

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Филиале «Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Научный руководитель: **Чашей Игорь Владимирович,**
доктор физико-математических наук,
Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН, Московская область, Пушкино,
Зам. директора по научным вопросам

Научный консультант: **Тюльбашев Сергей Анатольевич,**
доктор физико-математических наук,
Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН, Московская область, Пушкино,
Зав. отделом плазменной астрофизики

Официальные оппоненты: **Ермолаев Юрий Иванович,**
доктор физико-математических наук,
Институт космических исследований РАН, г. Москва,
Зав. лабораторией солнечного ветра

Писанко Юрий Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова,
Росгидромет, г. Москва,
Зав. отделом геоэффективных излучений в атмосфере и в космосе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук

Защита состоится «24» апреля 2024 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН <https://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «20» февраля 2024 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 24.1.262.02
кандидат физико-математических наук

Н.Н. Шахворостова

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 (Большая Синфазная Антенна Физического института Академии наук) 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 (Institute for Space-Earth Environmental Research) 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 (coronal mass ejection) и методика оценки времени прихода CME к Земле путем сравнения наблюдательных двумерных динамических карт индексов мерцаний с соответствующими картами на основании разработанной модели CME.

Разработана простая кинематическая модель ведущей части распространяющихся возмущений солнечного ветра типа CIR (corotating interaction region). 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 [1, 2], 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 СМЕ 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 СМЕ 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 [3], на котором в пробном режиме выполняется краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений на основе данных радиотелескопа БСА ФИАН с использованием упрощенных моделей распространения СМЕ и CIR в межпланетном пространстве.

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 усреднениях 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 СМЕ 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. Короткие 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 3C48 и 3C298 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. Короткие 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).

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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 **разделе 2.1** проводилось сравнение полученных диссертантом оценок скорости солнечного ветра по однопунктовым наблюдениям двух сильно мерцающих источников ЗС48 и ЗС298 на радиотелескопе БСА ФИАН на элонгациях $25^\circ - 60^\circ$ по методике, описанной в работе [1], с соответствующими оценками, полученными по трехпунктовым наблюдениям ISEE в Университете Нагойя в Японии по методике, описанной в работе [4]. На рис. 1 показан результат сравнения оценок, усредненных на годовых интервалах, для каждого источника, за 6 лет наблюдений с 2014 по 2019 гг. Каждому цвету точки соответствует свой год наблюдений, указанный в легенде. Также нанесена теоретическая прямая $y = x$: в идеальном случае оценки скорости солнечного ветра, полученные двумя способами, должны совпадать. Для компактного источника ЗС48 среднегодовые оценки скорости солнечного ветра, полученные обоими методами, 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. [5].

