. до 1 а.е. составляет 12,5 ч. За это время может быть построено несколько карт, позволяющих отследить и точно рассчитать скорость выбросов, даже если вспышка в рентгене не фиксируется (так называемый «СМЕ-невидимка»). Также с помощью ежечасных карт можно отследить и слияние выбросов разной природы. Пункт 1 же не решается напрямую в наблюдениях, но и не влияет значительно на возможность предсказания, поскольку даже в случае анизотропной среды изменения индекса мерцаний будут наблюдаться, следовательно, возрастут и возможности для краткосрочного прогноза космической погоды, повысится точность прогноза.

Средняя погрешность предсказания прихода возмущения к Земле по данным таблицы 3 составила 3,6 ч., что может быть обусловлено не учитываемым замедлением распространения выброса. Среднее время от начала усиления мерцаний на картах до начала магнитной бури составило 20,1 ч. Однако в таблице 3 знаком * отмечены отдельные случаи (2, 3, 6, 9), когда роль подобранных вспышек неочевидна. В этих случаях погрешность прогноза прихода возмущения

к Земле оказалась слишком большой. Приход СМЕ к Земле не обязательно сопровождается магнитной бурей. В указанных 4 случаях наблюдаемые выбросы могли иметь место, вызвать усиление мерцаний на динамических картах, однако к магнитной буре не привести, а магнитные бури могли произойти по другим причинам, например, при распространении коротирующей структуры. Коротирующие структуры вращаются вместе с Солнцем и приходят на Землю примерно раз в 27 суток. Для каждого из 4 случаев есть ассоциированные магнитные бури, отстоящие от указанных случаев на временные промежутки кратные 27 суткам, эти случаи приведены в работе [49]. Также возможно наложение разных СМЕ. Без учета этих 4 случаев магнитная буря начиналась в среднем через 0,8 ч. после предсказанного времени и через 15,6 ч. после начала наблюдения усиления мерцаний. Таким образом, в случае распространения одиночного выброса в межпланетной плазме описанная модель дает достаточно точный прогноз прихода этого выброса к Земле.

3.3. Корональные выбросы массы и магнитная буря 26 – 28 февраля 2023 г.

В работе [185] отдельно рассмотрен случай сильной (G3) и длительной магнитной бури 26 – 28 февраля 2023 г. с применением описанной выше упрощенной модели для СМЕ. Указанная магнитная буря началась 26 февраля 2023 г. в 18:00 UT, продолжалась весь день 27 февраля, а закончилась 28 февраля в 3:00 UT, таким образом, магнитная буря продолжалась в течение 33 ч. Перед бурей произошла серия вспышек: 24 февраля произошла вспышка M1.1 длительностью около 10 минут в активной области 3235 и M3.7 длительностью около 1,5 ч. в активной области 3229. Рассматривались модельные карты для СМЕ после каждой из этих вспышек, скорость в каждом из случаев подбиралась таким образом, чтобы визуально модельные карты соответствовали карте по данным наблюдений. На рис. 27 показаны наблюдательная и модельные карты для каждой из двух вспышек за 26 февраля 2023 г.

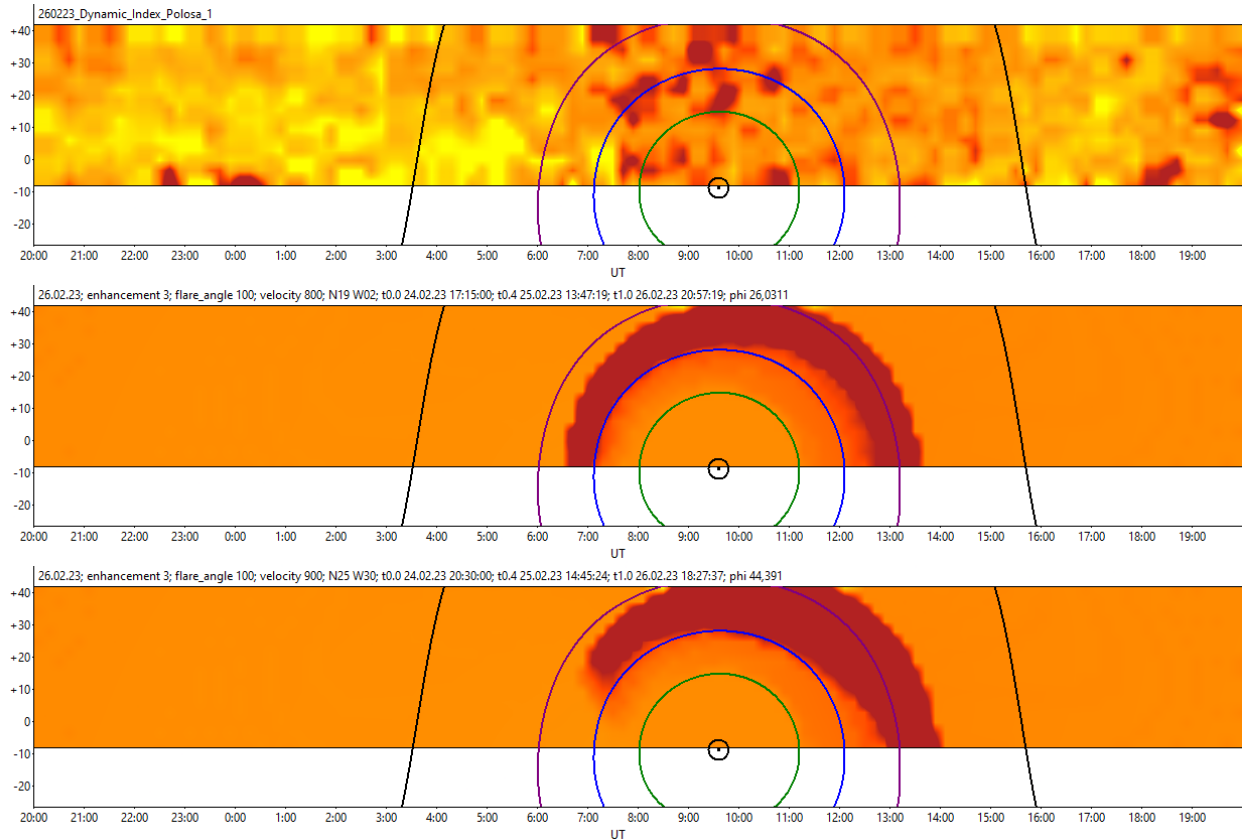


Рис. 27. Динамические карты индексов мерцаний за 26 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M3.7. Результат диссертанта из работы [185].

Из рис. 27 видно, что обе модельные карты для 26 февраля так или иначе подходят под наблюдательную. В случае вспышки M3.7 усиление мерцаний на модельной карте начинается около 7:00 UT, как и на наблюдательной карте, модельная карта соответствует наблюдательной лучше, чем для СМЕ после вспышки M1.1. Это говорит о том, что, по-видимому, выброс именно после вспышки M3.7 был ответственным за магнитную бурю. Согласно каталогу Sactus [191] вспышка M1.1 не сопровождалась СМЕ, что подтверждает предположение о причастности выброса после M3.7 к данной магнитной буре. Погрешность предсказания времени прихода возмущения к Земле в случае вспышки M3.7 составила всего 27 мин. При прогнозе космической погоды наблюдаемое усиление мерцаний стоит связывать с более мощными и длительными вспышками.

Рассмотрены также карты после начала магнитной бури. На рис. 28 приведены соответствующие карты за 27 февраля.

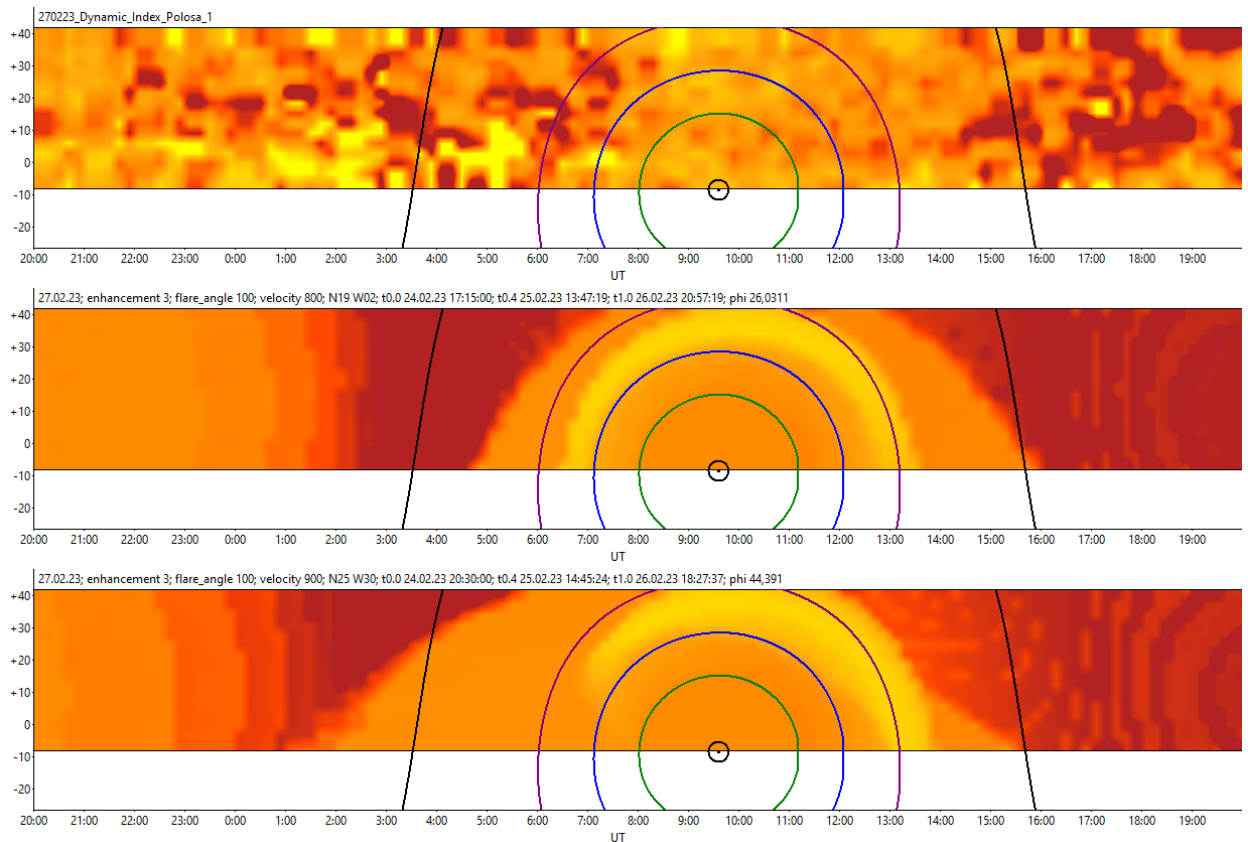


Рис. 28. Динамические карты индексов мерцаний за 27 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M3.7. Результат диссертанта из работы [185].

Усиление мерцаний наблюдается на больших гелиоцентрических расстояниях по сравнению с предыдущим днем. При этом на модельных картах на гелиоцентрических расстояниях примерно до 0,8 а.е. наблюдается ослабление мерцаний, чего не наблюдается на карте по данным наблюдений. Следует отметить, что спустя сутки после рассмотренных вспышек, то есть 25 февраля, произошли еще 2 M-вспышки: M1.0 длительностью 12 мин. в активной области 3236 и M6.3 длительностью чуть более 1,5 ч. в активной области 3229. Заметим, что последняя вспышка произошла в той же активной области, что и вспышка M3.7 накануне, после которой и произошел тот выброс, который привел к

магнитной буре. Отсутствие ослабления мерцаний на карте по наблюдениям для 27 февраля в отличие от модельных карт может быть объяснено тем, что, по-видимому, после вспышки M6.3 из той же активной области произошел еще один выброс, который поддержал магнитную бурю, начавшуюся из-за выброса после вспышки M3.7. Модельные же карты рассматривают распространение одиночного выброса, поэтому на них наблюдается ослабление на расстояниях до 0,8 а.е. от Солнца ввиду ухода выброса из этих областей и возвращения уровня индекса мерцаний к прежним значениям.

На наблюдательной карте для 28 февраля на рис. 29 наблюдается ослабление мерцаний после 6:00 UT и возвращения мерцаний к нормальному режиму.

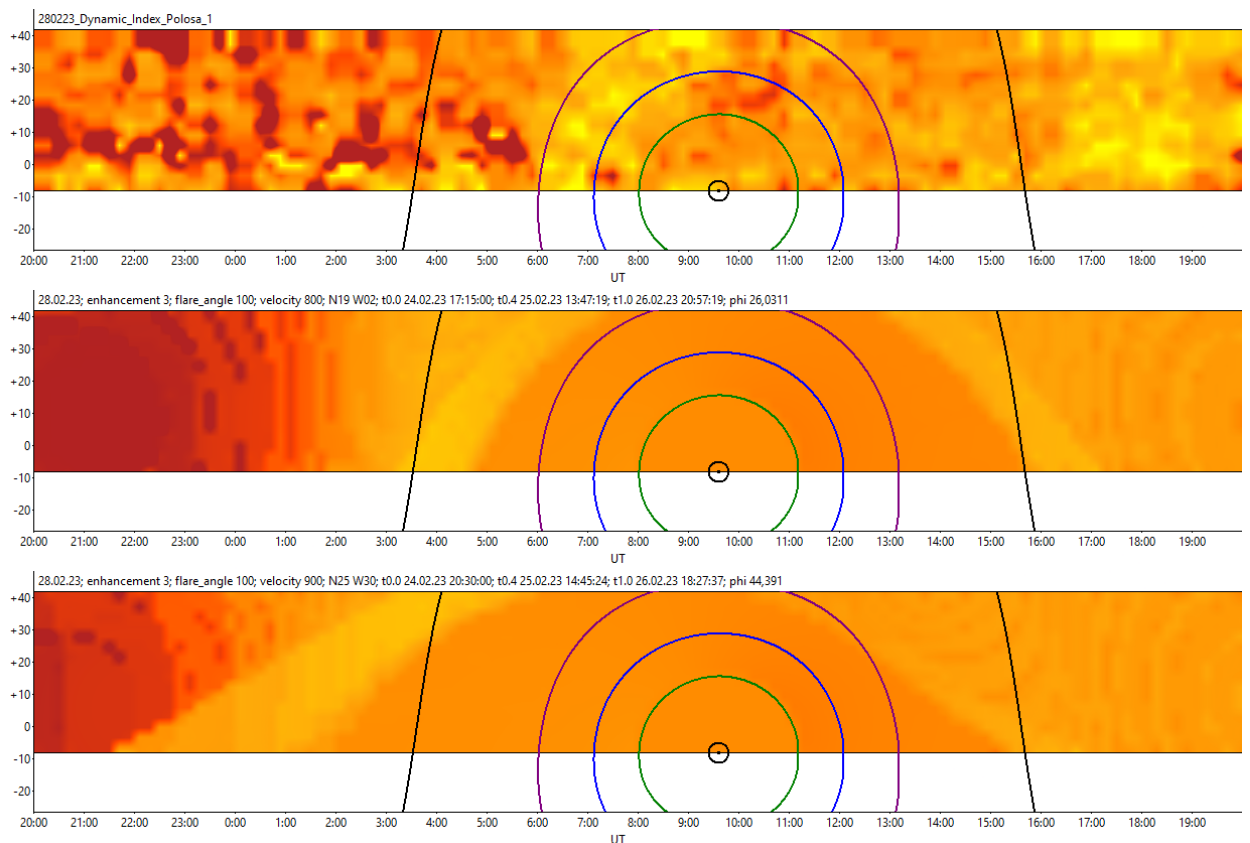


Рис. 29. Динамические карты индексов мерцаний за 28 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки M3.7. Результат диссертанта из работы [185].