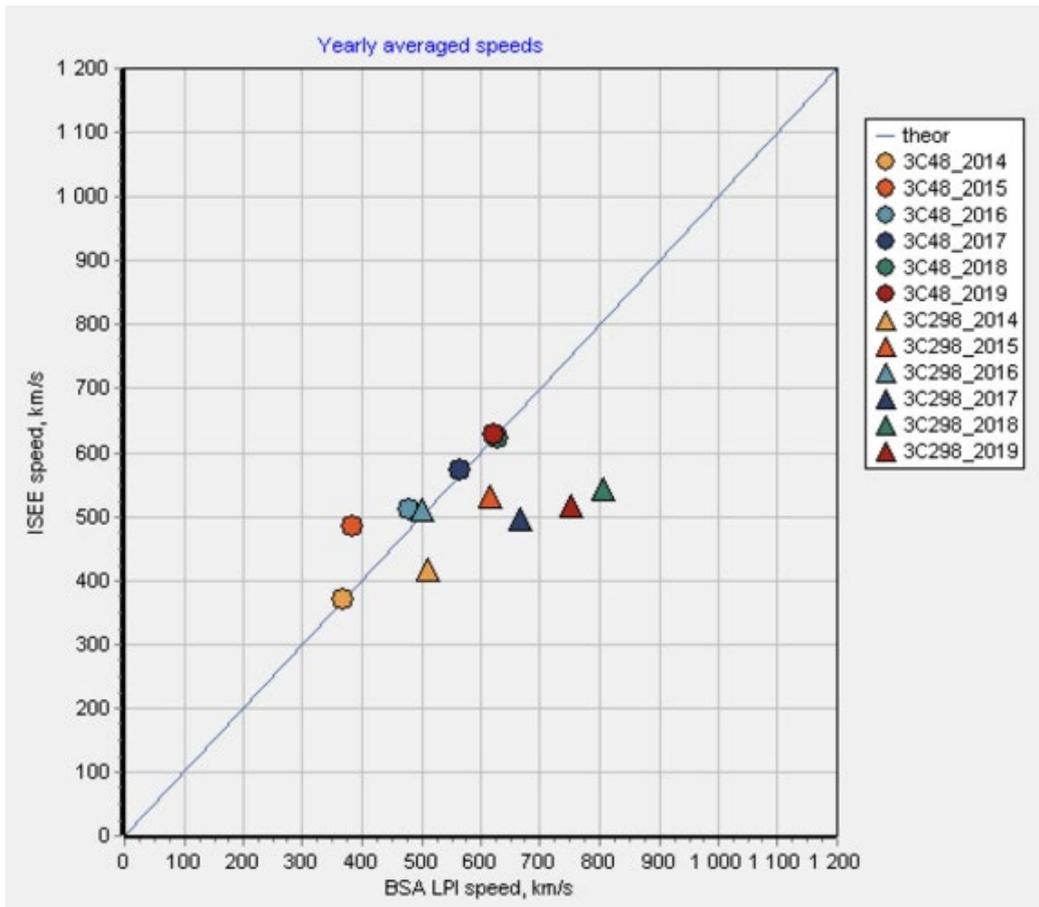


Рис. 1. Сравнение среднегодовых оценок скорости солнечного ветра по наблюдениям на БСА ФИАН и в ISEE Университета Нагойя в Японии. По оси абсцисс оценка скорости по наблюдениям на БСА ФИАН, по оси ординат – в ISEE. Кружочки соответствуют данным по наблюдениям источника 3C48, треугольники – 3C298. Цвет за каждый год наблюдений показан в панели справа. Нанесена теоретическая прямая $y = x$. Результат диссертанта из работы [1].

Для протяженного источника 3C298 среднегодовые однопунктовые оценки скорости солнечного ветра превышают трехпунктовые, за исключением 2016 г. Было исследовано влияние анизотропии межпланетной плазмы, близлежащих плотных слоев вблизи Земли на оценки скорости солнечного ветра, а также анизотропия протяженного источника. Указанные факторы на оценки скорости солнечного ветра для протяженного источника влияют в большей степени, нежели на оценки для компактного источника. Понятия «компактный» и «протяженный» радиоисточник следует разделять по угловому размеру Френеля [1]:

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

где k – волновое число, ε – элонгация источника. Если угловой размер радиоисточника меньше углового размера Френеля, то такой источник компактный, если больше – то протяженный.

Описанную в диссертации методику оценки скорости солнечного ветра следует использовать по наблюдениям компактных источников. В случае протяженных источников следует уточнять модель межпланетной среды, учитывать влияние близлежащих к Земле слоев, а также анизотропию самого источника.

На рис. 1 также 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 [6] по данным измерений на космическом аппарате Ulysses, а также по многолетним наблюдениям межпланетных мерцаний [4, 7].

В *разделе 2.2* исследовалась радиальная зависимость индекса мерцаний по наблюдениям компактного источника 3C48 в 2015 – 2019 гг., сделан вывод о наличии приэкваториального токового слоя с повышенной концентрацией плазмы.

Индекс мерцаний выражается формулой:

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

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

На рис. 2 представлены зависимости индекса мерцаний от расстояния от Солнца (синуса элонгации) за каждый год наблюдений в логарифмическом масштабе. Предполагается степенная зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца, поэтому в экспериментальные точки в логарифмическом масштабе вписывалась аппроксимирующая прямая методом наименьших квадратов

(оранжевая линия). Для теоретической зависимости (желтая линия) индекс мерцаний вычислялся по формуле, справедливой для режима слабых мерцаний [8, 9]:

$$m^2 = 2\pi \int_{-1AU \cos \varepsilon}^{+\infty} C(r) dZ \int_0^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2 \left(\frac{q^2 Z'}{2k} \right) F^2(q) q dq, \quad (3)$$

где $C \sim n_e^2(r) \sim \frac{1}{r^4}$ – структурная константа, $n_e^2(r) \sim \frac{1}{r^2}$ – электронная плотность межпланетной плазмы в предположении изотропности среды, r – расстояние от центра Солнца (гелиоцентрическое расстояние);

$\Phi_e(q)$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы, предполагается степенным $\Phi_e(q) \sim q^{-n}$, индекс турбулентности $n = 3,6$ в соответствии с данными в работе [8];

$\sin^2 \left(\frac{q^2 Z'}{2k} \right)$ – фильтр Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, длина волна $\lambda = 2,7$ м (при частоте наблюдения на БСА ФИАН 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, предполагалось гауссовским: $I(\theta) = \exp \left(-\frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right)$, тогда $F(q) \sim \exp \left(-\frac{1}{4} \theta_0^2 Z'^2 q^2 \right)$, θ_0 – радиус источника по уровню $\frac{1}{e}$;

$Z' = Z + 1AU \cos \varepsilon$ – расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя.

На рис. 2 углы наклона теоретической и вписанной зависимостей не совпадают. Причиной уплощения может быть наличие токового слоя с повышенной концентрацией плазмы вблизи солнечного экватора. Для объяснения наблюдаемой радиальной зависимости предполагалось, что электронная плотность внутри токового слоя в два раза выше, чем в случае сферически-симметричной модели среды. Теоретическая зависимость, посчитанная по формуле (3), с учетом наличия токового слоя, на рис. 2 показана зеленой линией.

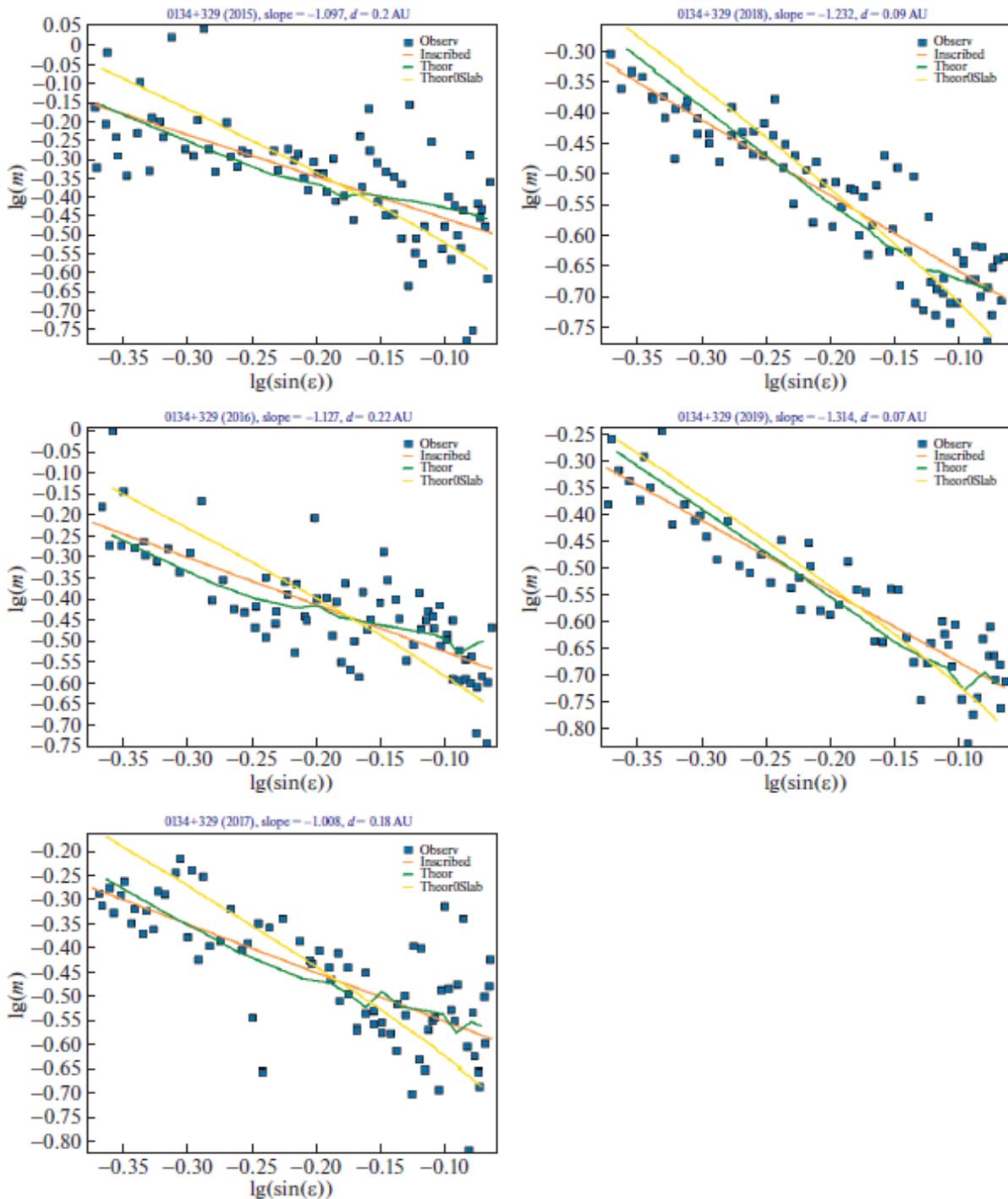


Рис. 2. Измеренная радиальная зависимость индекса мерцаний в логарифмическом масштабе по данным наблюдений источника ЗС48 в 2015 – 2019 гг. Оранжевым показана вписанная по методу наименьших квадратов прямая. Желтым показана теоретическая радиальная зависимость индекса мерцаний, рассчитанного по формуле (3) для случая сферически-симметричной межпланетной среды, зеленым – теоретическая зависимость для случая наличия приэкваториального токового слоя. Информация сверху: источник 0134+329 (ЗС48) (год наблюдений), наклон вписанной прямой, полутолщина приэкваториального плотного токового слоя. Результат диссертанта из работы [9].

Толщина слоя определялась методом наименьших квадратов таким образом, чтобы зависимость лучше всего вписывалась в экспериментальные точки. 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.