3.4. Выводы по главе 3

Разработана простая модель распространения одиночных СМЕ в межпланетном пространстве и методика оценки времени их прихода к Земле с использованием данной модели и информации о вспышечной активности короны Солнца путем визуального сравнения динамических карт индексов мерцаний по данным наблюдений и модельных. Всего рассмотрено 11 событий с апреля 2021 г. по октябрь 2022 г., для которых магнитные бури происходили после рентгеновских вспышек в солнечной короне. Для рассмотренных 11 событий среднее время реального начала магнитной бури после предсказанного составило 3,6 ч., а среднее время начала магнитной бури после начала усиления мерцаний на наблюдательных картах – 20,1 ч. Из 11 событий 7 связаны с уединенными вспышками с последующими СМЕ, а оставшиеся 4 имеют более сложный характер и, возможно, связаны с наложением нескольких СМЕ, либо с наложением СМЕ и CIR, либо только с CIR. Без учета данных сложных событий магнитная буря в среднем началась через 0,8 ч. после предсказанного времени начала бури и через 15,6 ч. после начала усиления мерцаний. Таким образом, точность краткосрочного прогноза оказывается выше в случае распространения уединенных СМЕ. Запаздывание прихода возмущения к Земле, по-видимому, вызвано явлением нагребания фоновой плазмы, известным как drag force [188], им пренебрегалось в рамках рассматриваемой модели.

Еще рассмотрен случай магнитной бури в конце февраля 2023 г., которая длилась с 26 февраля 18:00 UT до 28 февраля 3:00 UT. Перед ней наблюдались 2 М-вспышки 24 февраля и 2 М-вспышки 25 февраля. Установлено, что выброс, который произошел после вспышки M3.7, более сильной и более длительной по сравнению с другой вспышкой M1.1 в тот же день, привел к рассматриваемой магнитной буре. А выброс после вспышки M6.3, произошедшей через сутки после M3.7 в той же активной области, продолжил указанную магнитную бурю. Погрешность в случае рассмотрения выброса после M3.7 составила менее 0,5 ч., таким образом, в данном случае прогноз выполнен с достаточно высокой

точностью. Усиление мерцаний при этом началось за 11 ч. до начала магнитной бури. При наблюдении серии вспышек наблюдаемое усиление мерцаний следует привязывать к более сильным и длительным вспышкам.

Стоит отметить, что описанный в настоящей главе подход не всегда дает точный прогноз космической погоды. Это может быть связано с недостаточной точностью модели среды, модели СМЕ, наличием нескольких возмущений при том, что данная модель рассматривает только одиночный выброс, ограниченности радиотелескопа БСА ФИАН, так как он может наблюдать одни и те же участки неба только раз в сутки, помехи в самом радиотелескопе. Большая часть указанных проблем может быть решена аналогичными наблюдениями межпланетных мерцаний на разных географических долготах, а также использованием антенных решеток типа LOFAR/MWA, управляемых по склонению и прямому восхождению, позволяющих получать часовые карты индексов мерцаний. Также более точный прогноз может быть достигнут путем варьирования не только скорости СМЕ, но и других параметров модели. Тем не менее, описанная «унифицированная» упрощенная модель распространения СМЕ в большинстве случаев позволяет определить время прихода возмущения к Земле с достаточно высокой точностью с опережением в 15 – 20 ч.

Глава 4. Модель распространения CIR/SIR в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды

В главе 4 изложены совместные результаты диссертанта в работе [50].

Описана простая модель ведущей части области взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра, в которой зона с повышенной электронной концентрацией плазмы задается в виде спиральной струи с прямоугольным сечением. Рассчитаны динамические карты индексов мерцаний аналогичные тем в главе 3 с применением данной модели. Для нескольких событий в 2022 – 2023 гг., вызванных CIR/SIR, проведено сравнение модельных карт с картами индексов мерцаний по данным наблюдений. Также обсуждается качественное различие между данными наблюдений CIR и CME. Качественно обоснована возможность краткосрочного прогноза космической погоды путем сравнения динамических карт индексов мерцаний вместе с наблюдением ослабления ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода CIR к Земле, а также учета 27-суточной периодичности их прихода.

4.1. Кинематическая модель распространения CIR/SIR и расчет индексов мерцаний на ее основе для построения модельных карт

В рамках настоящей работы CIR/SIR моделировались как область повышенной концентрации плазмы, вращающейся вместе с Солнцем с постоянной угловой скоростью в направлении совпадающим с направлением обращения Земли и «настигающей» Землю каждые 27 суток, с центральной осью в виде архимедовой спирали $r = a(\theta_0 - \theta)$ в плоскости солнечного экватора (рис. 30), где θ_0 – угол отсчитываемый от оси X к касательной к оси CIR в точке $r = 0$ против часовой стрелки, этот угол меняется по мере вращения структуры вместе с Солнцем, a – некоторая константа. Предполагалось, что на расстоянии $r = 1$ а.е. от Солнца $\theta_0 - \theta = \frac{\pi}{4}$, таким образом $a = \frac{4}{\pi}$ а.е. О похожей модели CIR

упоминается и в обзоре [159]. На рис. 30 ось X направлена к положению Земли в момент летнего солнцесостояния, ось Y – к проекции Земли на плоскость солнечного экватора в момент осеннего равноденствия, ось Z – к солнечному северному полюсу (на рисунке ось Z направлена «на нас»), начало координат в центре Солнца.

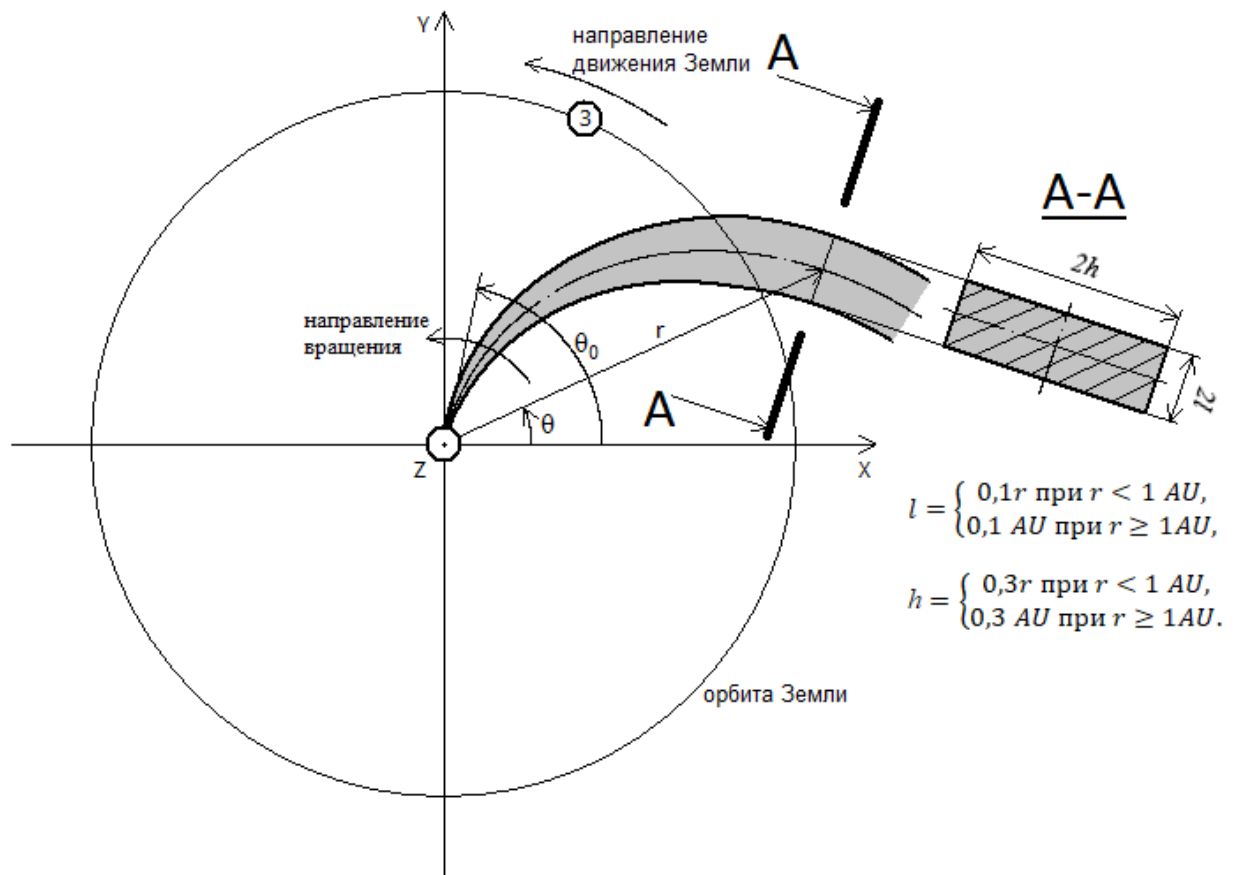


Рис. 30. Схематическое изображение модели ведущей части CIR/SIR (затемненная область). Результат диссертанта из работы [50].

При построении модельных карт учитывался наклон орбиты Земли к плоскости солнечного экватора, который составляет $7,25^\circ$, также предполагалось, что Земля пересекает солнечный экватор в дни солнцесостояний, в момент осеннего равноденствия гелиоширота Земли $+7,25^\circ$, в момент весеннего равноденствия $-7,25^\circ$. Сечение области CIR плоскостью нормальной к оси CIR в каждой точке предполагалось в рамках данной модели прямоугольником, размеры которого пропорциональны гелиоцентрическому расстоянию точки пересечения

плоскости сечения и оси CIR, если это расстояние меньше 1 а.е.; а в случае если это расстояние равно либо превышает 1 а.е., то стороны равны $2l = 0,2$ а.е. – сторона прямоугольника параллельная солнечному экватору, $2h = 0,6$ а.е. – сторона перпендикулярная плоскости экватора. На рис. 30 схематически показана геометрия используемой модели, область ведущей части CIR с повышенной концентрацией плазмы показана серым цветом. Также рассматривалась и другая модель с круглым сечением, однако, как показал анализ, струя с прямоугольным сечением лучше согласуется с наблюдательными данными.

Двумерные карты по модели CIR строились аналогично картам по модели СМЕ. Методика построения модельных карт описана в главе 3. При вычислении теоретического индекса мерцаний также использовалась формула (2), электронная плотность в ведущей части области CIR также предполагалась в $N = 3$ раза выше, чем в точках на том же расстоянии от центра Солнца, но вне CIR. Модель межпланетной плазмы также предполагалась симметричной, электронная плотность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Солнца. Структурная константа, входящая в формулу (2), вычислялась аналогично случаю СМЕ по формуле (8), только соответствующие выражения для случаев «вне CIR» и «внутри CIR». Для попадания конкретной точки с координатами (X, Y, Z) в область CIR должны выполняться следующие условия. Во-первых, расстояние от проекции этой точки на плоскость солнечного экватора до оси CIR (или расстояние от проекции до ближайшей точки на оси CIR), не должно превышать заданной величины l (см. рис. 30). Во-вторых, расстояние от точки до плоскости солнечного экватора $|Z|$ не должно превышать величины h . Таким образом, условия попадания точки с координатами (X, Y, Z) в область CIR следующие:

$$\begin{cases} (\cos \theta_n + (\theta_0 - \theta_n) \sin \theta_n)X + (\sin \theta_n - (\theta_0 - \theta_n) \cos \theta_n)Y = a(\theta_0 - \theta_n), \\ (X - a(\theta_0 - \theta_n) \cos \theta_n)^2 + (Y - a(\theta_0 - \theta_n) \sin \theta_n)^2 \leq l^2, \\ |Z| \leq h, \end{cases} \quad (10)$$

где θ_n – полярный угол точки оси CIR ближайшей к проекции точки (X, Y, Z) на плоскость солнечного экватора, он находится из первого условия системы (10),

затем проверяются второе и третье условия, учитывая, что величины l и h зависят от гелиоцентрического расстояния точки на оси CIR $r_n = a(\theta_0 - \theta_n)$ как указано на рис. 30.

Следует отметить, что реальное распределение электронной плотности межпланетной плазмы при распространении CIR или SIR значительно сложнее и более точная модель должна содержать намного больше параметров. Рассматриваемая модель является заведомо упрощенной моделью, которая позволяет, во-первых, определить качественные отличия CIR от СМЕ в данных наблюдений, во-вторых, найти признаки, позволяющие заблаговременно предсказать приход CIR к Земле по наблюдательным данным.

4.2. Сравнение модельных карт индексов мерцаний с картами по данным наблюдений

Рассмотрены 4 события, связанные с CIR/SIR, вызвавшими магнитную бурю, в 2022 – 2023 гг. Для каждого события сравнивались наблюдательные и модельные динамические карты индексов мерцаний для серии длительностью 7 суток: трое суток до магнитной бури, день магнитной бури и трое суток после нее. 2 из 4 отобранных для анализа события являются простыми событиями (одногогорбыми по графикам концентрации WIND [192]) 8 января и 7 декабря 2022 г. Другие 2 события являются более сложными (двугорбые по графикам концентрации WIND) 15 и 23 – 24 марта 2023 г. Перед указанными событиями не наблюдалось сильных (класса M или X) и длительных солнечных вспышек, поэтому маловероятно, что указанные события были вызваны СМЕ. Связь первых 3 событий с CIR подтверждается аналогичными возмущениями, которые ранее наблюдались в периоды, отстоящие от рассматриваемых событий на промежутки, кратные 27 суткам [50]. Последнее событие 23 – 24 марта 2023 г. по-видимому, связано с SIR. Перед этим событием последняя магнитная буря, отстоящая от данного события на промежуток кратный 27 суткам, наблюдалась 19 августа 2022 г., то есть более, чем за полгода. Перед событием 23 – 24 марта наблюдалась

крупная корональная дыра на Солнце, из которой истекал быстрый поток солнечного ветра, в который попала Земля, поэтому данное событие связано, по-видимому, с SIR, тогда как другие 3 можно связать с долгоживущими структурами типа CIR. Также следует заметить, что события 8 января 2022 г. и 15 марта 2023 г. могут быть следствием одного и того же CIR, так как промежуток между ними близок к кратному 27 суткам. Повторяющиеся структуры могут быть не полностью идентичными из-за возможной эволюции при коротации.

На рис. 31 – 33 показаны динамические карты индексов мерцаний для события 8 января 2023 г. за даты 7 – 9 января соответственно. Для каждой даты в верхней панели приводится динамическая карта индексов мерцаний по данным наблюдений, средняя панель – усредненные значения динамических индексов мерцаний по всем склонениям, на которых ведутся наблюдения, и часовым интервалам (в одной точке графика усреднено 80 пикселей наблюдательной карты), нижняя панель – модельная карта, построенная в предположении, что центральная ось CIR проходит через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора в середине интервала длительности магнитной бури. В верхней части модельных карт приведена следующая информация: дата, для которой построена карта, увеличение электронной плотности плазмы внутри CIR (в $N = 3$ раза), время прохождения оси CIR через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора.