На рис. 2 видно, что зеленая линия вписывается в экспериментальные точки лучше, чем желтая линия, отражающая зависимость в случае изотропной межпланетной среды, что обосновывает наличие плотного приэкваториального токового слоя. На фазе спада солнечной активности в 2015 – 2017 гг. полутолщина слоя составила $d \approx 0,2$ а.е., вблизи минимума в 2018 – 2019 гг. – $d \approx 0,1$ а.е. Причиной утончения приэкваториального токового слоя, по-видимому, является взаимодействие межпланетной плазмы с корональными магнитными полями в области сформировавшегося течения плазмы.

В *разделе 2.3* рассматривалась зависимость индекса мерцаний и скорости солнечного ветра по данным наблюдений источника 3С48 за 2015 – 2019 гг., был сделан вывод о пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению при усреднении величин индекса мерцаний и скорости солнечного ветра на годовых интервалах.

В полученных данных по оценкам индексов мерцаний и скоростей солнечного ветра отсутствует ярко выраженная зависимость. Коэффициент корреляции по всем данным с 2015 по 2019 гг. составил -0,15, что указывает на убывающую, но слабую зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра.

Также рассматривались оценки величин, усредненных на годовых интервалах. На рис. 3 они показаны в логарифмическом масштабе со вписанной в них методом наименьших квадратов прямой. По оси абсцисс отложена скорость солнечного ветра, по оси ординат – индекс мерцаний. Каждому году соответствует цвет точки в панели справа. В верхней части рисунка дана информация по коэффициенту наклона логарифмической прямой и коэффициенту корреляции по среднегодовым оценкам величин.

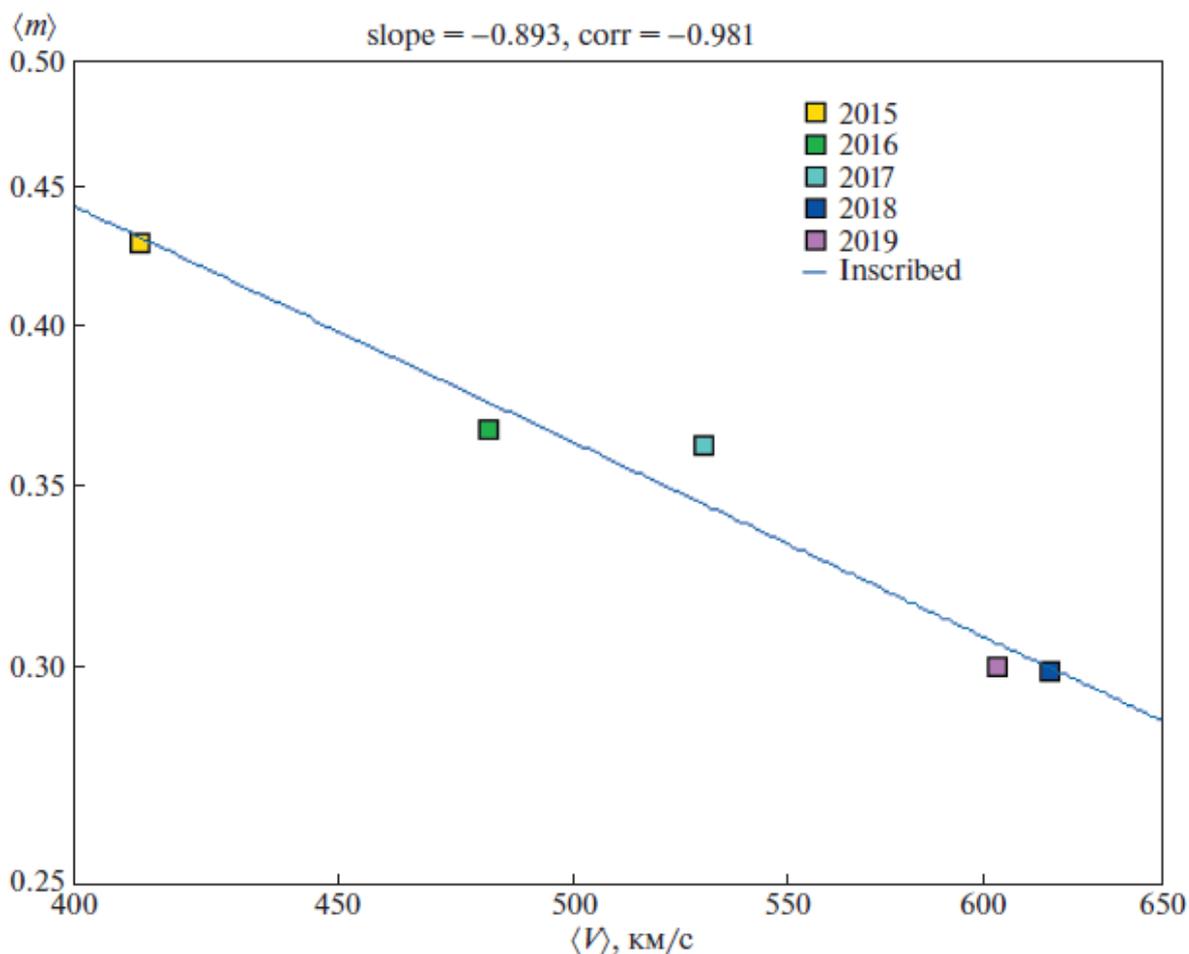


Рис. 3. Среднегодовые значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра в логарифмическом масштабе со вписанной прямой. Вверху приведены наклон вписанной прямой и коэффициент корреляции. Результат диссертанта из работы [10].

На рис. 3 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 составил $-0,893$. 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 обратную пропорциональную зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра. Такая зависимость может рассматриваться как косвенное подтверждение пропорциональности флуктуаций электронной плотности, ответственных за мерцания, среднему

значению 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 [6]. Указанный результат получен по наблюдениям одиночного радиоисточника при усреднении на годичных интервалах. Для исследования глобальной структуры межпланетной плазмы на более коротких интервалах необходимы наблюдения множества радиоисточников.

В *разделе 2.4* сформулированы выводы по главе 2.

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 *разделе 3.1* описана модель распространения СМЕ. СМЕ моделировалось 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. 4). 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). Концентрация плазмы внутри выброса, как и вне его, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Параметрами используемой модели являются: толщина выброса L , угол раскрытия θ , направление распространения выброса \vec{n} (см. рис. 4), скорость распространения выброса v , коэффициент увеличения концентрации частиц внутри выброса N , начальное положение СМЕ, время начала распространения.

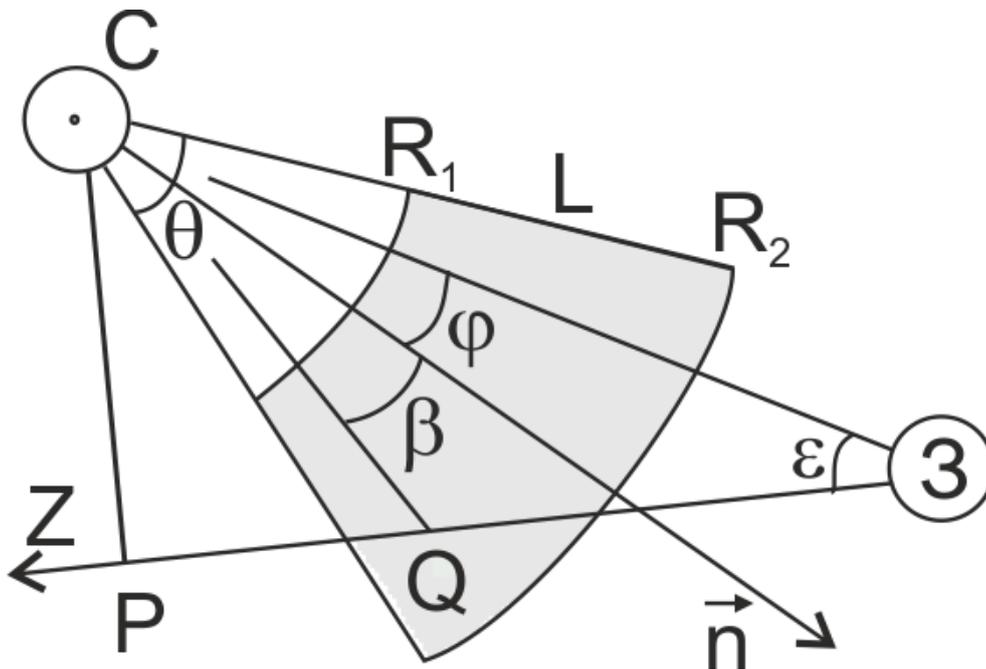


Рис. 4. Схема моделирования СМЕ (затемненная область). Результат диссертанта из работы [11].

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 ($\phi = 0$, СМЕ типа гало).

Индекс мерцаний в рамках модели вычислялся по формуле (3) в предположении сферически-симметричной межпланетной среды за исключением распространяющегося возмущения СМЕ, внутри которого электронная плотность предполагалась в фиксированное количество N раз выше, чем в сферически-симметричном случае, а источники полагались точечными ($F(q) \equiv 1$).

В *разделе 3.2* рассматривались 11 событий магнитных бурь, которые произошли после сильных и длительных вспышек, с апреля 2021 г. по октябрь 2022 г. Для каждого из событий проводилась оценка времени прихода возмущения к Земле, которая 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 [12] подбирались солнечная вспышка ассоциированная с СМЕ в пределах от 1 до 3 суток до момента начала магнитной бури и скорость распространения возмущения 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 времени подобранной вспышки (которое определялось как время пика мощности данной вспышки) и подобранной скорости распространения возмущения после этой вспышки оценивалось время прихода возмущения к Земле.