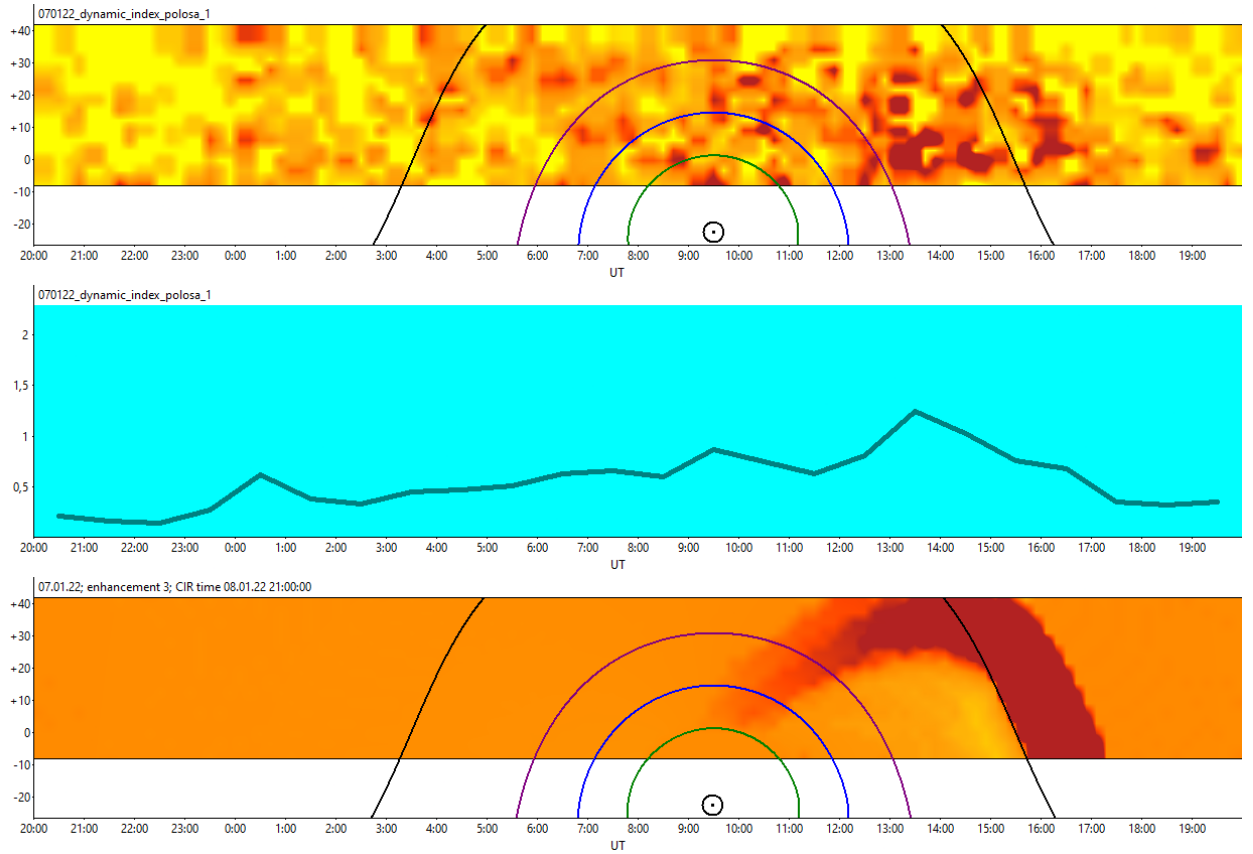


Рис. 31. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 7 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

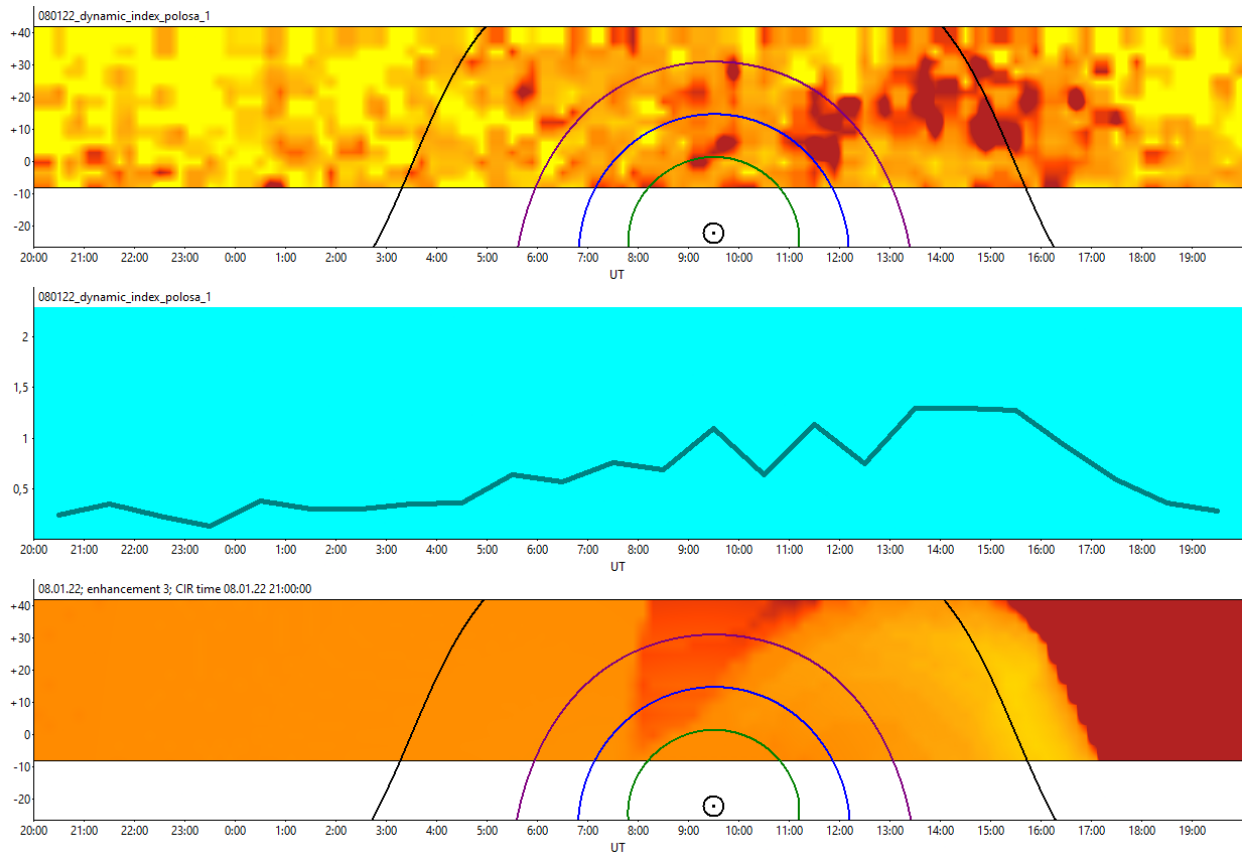


Рис. 32. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 8 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

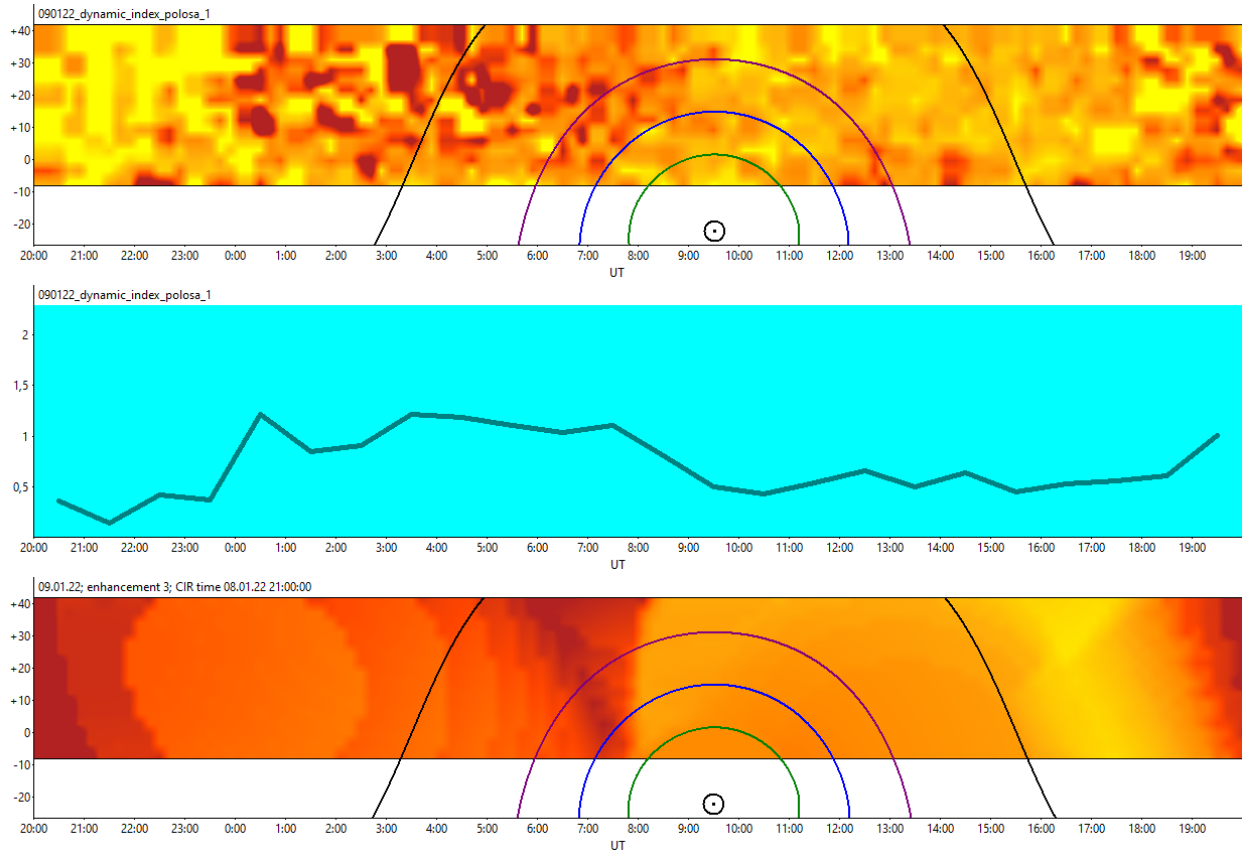


Рис. 33. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 9 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

На рис. 34 приведены графики изменения скорости солнечного ветра и концентрации протонов в межпланетной плазме по данным спутника WIND [192] на интервале с 5 по 11 января 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 8 января 2022 г.

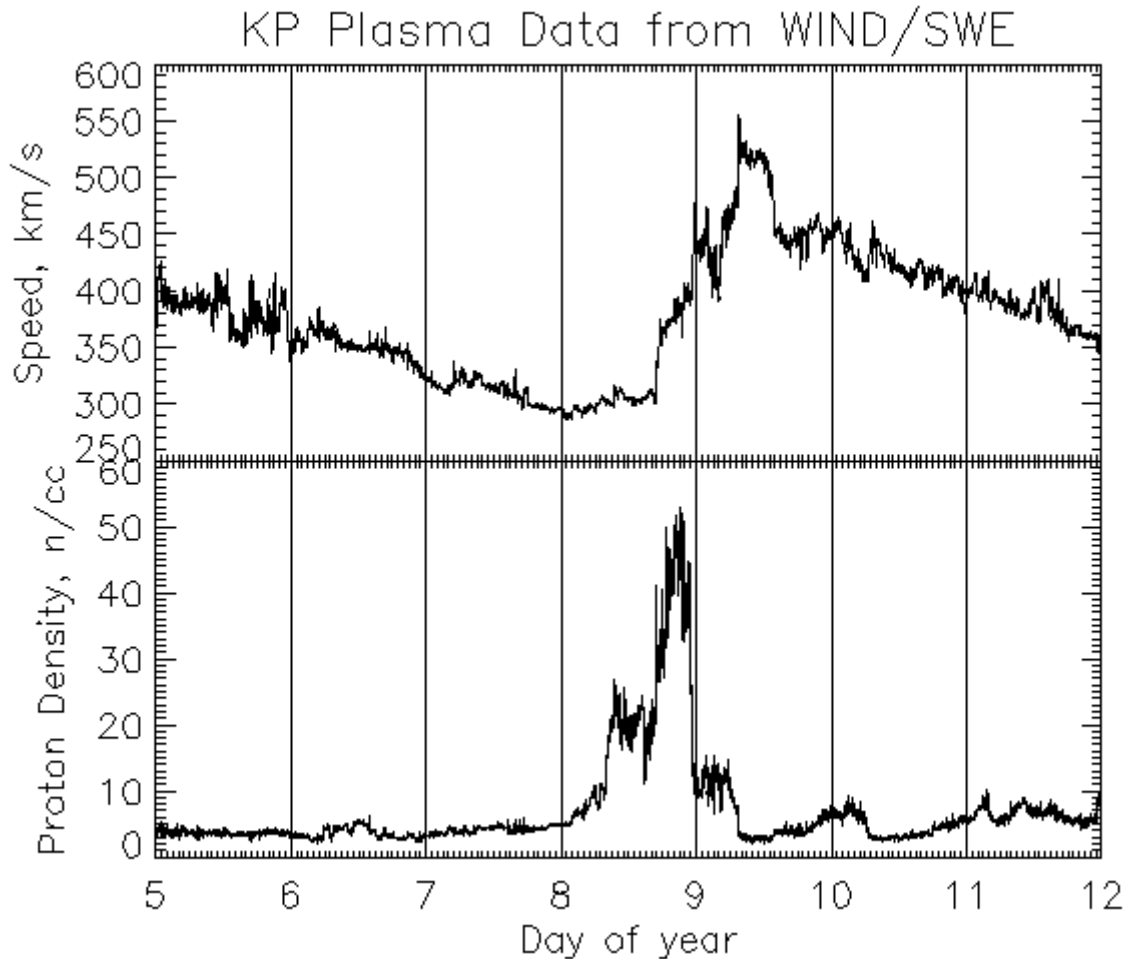


Рис. 34. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 5 по 11 января 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 8 января 2022 г.

Данное событие является простым событием (одногорбым по графику протонной концентрации межпланетной плазмы). Из рис. 31 – 33 видно, что наблюдательные и модельные карты довольно хорошо соотносятся на качественном уровне.

Далее для остальных событий наблюдательные и модельные карты приведены только за даты самого события. На рис. 35 приведены динамические карты индексов мерцаний за 7 декабря 2022 г. по аналогии с рис. 31 – 33.