Для построения наблюдательных карт вся наблюдаемая область неба, содержащая несколько тысяч мерцающих источников, разбивалась на маленькие области размером $3^\circ \times 3^\circ$, каждая из которых содержит до 10 мерцающих источников. В каждой из этих областей усреднялись значения индексов мерцаний, посчитанных по формуле (2), для всех источников этой области. Сравнивались динамические карты индексов мерцаний наблюдательная и модельная для дней, предшествовавших магнитной буре, в каждом из 11 случаев. На рис. 5 показан пример сравнения наблюдательной (верхняя панель) и модельной (нижняя панель) карт. По горизонтальной оси отмечено универсальное время (UT) с 20 ч. дня, предшествовавшего рассматриваемому, до 20 ч. рассматриваемого дня, по вертикальной оси – склонения 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 картах мерцаний показывают гелиоцентрическое расстояние прицельной точки (ближайшей к Солнцу точки 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, именно для слабых мерцаний верна формула (3). При построении

модельных карт считалось, что значение индекса мерцаний не превышает максимально наблюдаемого значения 0,6 (если полученное по формуле (3) значение получалось больше, то оно заменялось на 0,6). 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 ($t_{0.0}$); время UT, когда СМЕ достигает границы зон сильных и слабых мерцаний ($t_{0.4}$); время UT, когда СМЕ достигает орбиты Земли ($t_{1.0}$); угол ϕ – угол между осью выброса и направлением от Солнца к Земле (см. рис. 4).

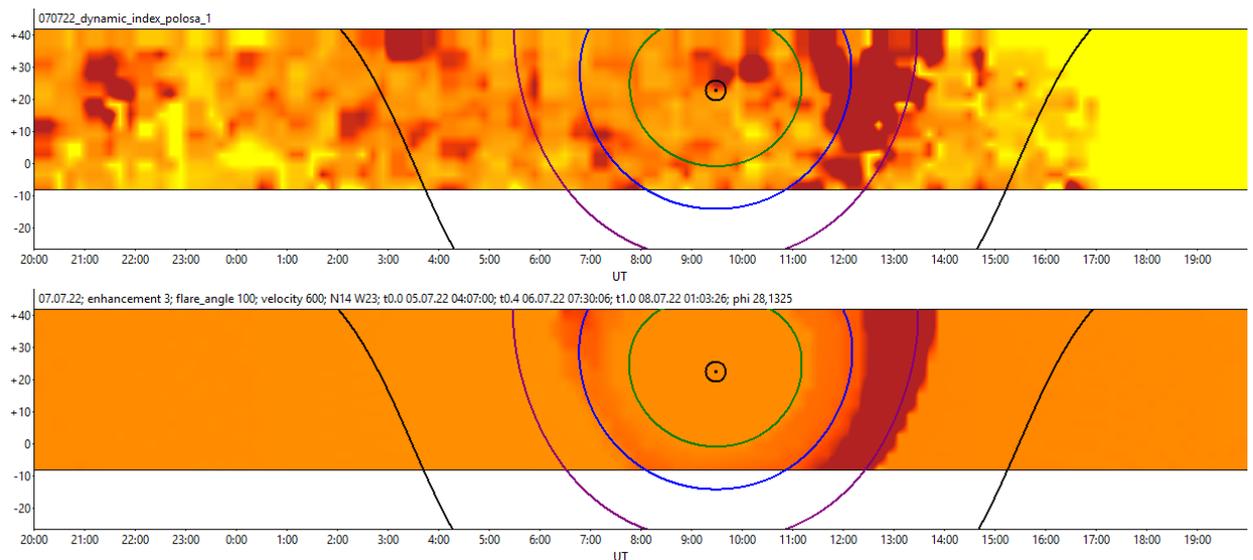


Рис. 5. Наблюдательная (верхняя панель) и модельная (нижняя панель) динамические карты индексов мерцаний за 7 июля 2022 г. Магнитная буря произошла 8 июля 2022 г. (по московскому времени). Результат диссертанта из работы [11].

На рис. 5 приведены для примера карты для события 8 июля 2022 г., усиление мерцаний начало наблюдаться за 14 ч. до начала магнитной бури, была подобрана вспышка C9.8, произошедшая 5 июля 2022 г. в 4:07 UT. Скорость распространения СМЕ была подобрана 600 км/с. Оценочное время прихода возмущения к Земле с такой скоростью после вспышки C9.8 – 8 июля 2022 г. в 1:04 UT. Реально магнитная

буря началась чуть раньше: 7 июля в период с 21:00 до 24:00 UT. В среднем по всем 11 событиям магнитная буря начиналась через 3,6 ч. после предсказанного времени. Усиление мерцаний во всех 11 событиях началось до прихода возмущения к Земле, что обосновывает возможность краткосрочного прогноза прихода возмущений к Земле путем анализа двумерных динамических карт индексов мерцаний. Среднее время между началом усиления мерцаний и началом магнитной бури составило 20,1 ч. Однако прогноз космической погоды не всегда возможен и точен по нескольким причинам: 1) неизвестна точная модель среды; 2) неизвестна точная модель возмущения; 3) модель рассматривает только распространение одиночного выброса, пренебрегая остальными; 4) необнаружение возмущения из-за высокой скорости его распространения и ограниченности возможностей наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН; 5) внутренние помехи радиотелескопа. Из 11 событий было выделено 4 события, когда погрешность оценки времени прихода возмущения к Земле оказалась слишком большой, роль подобранных вспышек в этих случаях неочевидна, возможно наложение других возмущений. Без учета этих 4 случаев магнитная буря начиналась в среднем через 0,8 ч. после предсказанного времени и через 15,6 ч. после начала усиления мерцаний.

Таким образом, в случае распространения одиночного выброса в межпланетной плазме описанная простая «унифицированная» модель дает достаточно точный прогноз прихода СМЕ к Земле. Чуть более поздний приход возмущения к Земле вызван замедлением распространения возмущения, обусловленным, по-видимому, явлением нагребания фоновой плазмы, известный как drag force [13], не учитывавшимся в модели.

В *разделе 3.3* рассмотрен случай сильной магнитной бури G3, продолжавшейся 33 ч., с 26 февраля 2023 г. 18:00 UT до 28 февраля 3:00 UT. Перед бурей произошла серия вспышек: 24 февраля произошли вспышки M1.1 длительностью около 10 мин. в активной области 3235 и M3.7 длительностью около 1,5 ч. в активной области 3229; 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. Проводилось сравнение наблюдательных и модельных карт за 26 – 28 февраля для СМЕ после каждой из вспышек, произошедших 24 февраля. Модельная карта за 26 февраля для СМЕ после М3.7 лучше согласуется с наблюдательной, чем модельная для СМЕ после М1.1. Это говорит о том, что, по-видимому, выброс именно после вспышки М3.7 был ответственным за магнитную бурю. Согласно каталогу Cactus [14], вспышка М1.1 не сопровождалась СМЕ, что подтверждает правильность предположения о причастности выброса после М3.7 к данной магнитной буре. В случае с М3.7 погрешность оценки времени прихода СМЕ к Земле составила менее 0,5 ч. При прогнозе космической погоды наблюдаемое усиление мерцаний стоит связывать с более мощными и длительными вспышками.

Анализом карт за 27 и 28 февраля установлено, что скорее всего, после вспышки М6.3, произошедшей 25 февраля, через сутки после М3.7 в той же активной области, произошел еще один выброс, который поддержал начавшуюся магнитную бурю, так как на наблюдательной карте за 27 февраля отсутствует ослабление мерцаний (возвращение их к нормальному режиму в связи с уходом СМЕ) в пределах орбиты Земли, наблюдавшийся на модельных картах. Модель рассматривает только распространение одиночных выбросов.

В *разделе 3.4* сформулированы выводы по главе 3.

В **четвертой главе** описана модель ведущей части крупномасштабных возмущений типа CIR/SIR (stream interaction region) 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 *разделе 4.1* описана модель ведущей части CIR/SIR, которая моделировалась 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. 6), 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 в обзоре [15]. На рис. 6 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.