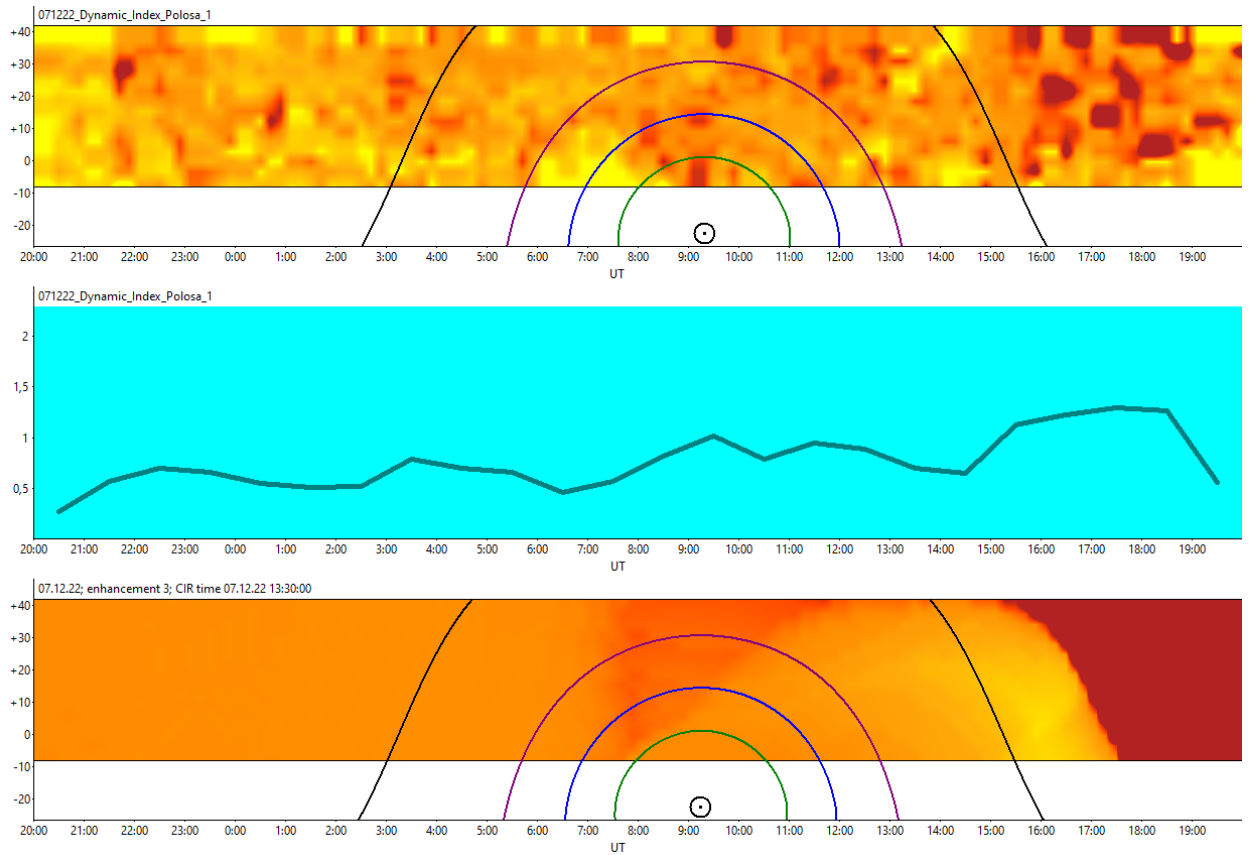


Рис. 35. Событие с CIR 7 декабря 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 7 декабря 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

На рис. 36 показаны графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов по данным спутника WIND на интервале с 4 по 10 декабря 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 7 декабря 2022 г.

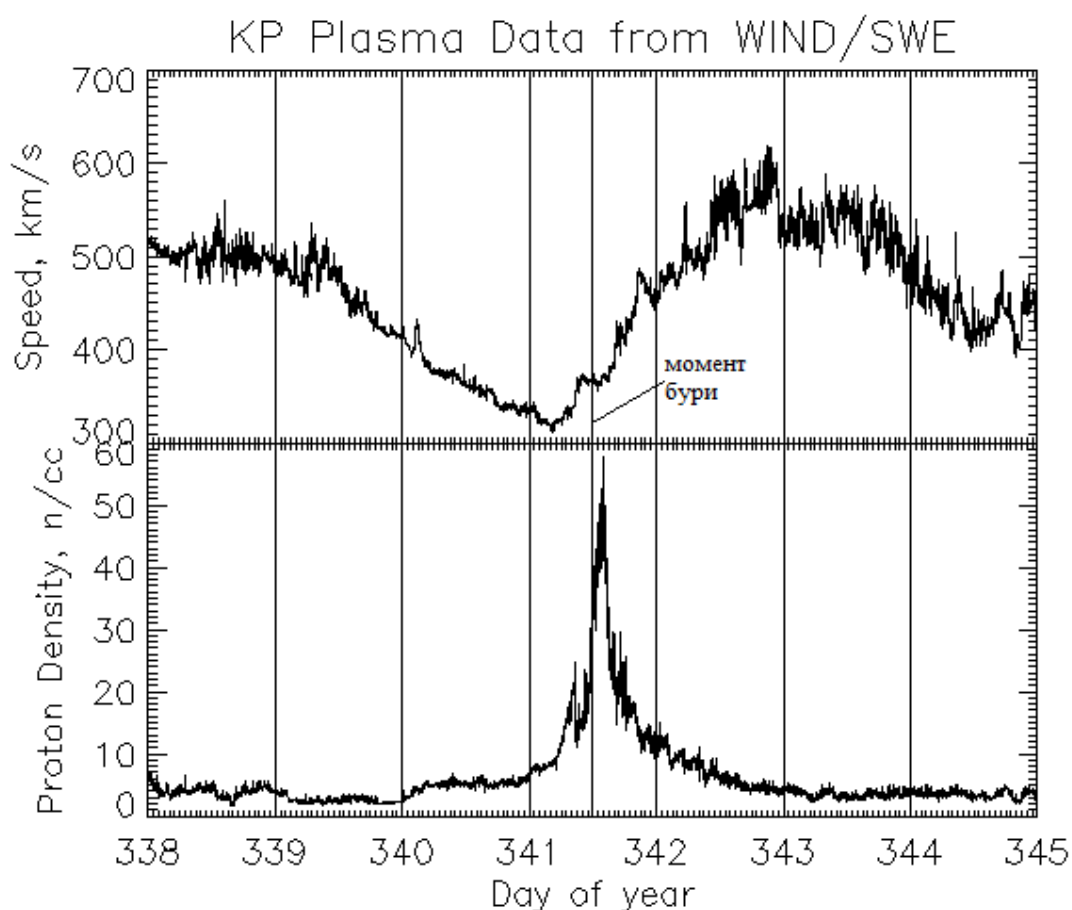


Рис. 36. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 4 по 10 декабря 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 7 декабря 2022 г.

Как и предыдущее рассмотренное событие, данное событие является также простым (одногорбым по графику концентрации), и для него модельная и наблюдательная карты в день магнитной бури на рис. 35 на качественном уровне соотносятся. Таким образом, для двух рассмотренных простых событий наблюдается качественное соответствие динамических карт индексов мерцаний: наблюдательной и модельной.

На рис. 37 показаны карты для события 15 марта 2023 г.

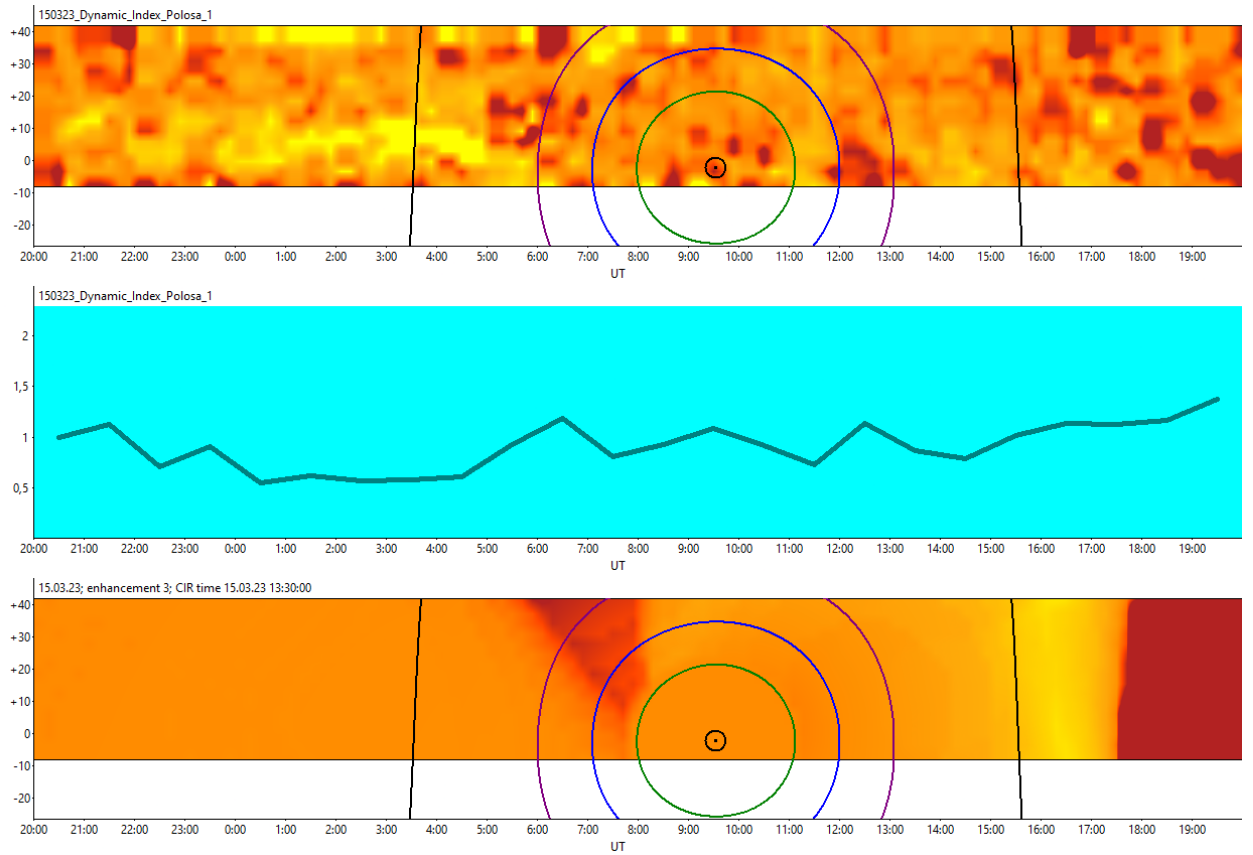


Рис. 37. Событие с CIR 15 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 15 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

На рис. 38 по аналогии с предыдущими событиями показаны графики изменения скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы на интервале с 12 по 19 марта 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 15 марта 2023 г.

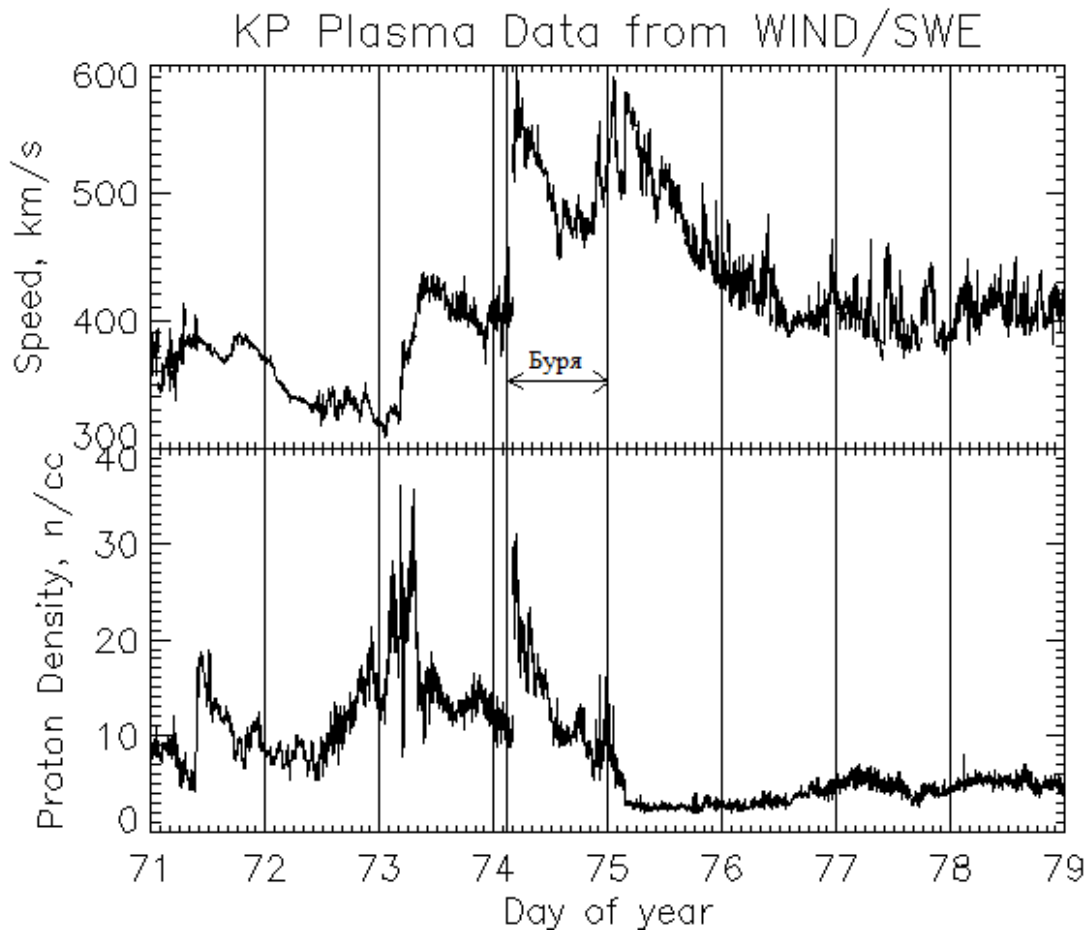


Рис. 38. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 12 по 19 марта 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 15 марта 2023 г.

Событие 15 марта 2023 г. является сложным (двугорбым по графику концентрации протонов). Карты по нему на рис. 37 на качественном уровне соответствуют друг другу.

На рис. 39 – 40 показаны динамические карты индексов мерцаний за даты 23 – 24 марта 2023 г. соответственно.

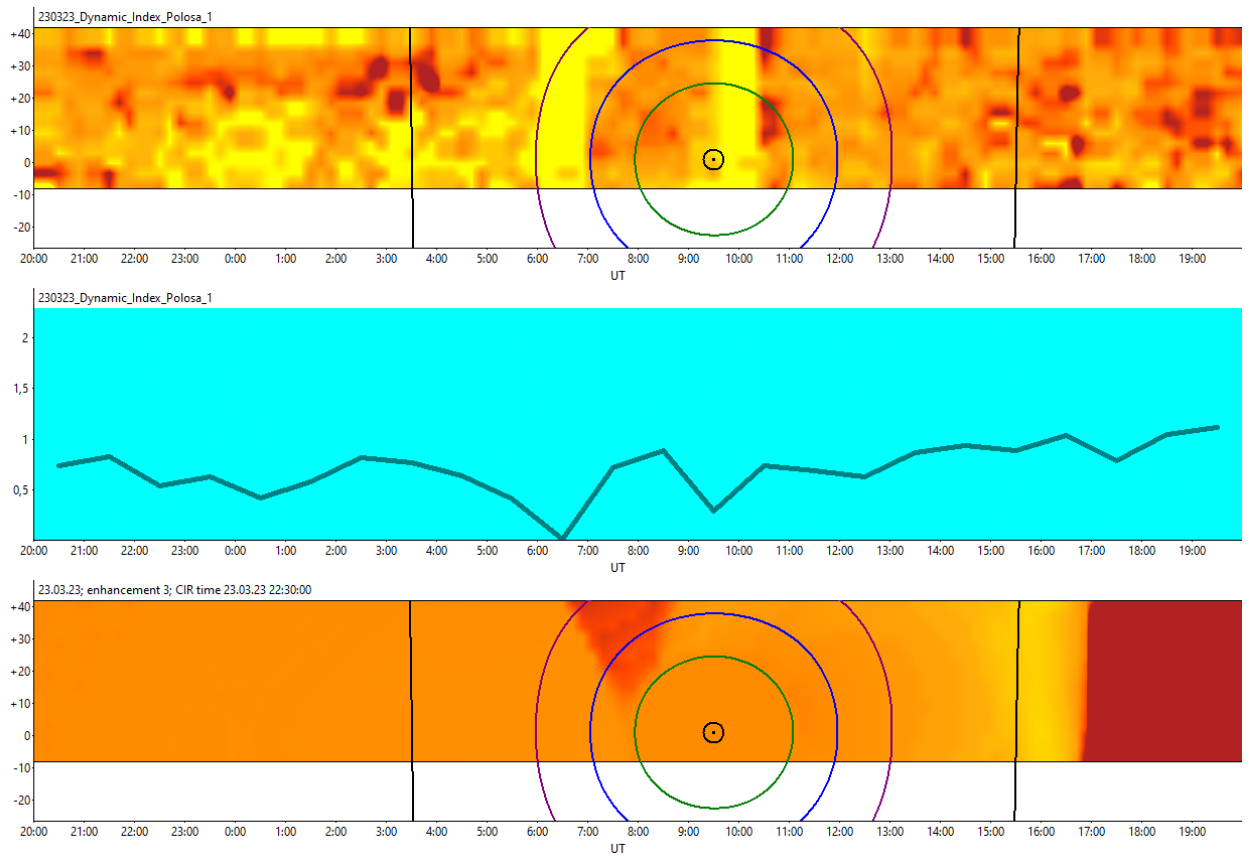


Рис. 39. Событие с SIR 23 – 24 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 23 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

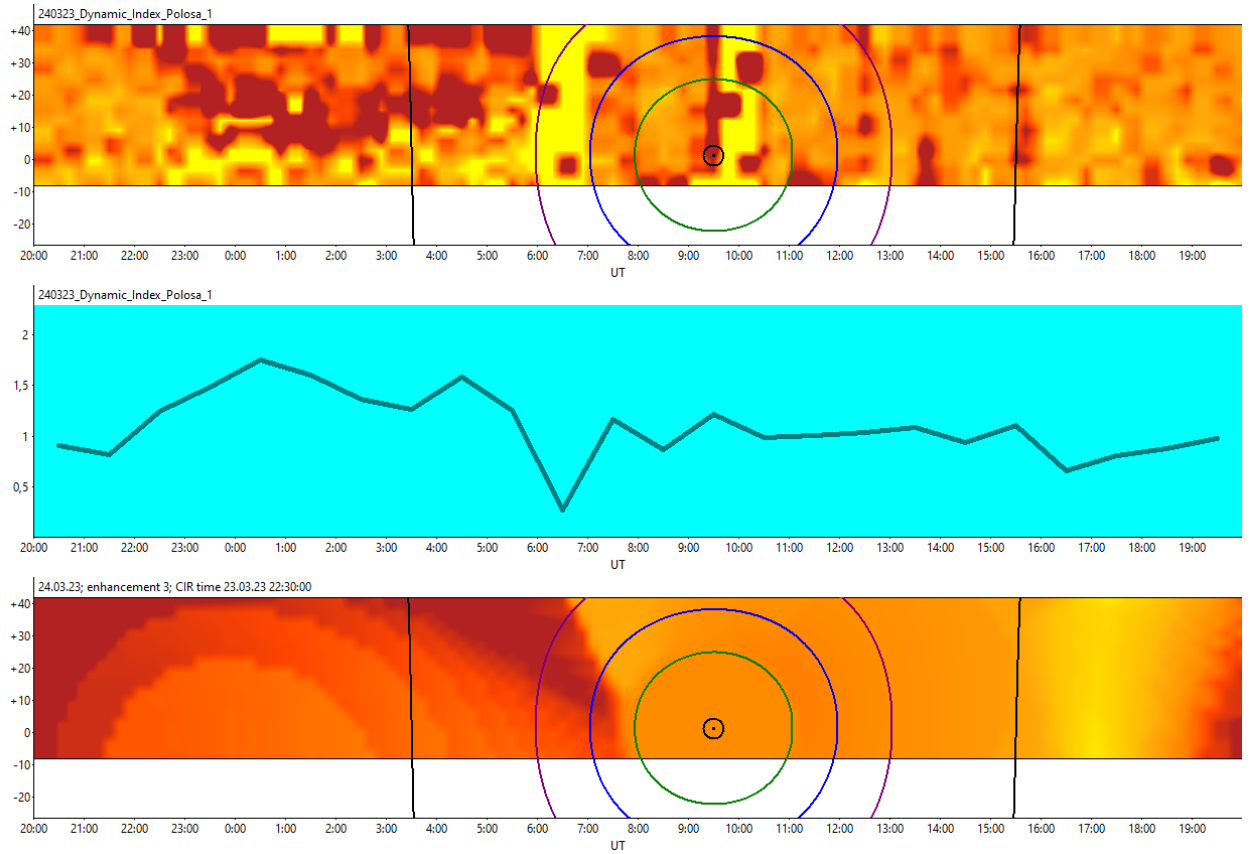


Рис. 40. Событие с SIR 23 – 24 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 24 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].

На рис. 41 приведены графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов аналогично предыдущим событиям на интервале с 20 по 27 марта 2023 г., содержащем событие 23 – 24 марта 2023 г.

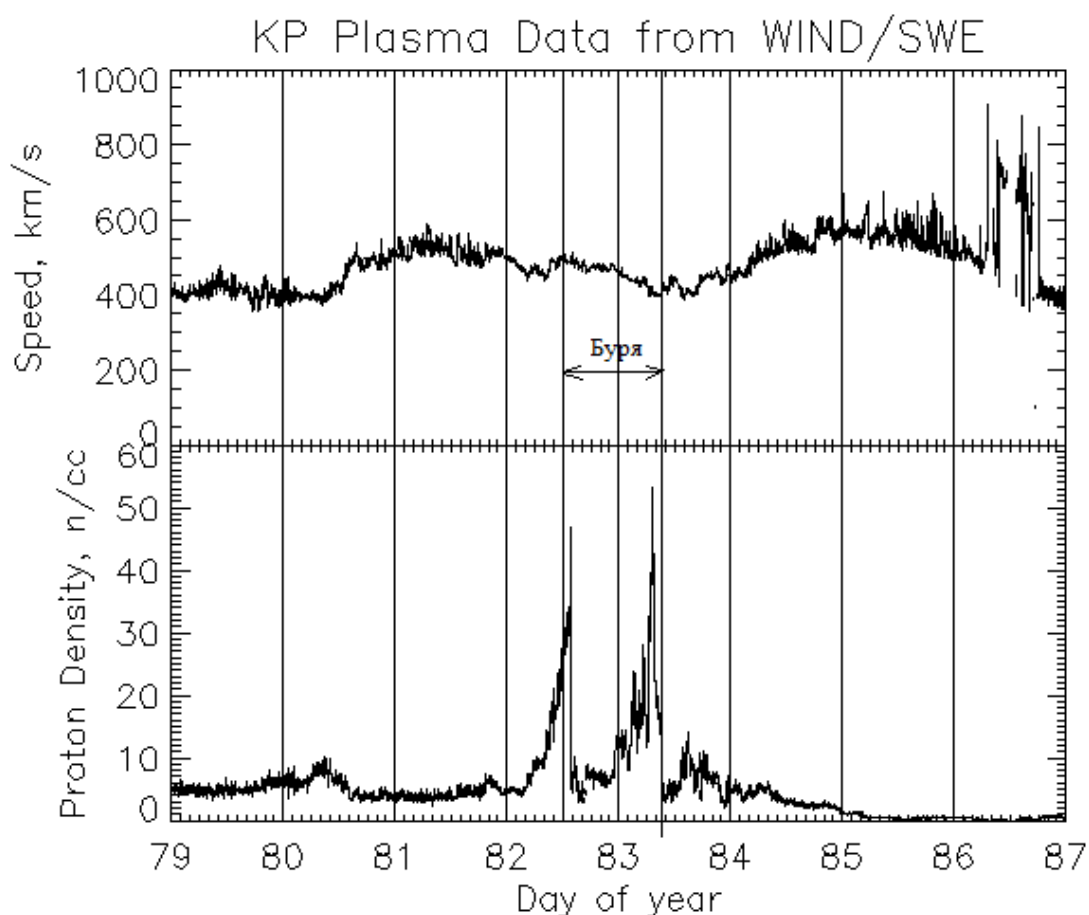


Рис. 41. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 20 по 27 марта 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 23 – 24 марта 2023 г.

Как и предыдущее событие, данное событие также является сложным (двугорбым по графику концентрации частиц). Карты индексов мерцаний на рис. 39 – 40 на качественном уровне соотносятся.

Из приведенных выше рисунков видно, что наблюдательные и модельные карты довольно хорошо соотносятся на качественном уровне как для простых (одногогорбых) событий, так и для более сложных (двугорбых) событий. Таким образом, в целом подтверждаются модельные расчеты до прихода CIR или SIR к Земле, а также в момент магнитной бури и сутки после магнитной бури. Следует

отметить, что на рис. 39 – 40 по событию 23 – 24 марта 2023 г. в указанные даты отсутствуют данные на интервалах 6:00 – 7:00 UT и примерно 9:30 – 10:30 UT, такие области показаны желтым цветом.

В отдельные дни модельные и наблюдательные карты не соответствуют друг другу по аналогичным причинам, как и в случае с CME:

- 1) Неизвестна точная модель межпланетной среды;
- 2) Реальная модель распространяющихся возмущений является более сложной, чем рассмотренная упрощенная модель, поэтому не стоит ожидать детального соответствия модельных и наблюдательных карт;
- 3) Наложение других крупномасштабных возмущений межпланетной плазмы.

Пункты 2 – 3 могут быть преодолены использованием нескольких инструментов на разных географических долготах, или при использовании чувствительных радиотелескопов типа LOFAR/MWA, управляемых по склонениям и прямым восхождениям, что позволило бы получать часовые карты индексов мерцаний, которые позволили бы почти в реальном времени отследить динамику распространения CME и CIR/SIR.

Индивидуальные CIR могут отличаться друг от друга, и даже при 27-суточной повторяемости структура также может измениться за счет эволюции. Однако, даже простая модель позволяет выявить признаки распространения CIR/SIR до их прихода к Земле: начало усиления мерцаний в районе 13 – 15 ч. московского времени за 2 – 3 суток до прихода возмущения и продолжение усиления в течение нескольких часов, затем ближе к приходу начало усиления смещается к чуть более раннему времени и это усиление растягивается во времени, а в утреннем секторе усиление мерцаний отсутствует до прихода возмущений типа CIR/SIR в отличие от случая распространения CME. В период же магнитной бури, вызванной CIR, наблюдается усиление ночных мерцаний. Такая последовательность усиления мерцаний соответствует приближению CIR к Земле с восточной стороны при вращении с Солнцем. Усиления ночных мерцаний

после прихода CIR к Земле связано с приходом этого возмущения в области межпланетной плазмы, примыкающей к земной орбите.

Также одним из признаков распространения CIR является ослабление ночных мерцаний за 2 – 3 суток до его прихода к Земле [47, 149 – 152], что наблюдается для всех 4 рассмотренных в данной главе событиях. Данное ослабление можно объяснить пониженным абсолютным уровнем мелкомасштабной турбулентности в достаточно протяженной области перед сжатой частью CIR [193]. Указанный фактор не рассматривался в рамках описанной в настоящей главе модели CIR/SIR в целях упрощения. Тем не менее, ослабление ночных мерцаний (вместе с усилением вечерних) может рассматриваться как дополнительный предвестник прихода возмущения к Земле.

Указанные особенности динамики уровня межпланетных мерцаний, наряду с 27-суточной повторяемостью, могут быть использованы для краткосрочного прогноза прихода CIR или SIR к Земле.

4.3. Выводы по главе 4

Разработана простая модель ведущей части области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра с повышенной концентрацией плазмы в виде спиральной струи с прямоугольным сечением. Для 4 событий в 2022 – 2023 гг., вызванных CIR/SIR, 2 из которых простые (одногогорбые по графику концентрации протонов по данным спутника WIND [192]) и 2 более сложные (двугорбые), сравнивались динамические карты индексов мерцаний, рассчитанных по описанной модели, и построенных по данным наблюдений. Как в случае простых, так и в случае более сложных событий модельные динамические карты индексов мерцаний визуально достаточно хорошо согласуются с картами наблюдательными на качественном уровне до начала магнитной бури, в момент бури и сутки после нее. В данных наблюдений межпланетных мерцаний обнаружено качественное отличие CIR/SIR от CME. До прихода CME к Земле на картах наблюдается усиление утренних мерцаний и в тот

же день наблюдается усиление вечерних мерцаний. В случае распространения CIR/SIR согласно модельным картам возможна следующая динамика уровня межпланетных мерцаний: за 2 – 3 суток до прихода возмущения усиление мерцаний начинается около 13 – 15 ч. московского времени и длится несколько часов, затем ближе к приходу возмущения начало усиления смещается к чуть более раннему времени, а усиление растягивается во времени. В утреннем же секторе усиление мерцаний отсутствует до прихода CIR/SIR к Земле в отличие от случаев распространения CME. А в момент магнитной бури происходит усиление ночных мерцаний. Данный факт наряду с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода CIR/SIR к Земле (что не рассматривалось в рамках описанной модели), а также 27-суточной периодичностью прихода CIR к Земле, может учитываться при краткосрочном прогнозе космической погоды.

Модельные и наблюдательные карты индексов мерцаний чаще всего не в полной мере соответствуют друг другу, что может быть связано с недостаточно точной моделью межпланетной среды, более сложной моделью возмущений типа CIR/SIR, наложения возмущений. Проблема неточности модели возмущений и наложения возмущений может быть решена использованием наблюдений на разных географических долготах или использованием антенн, управляемых по склонению и прямому восхождению типа LOFAR/MWA.

Заключение

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию динамики солнечного ветра по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН в Пушинской радиоастрономической обсерватории. В работе использованы данные наблюдений, полученные в 2014 – 2023 гг.

По данным наблюдений межпланетных мерцаний компактного источника 3C48 и протяженного источника 3C298 за 2014 – 2019 гг. оценивалась скорость солнечного ветра на элонгациях от 25° до 60° . Проводилось сравнение полученных оценок скоростей солнечного ветра с оценками, полученными по трехпунктовым наблюдениям в ISEE Университета Нагойя в Японии с использованием временной задержки прихода сигнала от радиоисточников между радиотелескопами. Среднегодовые оценки скоростей солнечного ветра, полученные с использованием двух методов, совпадают в пределах погрешностей измерений для 3C48, в то время как для протяженного источника оценки, полученные на БСА, превышают оценки, полученные в ISEE. Возможные причины: недостаточно точная модель межпланетной среды, отличающаяся от сферически-симметричного случая, а также анизотропия источника 3C298. Сделан вывод о применимости описанной методики оценки скорости солнечного ветра по наблюдениям компактных радиоисточников. Среднегодовые оценки скоростей солнечного ветра с использованием обоих методов по наблюдениям обоих источников показывают рост на спаде 24-го цикла солнечной активности с момента его максимума в 2014 г. и до его окончания в 2019 г. Это согласуется с динамикой структуры солнечного ветра на спаде цикла солнечной активности.

Данные наблюдений источника 3C48 за 2015 – 2019 гг. использовались для исследования радиальной зависимости индекса мерцаний, а также корреляции индекса мерцаний и скорости солнечного ветра. По результатам исследования зависимости индекса мерцаний от гелиоцентрического расстояния сделан вывод о наличии приэкваториального плотного токового слоя, толщина которого убывает на спаде цикла солнечной активности. Из полученной примерно обратной

пропорциональности между индексом мерцаний и скоростью солнечного ветра сделан вывод о пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению. Указанный вывод был получен по наблюдениям одиночного радиоисточника при усреднениях величин на годовых интервалах. Для исследования глобальной структуры солнечного ветра на более коротких интервалах необходимо использовать одновременные наблюдения множества компактных радиоисточников.