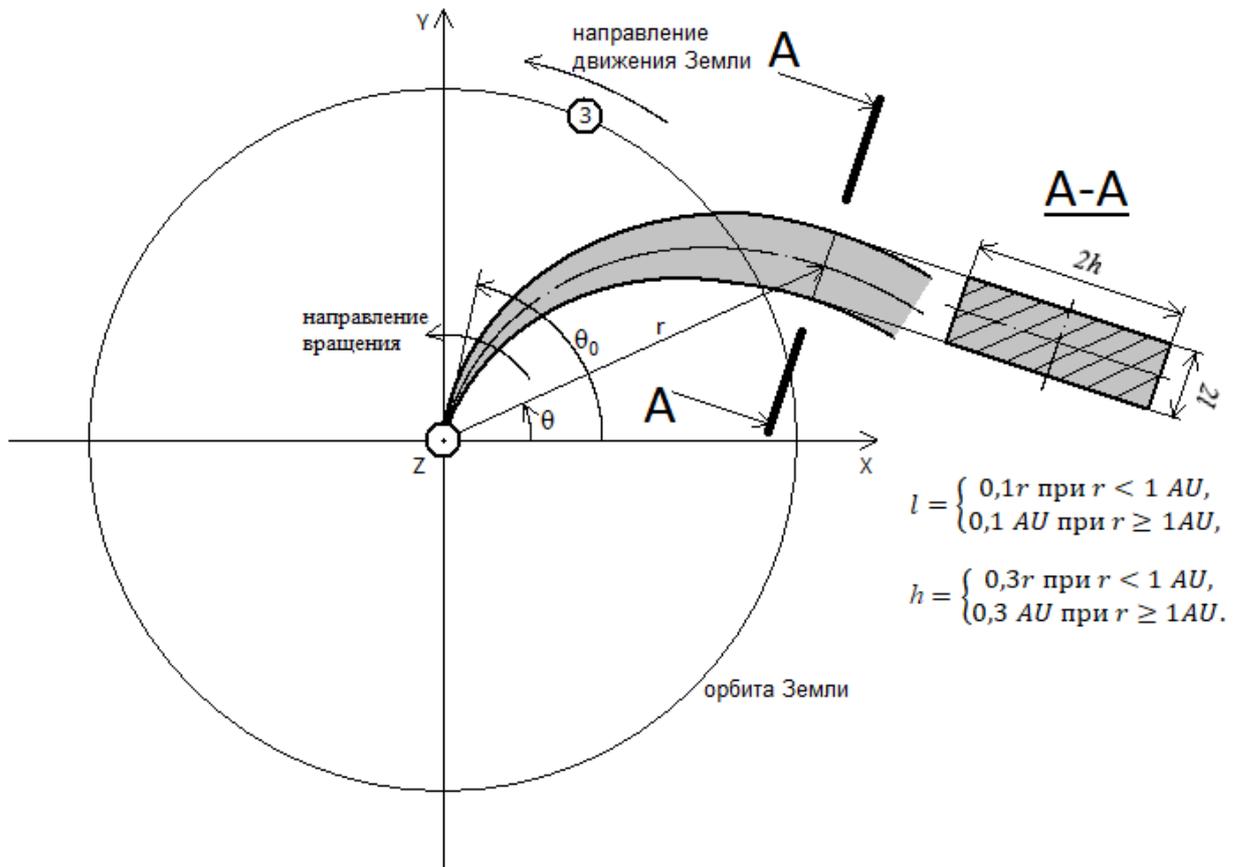


Рис. 6. Схематическое изображение модели ведущей части CIR/SIR (затемненная область). Результат диссертанта из работы [16].

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/SIR плоскостью нормальной к оси CIR/SIR в каждой точке предполагалось в рамках данной модели прямоугольником, размеры которого пропорциональны гелиоцентрическому расстоянию точки пересечения плоскости сечения и оси CIR/SIR, 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. 6 схематически показана геометрия используемой модели, область ведущей части CIR/SIR с повышенной концентрацией плазмы показана серым цветом. Как и в случае с CME, индекс мерцаний для модельных карт считался по формуле (3) с предположением, что внутри ведущей части CIR/SIR электронная плотность в $N = 3$ раза выше, чем в изотропной межпланетной среде, и источники полагались точечными ($F(q) \equiv 1$).

В *разделе 4.2* рассматривались 4 события, связанных с CIR/SIR, произошедших в 2022 – 2023 гг., два из которых являлись простыми (одногогорбыми по графикам концентрации протонов по данным WIND (космический аппарат, запущенный в рамках международной Глобальной геокосмической программы, предназначенный для изучения солнечного ветра) [17]), и два сложными (двугорбыми). Для каждого случая сравнивались наблюдательные и модельные карты на недельных интервалах, содержащих указанные события. Как в случае простых, так и в случае более сложных событий наблюдательные и модельные карты соотносятся на качественном уровне. В отдельные дни соответствие модельных и наблюдательных карт не является полным по аналогичным причинам, как и в случае с CME: 1) недостаточно точная модель межпланетной среды; 2) модель CIR/SIR в реальности является более сложной, поэтому не стоит ожидать детального соответствия модельных и наблюдательных карт; 3) наложение других крупномасштабных возмущений межпланетной плазмы. Однако даже такая упрощенная 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, 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. Данные признаки могут использоваться для краткосрочного прогноза прихода CIR/SIR к Земле вместе с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до их прихода к Земле вследствие пониженного абсолютного уровня мелкомасштабной турбулентности перед сжатой частью CIR [2], не учитывавшимся в рамках описанной модели в целях упрощения, наблюдавшимся во всех 4 рассмотренных событиях, и 27-суточной периодичностью прихода CIR к Земле.

В *разделе 4.3* сформулированы выводы по главе 4.

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

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 годичных 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 CME 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 [17]) 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 [3], 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 (Low Frequency Array) / MWA (Murchison

Widefield Array) 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 [18], поскольку не все возмущения, приходящие к Земле, вызывают магнитную бурю.

Список литературы

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. 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.
3. BSA Space Weather. – URL: <https://sw.vtyulb.ru/>. – Доступ: 17.01.2024.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Manoharan P. K. Three-dimensional Evolution of Solar Wind during Solar Cycles 22-24. // *Astrophysical Journal*. – 2012. – V. 751. – No. 7. – P. 128 – 140.
8. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1979. – Т. 19. – С. 401 – 424.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. SolarSoft Latest Events Archive. – URL: https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html. – Доступ: 17.01.2024.
13. Cargill P. J. On the Aerodynamic Drag Force Acting on Interplanetary Coronal Mass Ejections. // *Solar Physics*. – 2004. – V. 221. – P. 135 – 149.
14. Computer Aided CME Tracking. – URL: <https://www.sidc.be/cactus/> – Доступ 17.01.2024.
15. 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.
16. 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.
17. 92-sec Key Parameter Plasma Data from Wind/SWE. – URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_swe_kp.html. – Доступ: 17.01.2024.
18. 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.