Предложена простая кинематическая модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве. На примере 11 событий с апреля 2021 г. по октябрь 2022 г. показано, что использование данной модели вместе с информацией о вспышечной активности короны Солнца позволяет предсказать приход СМЕ к Земле за 15 – 20 ч. путем визуального сравнения наблюдательных и модельных динамических карт индексов мерцаний. В данных наблюдений СМЕ может быть обнаружен по усилению межпланетных мерцаний в утренней, затем в тот же день в вечерней области до прихода возмущения к Земле. Разработанная упрощенная «унифицированная» модель для СМЕ позволяет с довольно высокой точностью предсказывать время его прихода к Земле.

Также предложена упрощенная модель ведущей части крупномасштабных возмущений типа CIR/SIR. Для 4 событий в 2022 – 2023 гг., заведомо связанных с CIR/SIR, проводилось сравнение динамических карт индексов мерцаний по данным наблюдений и модельных. На качественном уровне наблюдательные карты соответствуют модельным в случае простых событий (одногогорбых по графику протонной плотности согласно данным спутника WIND [192]) и более сложных (двугорбых), таким образом, в целом модельные расчеты для CIR/SIR подтверждаются. За 2 – 3 суток до прихода CIR/SIR к Земле на модельных картах усиление мерцаний начинается около 13 – 15 ч. по московскому времени и длится несколько часов, затем ближе к приходу возмущения начало усиления смещается к чуть более раннему времени, период усиления растягивается во времени, при этом усиление утренних мерцаний отсутствует. После прихода возмущения мерцания усиливаются в утренней и ночной области. Данный признак может быть

использован для краткосрочного прогноза космической погоды вместе с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода CIR/SIR к Земле, а также 27-суточной периодичностью прихода CIR к Земле.

С участием диссертанта разработан и создан сайт по прогнозу космической погоды [161], где в пробном режиме выполняется прогноз прихода геомагнитных возмущений по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН с использованием описанных упрощенных моделей CME и CIR/SIR. Однако, прогноз космической погоды не всегда точен и возможен по ряду причин: неизвестна точная модель межпланетной среды; неизвестны точные модели возмущений межпланетной плазмы типа CME и CIR/SIR; наложение возмущений друг на друга; ограниченность радиотелескопа меридионального типа БСА ФИАН, из-за чего можно «проглядеть» возмущения, распространяющиеся с высокой скоростью. Последние 3 из указанных проблем могут быть решены использованием нескольких антенных решеток на разных географических долготах или антенн типа LOFAR/MWA управляемых как по склонению, так и по прямому восхождению, позволяющих строить часовые карты индексов мерцаний и таким образом отслеживать распространение CME или CIR/SIR почти в режиме реального времени. Также для повышения точности предсказания начала магнитных бурь желательны данные о компоненте межпланетного магнитного поля B_z [153], поскольку не все возмущения, приходящие к Земле, вызывают магнитную бурю.

Список литературы

1. Parker E. N. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. // *Astrophysical Journal*. – 1958. – V. 128. – P. 664 – 675.
2. Cranmer S. R., Winebarger A. R. The Properties of the Solar Corona and Its Connection to the Solar Wind. // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – V. 57. – P. 157 – 187.
3. von Steiger R., Schwadron N. A., Fisk L. A., et al. Composition of quasi-stationary solar wind flows from Ulysses/Solar Wind Ion Composition Spectrometer. // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – V. 105. – P. 27,217 – 27,238.
4. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д. и др. Изучение межпланетного ионизационного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете. // *Доклады Академии наук СССР*. – 1960. – Т. 131. – № 6. – С. 1301.
5. Gringauz K. I. Some results of experiment in interplanetary space by means of charged particle trapce on Soviet Space probe. // *Space Research*. – 1961. – V. 2. – P. 539 – 553.
6. Bonetti A., Bridge H. S., Lazarus A. J. et al. Explorer 10 plasma measurements. // *Journal of Geophysical Research*. – 1963. – V. 68. – P. 4017 – 4063.
7. Snyder C. W., Neugebauer M. Interplanetary solar wind measurements by Mariner 2. // *Space Research*. – 1964. – V. 4. – P. 89 – 113.
8. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 1. Average properties. // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – V. 71. – P. 4469 – 4484.
9. Neugebauer M., Snyder C. W. Mariner 2 observations of the solar wind, 2. Relation of plasma properties to the magnetic field. // *Journal of Geophysical Research*. – 1967. – V. 72. – P. 1823 – 1828.
10. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. – М.: Мир, 1976. – 302 с.

11. Брандт Дж. Солнечный ветер. – М.: Мир, 1973. – 208 с.
12. Коваленко В. А., Молодых С. И. Энергетический баланс открытых областей короны и солнечного ветра. // Письма в Астрономический журнал. – 1978. – Т. 4. – С. 316 – 320.
13. Proelss G. W. Physics of the Earth's space environment. – Berlin: Springer, 2004. – P. 513.
14. Веселовский И. С. Солнечный ветер. Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. – М.: ВИНТИ, 1974. – Т. 4. – С. 7 – 192.
15. Чертков А. Д. Солнечный ветер и внутреннее строение Солнца. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
16. Виткевич В. В. Новый метод исследования солнечной короны. // Доклады Академии наук СССР. – 1951. – Т. 77. – С. 585 – 588.
17. Виткевич В. В. Результаты наблюдений рассеяния радиоволн на неоднородностях солнечной короны. // Доклады Академии наук СССР. – 1955. – Т. 101. – С. 429.
18. Бабий В. И., Виткевич В. В., Власов В. И. и др. Сверхкорона Солнца по наблюдениям 1959 – 1963 гг. // Астрономический журнал. – 1965. – Т. 42. – С. 107 – 116.
19. Hewish A., Scott P. F., Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources. // Nature. – 1964. – V. 203. – P. 1214 – 1217.
20. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным. // Геомагнетизм и аэрномия. – 1979. – Т. 19. – С. 401 – 424.
21. Gapper G. R., Hewish A., Purvis A., Duffett&Smith P. J. Observing interplanetary disturbances from the ground. // Nature. – 1982. – V. 296. – P. 633 – 636.
22. Vitkevich V. V. Solar-Terr. Symposium, Dordecht, D. Reidel, 1971. P. 49.
23. Rickett B. J. Power spectrum of density irregularities in the solar wind plasma. // Journal of Geophysical Research. – 1973. – V. 78. – P. 1543.

24. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения солнечного ветра. // *Астрономический циркуляр*. – 1966. – Т. 396. – С. 1 – 4.
25. Dennison P. A., Hewish A. The Solar Wind outside the Plane of the Ecliptic. // *Nature*. – 1967. – V. 213. – P. 343 – 346.
26. Hewish A., Dennison P.A. Measurements of the Solar Wind and the Small-Scale Structure of the Interplanetary Medium. // *Journal of Geophysical Research*. – 1967. – V. 72. – P. 1977 – 1978.
27. Slee O. B., Higgins C. S. The solar wind and Jovian decametric radio emission. // *Australian Journal of Physics*. – 1968. – V. 21. – P. 341.
28. Hewish A., Symonds M. D. Radio investigation of the solar plasma. // *Planetary and Space Science*. – 1969. – V. 17. – P. 313 – 320.
29. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические исследования дрейфа неоднородностей межпланетной плазмы. // *Астрономический журнал*. – 1969. – Т. 46. – С. 851 – 861.
30. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967-1969 гг. // *Астрономический журнал*. – 1972. – Т. 49. – С. 595.
31. Armstrong J.V., Coles W.A. Analysis of three-station IPS. // *Journal of Geophysical Research*. – 1972. – V. 77. – No. 25. – P. 4602 – 4610.
32. Kojima M., Kakinuma T. Solar cycle dependence of global distribution of solar wind speed. // *Space Science Reviews*. – 1990. – V. 53. – P. 173 – 222.
33. Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. Long-term evolution in the global distribution of solar wind speed and density fluctuations during 1997-2009. // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – V.117. – No. 6. – P. 06108 – 061012.
34. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний. Теория. // *Астрономический журнал*. – 1978. – Т. 55. – С. 411 – 418.
35. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний. Наблюдения. // *Астрономический журнал*. – 1979. – Т. 56. – С. 613 – 622.

36. Manoharan P. K., Ananthkrishman S. Determination of solar wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillations. // *Monthly notices of Royal Astronomy Society*. – 1990. – V. 244. – P. 691 – 695.
37. Manoharan P. K., Kojima M., Misawa H. The spectrum of electron density fluctuations in the solar wind and its variations with solar wind speed. // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – V. 99. – P. 23,411 – 23,420.
38. Manoharan P. K. Interplanetary disturbances and their association with large-scale magnetic field on the Sun. // *Bulletin of the Astronomical Society of India*. – 1998. – V. 26. – P. 211 – 217.
39. Gothoskar P., Rao A. P. On the observing mass ejections in the interplanetary medium. // *Solar Physics*. – 1999. – V. 185. – P. 361 – 390.
40. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности. // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 2011. – Т. 51. – № 6. – С. 810 – 815.
41. Mejia-Ambriz J. C., Jackson B. V., Gonzalez-Esparza J. A., et al. Remote-sensing of solar wind speeds from IPS observations at 140 and 327 MHz using MEXART and STEL. // *Solar Physics*. – 2015. – V. 290. – P. 2539 – 2552.
42. Chashei I. V., Lukmanov V. R., Tyul'bashev S. A., Tokumaru M. Comparison of Solar Wind Speed Estimates from Nearly Simultaneous IPS Observations at 327 and 111 MHz. // *Solar Physics*. – 2021. – V. 296. – Article 63. – 14P.
43. Chashei I. V., Shishov V. I., Tyul'bashev S. A. et. al. Results of IPS Observation in the Period Near Solar Activity Minimum. // *Solar Physics*. – 2013. – V. 285. – P. 141 – 149.
44. Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3С 48 в минимуме солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2013. – Т. 90. – С. 639 – 647.

45. Hardwick S. A., Bisi M. M., Davies J. A. et al. Observations of Rapid Velocity Variations in the Slow Solar Wind. // *Solar Physics*. – 2013. – V. 285. – P. 111 – 126.
46. Iju T., Tokumar M., Fujiki K. Radial speed evolution of interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23. // *Solar Physics*. – 2013. – V. 288. – P. 331 – 353.
47. Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Писанко Ю. В. Мониторинг межпланетных мерцаний и возможности краткосрочного прогноза космической погоды. // *Метеорология и гидрология*. – 2021. – № 3. – С. 28 – 37.
48. Chashei I. V., Tyul'bashev S. A., Lukmanov V. R., Subaev I. A. ICMEs and CIRs monitored in IPS data at a frequency of 111 MHz. // *Advances in Space Research*. – 2023. – V. 72. – P. 5371 – 5375.
49. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Анализ возможностей краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений по наблюдениям корональных выбросов массы на радиотелескопе БСА ФИАН. // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – С. 535 – 545.
50. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Коротящие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний: моделирование и наблюдения. // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – С. 546 – 556.
51. Ефимов А. И., Лотова Н. А. О гелиоширотной зависимости скорости солнечного ветра. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1975. – Т. 15. – С. 731 – 732.
52. Власов В. И. Межпланетная плазма в 11-летнем цикле солнечной активности. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1983. – Т. 23. – С. 475.
53. Balogh A., Smith E. J., Tsurutani B. T. et al. The heliospheric magnetic field over the south polar region of the Sun. // *Science*. – 1995. – V. 268. – P. 1007 – 1010.
54. McComas D. J., Elliott H. A., Schwadron N. A. et al. The three-dimensional solar wind around solar maximum. // *Geophysical Research Letters*. – 2003. – V. 30. – P. 1517 – 1520.

55. Cohen M. H., Clark B. C., Jauncey D. L. Angular Size of 3C 273B. // *The Astrophysical Journal*. – 1967. – V. 147. – P. 449 – 456.
56. Chapman S. Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere. // *Smithsonian Contribution to Astrophysics*. – 1957. – V. 2. – P. 1 – 11.
57. Chapman S. Interplanetary Space and the Earth's Outermost Atmosphere. // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. – 1959. – V. 253. – P. 462 – 481.
58. Chapman S. *Space Astrophysics*, ed. W. Liller, McGraw-Hill Book Co., New York. – 1961. – 133P.
59. Parker E. N. Interaction of the Solar Wind with the Geomagnetic Field. // *Physics of Fluids*. – 1958. – V. 1. – P. 171 – 187.
60. Newkirk G. A., Warwick J. W., Zirin H. Backscatter of Cosmic Rays by the Sun's H II Sphere. // *Journal of Geophysical Research*. – 1960. – V. 65. – P. 2540.
61. Parker E. N. Dynamical Theory of the Solar Wind. // *Space Science Reviews*. – 1965. – V. 4. – P. 666 – 708.
62. Carovillano R. L., King J. H. On the Solutions of Parker's Hydrodynamic Theory of Solar and Stellar Winds. // *The Astrophysical Journal*. – 1965. – V. 141. – P. 526.
63. Noble L. M., Scarf F. L. Conductive Heating of the Solar Wind. I. // *The Astrophysical Journal*. – 1963. – V. 138. – P. 1169.
64. Whang Y. C., Liu C. K., Chang C. C. Viscous Model of the Solar Wind. // *The Astrophysical Journal*. – 1966. – V. 145. – P. 255.
65. Pneuman G. W., Kopp R. A. Gas-magnetic field interactions in the solar corona. // *Solar Physics*. – 1971. – V. 18. – Issue 2. – P. 258 – 270.
66. Axford W. I., Dessler A. J., Gottlieb B. Termination of Solar Wind and Solar Magnetic Field. // *Astrophysical Journal*. – 1963. – V. 137. – P. 1268.
67. Weber E. J., Davis L. The Angular Momentum of the Solar Wind. // *Astronomical Journal*. – 1967. – V. 148. – P. 217 – 227.
68. Modisette J. L. Solar Wind Induced Torque on the Sun. // *Journal of Geophysical Research*. – 1967. – V. 72. – P. 1521.

69. Brandt J. C., Wolff C., Cassinelli J. P. Interplanetary Gas. XVI. A Calculation of the Angular Momentum of the Solar Wind. // *Astronomical Journal*. – 1969. – V. 156. – P. 1117.
70. Schubert G., Coleman P. J. The Angular Momentum of the Solar Wind. // *Astrophysical Journal*. – 1968. – V. 153. – P. 943 – 950.
71. Hartle R. E., Sturrock P. A. Two-Fluid Model of the Solar Wind. // *Astrophysical Journal*. – 1968. – V. 151. – P. 1155.
72. Jensen E. Mass losses through evaporation from a completely ionized atmosphere with applications to the solar corona. // *Astrofisica Norvegica*. – 1963. – V. 8. – P. 99.
73. Brandt J. C., Cassinelli J. P. Interplanetary Gas. XI. An Exospheric Model of the Solar Wind. // *Icarus*. – 1966. – V. 5. – P. 47.
74. Кутузов А. С., Чашей И. В. О теплопроводной модели солнечного ветра. // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1995. – Т. 35. – С. 36.
75. Axford W. I., Leer E., Skadron G. The acceleration of cosmic rays by shock waves. // *Proc. 15th ICRC*. – 1977. – V. 11. – P. 132 – 137.
76. Steinolfson R. S., Suess S. T., Wu S. T. The steady global corona. // *Astrophysical Journal*. – 1982. – V. 255(2). – Pt. 1. – P. 730 – 742.
77. Hollweg J. V. Some physical processes in the solar wind. // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. – 1978. – V. 16. – P. 689.
78. Коваленко В. А. Солнечный ветер. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
79. Чашей И. В., Шишов В. И. Формирование потоков массы и энергии солнечного ветра в модели с волновым источником. // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1987. – Т. 27. – С. 705.
80. Чашей И. В., Шишов В. И. О потоке энергии МГД-волн, выходящем в корону Солнца. // *Астрономический журнал*. – 1987. – Т. 64. – С. 398.
81. Чашей И. В., Шишов В. И. Самосогласованная модель спокойной солнечной короны с волновым источником энергии. // *Астрономический журнал*. – 1988. – Т. 65. – С. 157.

82. Sandbaek O., Leer E. Coronal Heating and Solar Wind Energy Balance. // *Astrophysical Journal*. – 1995. – V. 454. – P. 486.
83. Кутузов А. С., Чашей И. В. Формирование короны и ускорение солнечного ветра волновыми источниками энергии-импульса. // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1998. – Т. 38. – С. 1.
84. Веселовский И. С., Лукашенко А. Т. Модель магнитного поля во внутренней гелиосфере с учетом выравнивания радиальной напряженности в короне солнца. // *Астрономический вестник*. – 2012. – Т. 46. – С. 162 – 172.
85. Веселовский И. С. Происхождение солнечного ветра: астрофизический и плазменно-физический аспекты проблемы. // *Солнечно-земная физика*. – 2008. – Т. 1. – С. 93 – 98.
86. Coleman P. Turbulence, viscosity and dissipation in the solar wind plasma. // *The Astrophysical Journal*. – 1968. – V. 153. – P. 371.
87. Siscoe G. L., Davis L. J., Coleman P. J. et al. Power spectra and discontinuities in the interplanetary magnetic field: Mariner 4. // *Journal of Geophysical Research*. – 1968. – V. 73. – P. 61.
88. Denskat K. U., Beiroth H. J., Neubauer F. M. Interplanetary magnetic field power spectra with frequencies from 2.4×10^{-5} Hz to 470 Hz from Helios-observations during solar minimum conditions. // *Journal of Geophysics*. – 1983. – V. 54. – P. 60 – 67.
89. Denskat K. U., Neubauer F. M. Statistical properties of low frequency magnetic field fluctuations in the solar wind from 0.29 to 1.0 AU during solar minimum conditions: Helios-1 and Helios-2. // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – V. 87. – P. 2215 – 2223.
90. Marsch E., Tu C.-Y. Dynamics of correlation functions with Elsasser variables for inhomogeneous MHD turbulence. // *Journal of Plasma Physics*. – 1989. – V. 41. – P. 479 – 491.
91. Intrilligator D. S. Direct observations of higher frequency density fluctuations in the interplanetary plasma. // *Astrophysical Journal*. – 1975. – V. 196. – P. 879 – 882.

92. Unti T. W. J., Neugebauer M., Goldstein B. E. Direct measurements of solar wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz. // *The Astrophysical Journal*. – 1973. – V. 180. – P. 590 – 598.
93. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. // *Доклады Академии наук СССР*. – 1941. – Т. 30. – № 1. – С. 9 – 12.
94. Ирошников Р. С. Турбулентность несжимаемой замагниченной жидкости. // *Астрономический журнал*. – 1963. – Т.40. – С.472 – 481.
95. Kraichnan D. H. Inertial-Range Spectrum of Hydromagnetic Turbulence. // *Physics of Fluids*. – 1965. – V. 8. – No. 7. – P. 1385 – 1397.
96. Ebert R. W., McComas D. J., Elliott H. A. et al. Bulk properties of the slow and fast solar wind and interplanetary coronal mass ejections measured by Ulysses: Three polar orbits of observations. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2009. – V. 114. – A01109.
97. Owens M. J. Solar-wind structure. // *Oxford Research Encyclopedia of Physics*. – 2020. – DOI: 10.1093/acrefore/9780190871994.013.19.
98. Schwenn R. Space Weather: The Solar Perspective. // *Living Reviews in Solar Physics*. – 2006. – V. 3. – Article 2. – P. 1 – 72.
99. Ермолаев Ю. И., Николаева Н. С., Лодкина И. Г., Ермолаев М. Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976 – 2000 гг. // *Космические исследования*. – 2009. – Т. 47. – С. 99 – 113.
100. Manoharan P. K. Three-dimensional Evolution of Solar Wind during Solar Cycles 22-24. // *Astrophysical Journal*. – 2012. – V. 751. – No. 7. – P. 128 – 140.
101. Bale S. D., Badman S. T., Bonnell J. W. et al. Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole. // *Nature*. – 2019. – V. 576. – P. 237 – 242.
102. Ермолаев Ю. И., Лодкина И. Г., Николаева Н. С., Ермолаев М. Ю., Рязанцева М. О. Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы. // *Космические исследования*. – 2017. – Т. 55. – С. 189 – 200.

103. Bisi M. M., Breen A. R., Jackson B. V. et al. From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 Coronal Mass Ejection. // *Solar Physics*. – 2010. – V. 265. – P. 49 – 127.
104. Bisi M. M., A. Gonzalez-Esparza J., Jackson B. V. et al. Preface: Radio Heliophysics: Science and Forecasting. // *Solar Physics*. – 2015. – V. 290. – P. 2393 – 2396.
105. Iju T., Tokumaru M., Fujiki K. Kinematic Properties of Slow ICMEs and an Interpretation of a Modified Drag Equation for Fast and Moderate ICMEs. // *Solar Physics*. – 2014. – V. 289. – P. 2157 – 2175.
106. Johri A., Manoharan P. K. An Intense Flare–CME Event in 2015: Propagation and Interaction Effects Between the Sun and Earth’s Orbit. // *Solar Physics*. – 2016. – V. 291. – P. 1433 – 1446.
107. Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K., Yakobe A. Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz. // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – V. 105. – P. 10,435 – 10,454.
108. Harrison R. A. The nature of solar flares associated with coronal mass ejection. // *Astronomy and Astrophysics*. – 1995. – V. 304. – P. 585.
109. Веселовский А. В., Прохоров А. В. Статистические распределения и классификация рентгеновских вспышек по их длительности на Солнце. // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т. 2. – С. 186 – 192.
110. Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S. et al. Visibility of coronal mass ejections as a function of flare location and intensity. // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – V. 110. – A12S05.
111. Youssef M. On the relation between the CMEs and the solar flares. // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. – 2012. – V. 1. – P. 172 – 178.
112. St. Cyr O. C., Webb D. F. Activity associated with coronal mass ejections at solar minimum – SMM observations from 1984 – 1986. // *Solar Physics*. – 1991. – V. 136. – P. 379 – 394.

113. Dryer M. Comments on the Origins of Coronal Mass Ejections. // *Solar Physics*. – 1996. – V. 169. – P. 421 – 429.
114. Hundhausen A. J. Coronal Mass Ejections. // *The many faces of the Sun: A summary of the results from NASA's Solar Maximum Mission* / Eds. K. T. Strong et al. – N. Y.: Springer, 1999. – P. 143.
115. Harrison R. A. Coronal transients and their relation to solar flares. // *Advances in Space Research*. – 1991. – V. 11. – P. 25 – 36.
116. Michalek G. Two types of flare-associated coronal mass ejections. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2009. – V. 494. – P. 263 – 268.
117. Шугай Ю. С., Веселовский И. С., Персианцев И. Г. Исследование связи крупномасштабных процессов на Солнце и с развитием корональных выбросов масс и солнечных вспышек. // *Солнечно-земная физика*. – 2008. – Т. 1. – С. 105 – 106.
118. Richardson I. G., Cane H. V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 – 2009): Catalog and Summary of Properties. // *Solar Physics*. – 2010. – V. 264. – P. 189 – 237.
119. Cane H. V., Kahler S. W., Sheeley J. Interplanetary shocks preceded by solar filament eruptions. // *Journal of Geophysical Research*. – 1986. – V. 91. – P. 13,321 – 13,330.
120. Gopalswamy N., Lara A., Lepping R. P. et al. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections. // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – V. 27. – P. 145 – 148.
121. Richardson I. G. Identification of Interplanetary Coronal Mass Ejections at Ulysses Using Multiple Solar Wind Signatures. // *Solar Physics*. – 2014. – V. 289. – P. 3843 – 3894.
122. Witasse O., Sánchez-Cano B., Mays M. L. et al. Interplanetary coronal mass ejection observed at STEREO-A Mars, comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Saturn, and New Horizons en route to Pluto: Comparison of its Forbush decreases at 1.4, 3.1, and 9.9 AU. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – V. 122. – P. 7865 – 7890.

123. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Наблюдения выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. // *Астрономический журнал*. – 2015. – Т. 92. – С. 46 – 52.

124. Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. et al. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – V. 106. – P. 29,207 – 29,217.

125. Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W. D. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth. // *Annales Geophysicae*. – 2005. – V. 23. – P. 1033 – 1059.

126. Kim K.-H., Moon Y.-J., Cho K.-S. Prediction of the 1-AU arrival times of CME-associated interplanetary shocks: Evaluation of an empirical interplanetary shock propagation model. // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – V. 112. – A05104.

127. Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J. et al. An empirical model for prediction of geomagnetic storms using initially observed CME parameters at the Sun. // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – V. 115. – A12108.

128. Paouris E., Mavromichalaki H. Effective Acceleration Model for the Arrival Time of Interplanetary Shocks driven by Coronal Mass Ejections. // *Solar Physics*. – 2017. – V. 292. – P. 180.

129. Paouris E., Čalogović J., Dumbović M. et al. Propagating Conditions and the Time of ICME Arrival: A Comparison of the Effective Acceleration Model with ENLIL and DBEM Models. // *Solar Physics*. – 2021. – V. 296. – P. 12.

130. Manoharan P. K., Gopalswamy N., Yashiro S. et al. Influence of coronal mass ejection interaction on propagation of interplanetary shocks. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. – 2004. – V. 109. – A06109.

131. Núñez M., Nieves-Chinchilla T., Pulkkinen A. Prediction of shock arrival times from CME and flare data. // *Space Weather*. – 2016. – V. 14. – P. 544 – 562.

132. Odstrčil D. Modeling 3-D solar wind structure. // *Advances in Space Research*. – 2003. – V. 32. – P. 497 – 506.

133. Odstrčil D., Pizzo V. J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections in a structured solar wind flow 2. CME launched adjacent to the streamer belt. // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – V. 104. – P. 493 – 504.
134. Odstrčil D., Pizzo V. J., Arge C. N. Propagation of the 12 May 1997 interplanetary coronal mass ejection in evolving solar wind structures. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. – 2005. – V. 110. – A02106.
135. Shiota D., Kataoka R., Miyoshi Y., Hara T., Tao C., Masunaga K., Futaana Y., Terada N. Inner heliosphere MHD modeling system applicable to space weather forecasting for the other planets. // *Space Weather*. – 2014. – V. 12. – P. 187 – 204.
136. Shiota D., Kataoka R. Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME). // *Space Weather*. – 2016. – V. 14. – P. 56 – 75.
137. Singh T., Yalim M. S., Pogorelov N. V. et al. Simulating Solar Coronal Mass Ejections Constrained by Observations of Their Speed and Poloidal Flux. // *Astrophysical Journal Letters*. – 2019. – V. 875. – L17.
138. Singh T., Yalim M. S., Pogorelov N. V. et al. A Modified Spheromak Model Suitable for Coronal Mass Ejection Simulations. // *Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 894. – P. 49.
139. Pomoell J., Poedts S. EUHFORIA: European heliospheric forecasting information asset. // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2018. – V. 8. – A35.
140. Verbeke C., Pomoell J., Poedts S. The evolution of coronal mass ejections in the inner heliosphere: Implementing the spheromak model with EUHFORIA. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2019. – V. 627. – A111.
141. Waldmeier M. M-regions and solar activity. // *Vistas in Astronomy*. – 1956. – V. 2. – P. 808 – 813.
142. Maunder E. W. Demonstration of the Solar Origin of the Magnetic Disturbances. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1904. – V. 65. – P. 18 – 34.

143. Newkirk G., Gordon J. Structure of the Solar Corona. // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. – 1967. – V. 5. – P. 213 – 266.
144. Wilcox J. M. The Interplanetary Magnetic Field. Solar Origin and Terrestrial Effects. // *Space Science Reviews*. – 1968. – V. 8. – P. 258 – 328.
145. Owens M. J., Spence H. E., McGregor S. et al. Metrics for solar wind prediction models: Comparison of empirical, hybrid, and physics-based schemes with 8 years of L1 observations. // *Space Weather*. – 2008. – V. 6. – S08001.
146. Hinterreiter J., Magdalenic J., Temmer M. et al. Assessing the Performance of EUHFORIA Modeling the Background Solar Wind. // *Solar Physics*. – 2019. – V. 294. – P. 170.
147. Samara E., Pinto R. F., Magdalenic J. et al. Implementing the MULTI-VP coronal model in EUHFORIA: Test case results and comparisons with the WSA coronal model. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – V. 648. – A35.
148. Samara E., Magdalenic J., Rodriguez L. et al. Influence of coronal hole morphology on the solar wind speed at Earth. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2022. – V. 662. – A68.
149. Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А., Чернышова А.И. Наблюдения коротирующих потоков солнечного ветра на радиотелескопе БСА ФИАН в 2016 г. // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. – С. 407 – 417.
150. Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Коротирующие и распространяющиеся возмущения в солнечном ветре по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН в 2017 г. // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97. – С. 73 – 88.
151. Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Геоэффективные возмущения в солнечном ветре вблизи минимума солнечной активности по данным двухлетней серии наблюдений межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН. // *Астрономический журнал*. – 2021. Т. 98. – С. 949 – 968.
152. Субаев И.А., Тюльбашев С.А., Чашей И.В. Коротирующие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний на

радиотелескопе БСА ФИАН. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2021. – Т. 48. – № 6. – С. 50 – 56.

153. Jackson B. V., Yu H. S., Hick P. P. et al. A determination of the north–south heliospheric magnetic field component from inner corona closed-loop propagation. // *Astrophysical Journal Letters*. – 2015. – V. 803. – No 1. – L1.

154. Плазменная гелиогеофизика. / Под ред. Зеленого Л. М., Веселовского И. С. В 2 т. – М.: Физматлит, 2008. – 672 с.

155. Писанко Ю. В. Солнечный ветер. / М.: Москва, 2011. – 135 с.

156. Verscharen D., Klein K. G., Maruca B. A. The multi-scale nature of the solar wind. // *Living Reviews in Solar Physics*. – 2019. – V. 16. – Article 5. – P. 1 – 136.

157. Chen P. F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis. // *Living Review Solar Physics*. – 2011. – V. 8. – Article 1. – P. 1 – 92.

158. Webb D. F. Coronal Mass Ejections: Observations. // *Living Review Solar Physics*. – 2012. – V. 9. – Article 3. – P. 3 – 85.

159. Temmer M., Scolini C., Richardson I. G., et al. CME Propagation Through the Heliosphere: Status and Future of Observations and Model Development. // *Advances in Space Research*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.asr.2023.07.003.

160. Richardson I. G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. // *Living Review Solar Physics*. – 2018. – V. 15. – Article 1. – P. 1 – 95.

161. BSA Space Weather. – URL: <https://sw.vtyulb.ru/>. – Доступ: 17.01.2024.

162. Chandrasekhar S. A statistical basis for the theory of stellar scintillation. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1952. – V. 112. – P. 475.

163. Salpeter E. E. Interplanetary Scintillations. I. Theory. // *Astrophysical Journal*. – 1967. – V. 147. – P. 433.

164. Гочелашвили К. С., Шишов В. И. Волны в случайно-неоднородных средах. / М.: ВИНТИ, 1981. – 144 с.

165. Шишов В. И. К вопросу о флуктуациях амплитуды при распространении электромагнитных волн в средах со случайными характеристиками. // *Труды ФИАН*. – 1967. – Т. 38. – С. 171 – 176.

166. Шишов В. И. К теории распространения волн в случайных средах. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1968. – Т. 11. – С. 866 – 875.
167. Лукманов В. Р., Чашей И. В. Вариации радиальной зависимости уровня межпланетных мерцаний на фазе спада 24 цикла солнечной активности. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – С. 160 – 164.
168. Виткевич В. В., Илясов Ю. П., Кутузов С. М. и др. Антенно-аппаратурный комплекс БСА ФИАН. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1976. – Т. 19. – С. 1595 – 1606.
169. Пушинская Радиоастрономическая Обсерватория. – URL: <https://www.prao.ru/>. – Доступ: 17.01.2024.
170. Кутузов С. М. Азаренков Ю. И., Алексеев И. А и др. Перестройка радиотелескопа БСА ФИАН в диапазоне 109-113 МГц. // Труды ФИАН. – 2000. – Т. 229. – С. 3.
171. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности. // Астрономический журнал. – 2015. – Т. 92. – С. 38 – 45.
172. Артюх В. С. Исследование радиоизлучения галактик в метровом диапазоне волн методом межпланетных мерцаний. // Труды ФИАН. – 1988. – Т. 189. – С. 223 – 243.
173. Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Артюх В. С. И др. Коэффициент асимметрии межпланетных мерцаний радиоисточников. // Астрономический вестник. – 2005. – Т. 39. – № 3. – С. 1 – 6.
174. Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Субаев И. А., Китаева М. А. Исследование ярких компактных радиоисточников северной полусферы на частоте 111 МГц. // Астрономический журнал. – 2020. – Т. 97. – С. 378 – 398.
175. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – С. 1280 – 1283.

176. ISEE Solar Wind Parameters Data. – URL: <ftp://ftp.isee.nagoya-u.ac.jp/pub/vlist/>. – Доступ: 17.01.2024.
177. Manoharan P. K., Ananthkrishnan S. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1990. – V. 244. – P. 691 – 695.
178. Fanti C., Fanti R., Dallacasa D., McDonald A., Schilizzi R. T., Spencer R. E. Multi-frequency analysis of the two CSS quasars 3C 43 & 3C 298. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2002. – V. 396. – P. 801 – 813.
179. Wilcox Solar Observatory Source Surface Synoptic Charts. – URL: <http://wso.stanford.edu/synsource.html>. – Доступ: 17.01.2024.
180. Asai K., Kojima M., Tokumaru M., Yokobe A., Jackson B. V., Hick P. L., Manoharan P. K. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations: 3. Correlation between speed and electron density fluctuations in the solar wind. // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – V. 103. – P. 1991 – 2001.
181. Чашей И. В., Коджима М., Шимизу И. Уровень мелкомасштабных флуктуаций концентрации и скорость солнечного ветра. // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 2002. – Т. 42. – С. 7 – 16.
182. Jackson B. V., Tokumaru M., Fallows R. A. et al. Interplanetary scintillation (IPS) analyses during LOFAR campaign mode periods that include the first three Parker Solar Probe close passes of the Sun. // *Advances in Space Research*. – 2023. – V. 72. – P. 5341 – 5360.
183. Owens M. J., Lockwood M., Barnard L. A., et al. Annual Variations in the Near-Earth Solar Wind. // *Solar Physics*. – 2023. – V. 298. – Article 111. – 14P.
184. Шишов В. И., Чашей И. В., Орешко В. В. и др. Мониторинг турбулентного солнечного ветра на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН: первые результаты. // *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 93. – С. 1045 – 1060.
185. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. Выбросы корональной массы и магнитная буря 27 февраля 2023 года по наблюдениям межпланетных

мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – Т. 50. - № 7. – С. 3 – 12.

186. SolarSoft Latest Events Archive. – URL: https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html. – Доступ: 17.01.2024.

187. Лукманов В. Р., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. О возможности краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений на примере выброса корональной массы в ноябре 2021 г. // Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета. – 2022. - № 4. – 2240201. – С. 1 – 5.

188. Cargill P. J. On the Aerodynamic Drag Force Acting on Interplanetary Coronal Mass Ejections. // Solar Physics. – 2004. – V. 221. – P. 135 – 149.

189. Kp-indexes since 1932. – URL: https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt. – Доступ: 17.01.2024.

190. Bourouaine S., Perez J. C., Klein K. G. et al. Turbulence Characteristics of Switchback and Nonswitchback Intervals Observed by Parker Solar Probe. // Astrophysical Journal Letters. – 2020. – V. 904. – No 2. – L30.

191. Computer Aided CME Tracking. – URL: <https://www.sidc.be/cactus/>. – Доступ 17.01.2024.

192. 92-sec Key Parameter Plasma Data from Wind/SWE. – URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_swe_kp.html. – Доступ: 17.01.2024.

193. Wexler D. B., Manchester W. B., Jian L. K., et al. Investigating a Solar Wind Stream Interaction Region using Interplanetary Spacecraft Radio Signals: A Magnetohydrodynamic Simulation Study. // The Astrophysical Journal. – 2023. – V. 955. – Article 90. – P. 1 – 13.

Список использованных сокращений

БСА – Большая Синфазная Антенна (радиотелескоп в Пушинской Радиоастрономической Обсерватории).

ФИАН – Физический институт им. Лебедева Российской Академии Наук.

ACE – Advanced Composition Explorer (спутник NASA, запущенный в рамках программы исследования Солнца и космического пространства «Эксплорер»).

CIR – corotating interaction region (коротирующая область взаимодействия, коротирующая структура, долгоживущая, приходящая на Землю каждые 27 суток).

CME – coronal mass ejection (корональный выброс массы).

Dst – Disturbance storm time index (индекс, характеризующий интенсивность возмущений геомагнитного поля).

ENLIL – трехмерная магнитогидродинамическая модель гелиосферы.

EUNFORIA – European Heliospheric FORecasting Information Asset (Европейский информационный центр по прогнозированию гелиосферы).

ISEE – Institute for Space-Earth Environmental Research (Институт исследования околоземного космического пространства).

K_p – квазилогарифмический планетарный индекс (индекс, характеризующий интенсивность возмущений геомагнитного поля).

LOFAR – Low Frequency Array (низко-частотная антенная решетка, разработанная и построенная нидерландским институтом ASTRON).

MSFLUKSS – Multi-Scale Fluid-Kinetic Simulation Suite (Набор программ для многомасштабного моделирования кинетики жидкости).

MWA – Murchison Widefield Array (Широкополосный массив Мерчисона).

SIR – stream interaction region (коротирующая область взаимодействия, живущая менее одного периода вращения Солнца).

SUSANOO – Space-weather-forecast-Usable System Anchored by Numerical Operations and Observations (Система прогнозирования космической погоды, основанная на численных операциях и наблюдениях).

UT – Universal time (всемирное время).

WIND – космический аппарат, запущенный в рамках международной Глобальной геокосмической программы (GGS от англ. Global Geospace Science Program), предназначенный для изучения солнечного ветра

WSA – Wang-Sheeley-Arge (модель Ванг-Шили-Ардж).

Список таблиц

Таблица 1. Дополнительная информация, не включенная в рис. 6 – 7. Показаны среднегодовые значения оценок скорости солнечного ветра, их среднеквадратичное отклонение (RMS) для источников 3C48 и 3C298 в км/с и также включено количество точек для каждого источника за каждый год. Результат диссертанта из работы [42].....	45
Таблица 2. Результаты численного анализа зависимости индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Результат диссертанта из работы [175].	56
Таблица 3. Информация о рентгеновских вспышках на Солнце, ассоциированных с ними магнитных бурях на Земле и результатах модельных расчетов времени прихода выбросов к Земле. Результат диссертанта из работы [49].	72

Список иллюстраций

- Рис. 1. Запись мерцающего радиоисточника 3C48 на радиотелескопе БСА ФИАН от 27 мая 2014 г. По горизонтальной оси время, по вертикальной – плотность потока приходящего сигнала. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом. 28
- Рис. 2. Схема наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточника (в случае изотропной межпланетной среды) [44]. Ось Z направлена на наблюдаемый радиоисточник..... 29
- Рис. 3. Радиотелескоп БСА ФИАН [169]. 33
- Рис. 4. Сигнал от мерцающего радиоисточника 3C48. По горизонтальной оси время, по вертикальной – плотность потока приходящего сигнала. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом. 35
- Рис. 5. Пример обработки данных. Верхняя панель – исходная запись источника 3C48, t_{theor} и t_{real} – прямые восхождения, соответственно, теоретическое, вычисленное по координатам источника, и реальное, полученное методом максимальной свертки. Вкладка в верхней панели показывает 2048 точек в центральной части записи, которые использовались для построения спектра мерцаний. Нижняя панель – наблюдаемый спектр мерцаний источника 3C48 (синий) и вписанный в него теоретический спектр (оранжевый). Результат диссертанта из работы [42]. 38
- Рис. 6. Сравнение оценок скоростей солнечного ветра по наблюдениям на БСА ФИАН в ПРАО и в ISEE (Университет Нагойя в Японии) источников: а) 3C48, б) 3C298. По оси абсцисс оценка скорости по наблюдениям на БСА ФИАН, по оси ординат – в ISEE. Цвет за каждый год наблюдений показан в панели справа. Нанесена теоретическая прямая $y = x$. Результат диссертанта из работы [42]. 43
- Рис. 7. Сравнение среднегодовых оценок скоростей солнечного ветра по наблюдениям на БСА ФИАН в ПРАО и в ISEE (Университет Нагойя в

Японии). Аналогично рис. 6, кружочки – для источника 3C48, треугольники – для 3C298. Результат диссертанта из работы [42]..... 44

Рис. 8. Зависимость разницы оценок скоростей солнечного ветра ($V_1 - V_3$) от верхнего предела интегрирования по координате в формуле (3) для временного спектра мерцаний z_{max} . Результат диссертанта из работы [42]..... 47

Рис. 9. Теоретические временные спектры мерцаний с учетом плотного слоя вблизи Земли (оранжевая линия) в сравнении со сферически-симметричным случаем (синяя линия) для источника: а) 3C48, б) 3C298. Результат диссертанта из работы [42]..... 48

Рис. 10. Измеренная радиальная зависимость индекса мерцаний в логарифмическом масштабе по данным наблюдений источника 3C48 в 2015 – 2019 гг. Оранжевым показана вписанная методом наименьших квадратов прямая. Желтым показана теоретическая радиальная зависимость индекса мерцаний, рассчитанного по формуле (2), для случая сферически-симметричной межпланетной среды, зеленым – для случая наличия приэкваториального токового слоя. Информация вверху: источник 0134+329 (или 3C48) (год наблюдений), наклон вписанной прямой, полутолщина приэкваториального плотного токового слоя. Результат диссертанта из работы [167]. 51

Рис. 11. Зависимость гелиошироты источника от его элонгации на фазе сближения с Солнцем (синяя линия) и на фазе удаления от него (оранжевая линия). Результат диссертанта из работы [167]..... 53

Рис. 12. Синоптические карты распределения радиальной составляющей магнитного поля на поверхности источника на гелиоцентрическом расстоянии 2,5 радиуса Солнца по данным лаборатории Вилкокса [179]: в левой панели для кэррингтоновских оборотов 2161 в 2015 г. и 2177 в 2016 г., в правой панели – 2201 в 2018 г. и 2218 в 2019 г..... 54

Рис. 13. Измеренные значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра по наблюдениям источника 3C48 за 2015 – 2019 гг. Результат диссертанта из работы [175]..... 55

- Рис. 14. Среднегодовые значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра в логарифмическом масштабе со вписанной прямой. Вверху приведены наклон вписанной прямой и коэффициент корреляции. Результат диссертанта из работы [175]. 57
- Рис. 15. Схема моделирования СМЕ (затемненная область). Результат диссертанта из работы [49]. 62
- Рис. 16. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 24 апреля 2021 г. Магнитная буря произошла 25 апреля 2021 г. Результат диссертанта из работы [49]. 66
- Рис. 17. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 11 мая 2021 г. Магнитная буря произошла 12 мая 2021 г. Результат диссертанта из работы [49]. 67
- Рис. 18. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 25 мая 2021 г. Магнитная буря произошла 26 мая 2021 г. Результат диссертанта из работы [49]. 67
- Рис. 19. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 11 октября 2021 г. Магнитная буря произошла 12 октября 2021 г. Результат диссертанта из работы [49]. 68
- Рис. 20. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 3 ноября 2021 г. Магнитная буря произошла 4 ноября 2021 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49]. 68
- Рис. 21. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 18 января 2022 г. Магнитная буря произошла 19 января 2022 г. Результат диссертанта из работы [49]. 69
- Рис. 22. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 29 апреля 2022 г. Магнитная буря произошла 30 апреля 2022 г. Результат диссертанта из работы [49]. 69
- Рис. 23. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 7 июля 2022 г. Магнитная буря

произошла 8 июля 2022 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49]. 70

Рис. 24. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 16 августа 2022 г. Магнитная буря произошла 17 августа 2022 г. Результат диссертанта из работы [49]. 70

Рис. 25. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 2 сентября 2022 г. Магнитная буря произошла 3 сентября 2022 г. Результат диссертанта из работы [49]. 71

Рис. 26. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 2 октября 2022 г. Магнитная буря произошла 3 октября 2022 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [49]. 71

Рис. 27. Динамические карты индексов мерцаний за 26 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М3.7. Результат диссертанта из работы [185]. 76

Рис. 28. Динамические карты индексов мерцаний за 27 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М3.7. Результат диссертанта из работы [185]. 77

Рис. 29. Динамические карты индексов мерцаний за 28 февраля 2023 г.: верхняя панель – по данным наблюдений, средняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М1.1, нижняя панель – модельная карта для СМЕ после вспышки М3.7. Результат диссертанта из работы [185]. 78

Рис. 30. Схематическое изображение модели ведущей части CIR/SIR (затемненная область). Результат диссертанта из работы [50]. 82

Рис. 31. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 7 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по

всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта.
 Результат диссертанта из работы [50]..... 86

Рис. 32. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 8 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта.
 Результат диссертанта из работы [50]..... 87

Рис. 33. Событие с CIR 8 января 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 9 января 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта.
 Результат диссертанта из работы [50]..... 88

Рис. 34. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 5 по 11 января 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 8 января 2022 г. 89

Рис. 35. Событие с CIR 7 декабря 2022 г. Динамические карты индексов мерцаний за 7 декабря 2022 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта.
 Результат диссертанта из работы [50]..... 90

Рис. 36. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 4 по 10 декабря 2022 г., содержащем рассматриваемое событие 7 декабря 2022 г..... 91

Рис. 37. Событие с CIR 15 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 15 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта.
 Результат диссертанта из работы [50]..... 92

Рис. 38. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 12 по 19 марта 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 15 марта 2023 г.93

Рис. 39. Событие с SIR 23 – 24 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 23 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].94

Рис. 40. Событие с SIR 23 – 24 марта 2023 г. Динамические карты индексов мерцаний за 24 марта 2023 г.: верхняя панель – карта по данным наблюдений, средняя панель – график динамических индексов мерцаний, усредненных по всем склонениям и часовым интервалам, нижняя панель – модельная карта. Результат диссертанта из работы [50].95

Рис. 41. Графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND [192] на недельном интервале с 20 по 27 марта 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 23 – 24 марта 2023 г.96