

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЗМИРАН

В.Д. Кузнецов

2024 г.



## ОТЗЫВ

**ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) на диссертационную работу Лукманова Владислава Рамильевича «Исследование динамики солнечного ветра по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия**

**Целью** диссертационной работы Лукманова В.Р. является 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.

**Актуальность работы** определяется тем, что изучение солнечного ветра (СВ) является одной из важнейших задач современной радиоастрономии, ведь понимание природы СВ важно для анализа наблюдений радиоисточников, поскольку 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 геомагнитным бурям.

### **Научная новизна**

- Впервые для длительной серии наблюдений на интервале 2014 – 2019 гг. выполнены оценки скоростей СВ 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 СВ). Произведены сравнения с соответствующими трехпунктовыми оценками в ISEE (Institute for Space-Earth Environmental Research) Университета

Нагойя в Японии.

- 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 СВ по наблюдениям одиночного источника проявляется при усреднениях на интервалах порядка года.
- Разработана простая кинематическая модель распространяющихся возмущений солнечного ветра типа СМЕ (coronal mass ejection) 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 (corotating interaction region). Качественно определены признаки, по которым в данных наблюдений межпланетных мерцаний могут быть обнаружены возмущения типа CIR.

#### **Научная и практическая значимость работы**

Исследование крупномасштабной структуры СВ и крупномасштабных возмущений 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, 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.

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, проводилось сравнение полученных диссертантом оценок скорости СВ по однопунктовым наблюдениям двух сильно мерцающих источников ЗС48 и ЗС298 на радиотелескопе БСА ФИАН на элонгациях  $25^\circ - 60^\circ$  с соответствующими оценками, полученными по трехпунктовым наблюдениям ISEE в Университете Нагойя в Японии. Также исследовалась радиальная зависимость индекса мерцаний по наблюдениям компактного источника ЗС48 в 2015 – 2019 гг., и был сделан вывод о наличии приэкваториального токового слоя с повышенной концентрацией плазмы и о пропорциональности флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы ее среднему значению при усреднении величин индекса мерцаний и скорости СВ на годовых интервалах.

**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 (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 заключении** кратко сформулированы основные выводы, результаты диссертации:

- 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.
- 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.

- 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.
- 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.

**Достоверность результатов**, полученных диссертантом, подтверждается их соответствием современным представлениям о турбулентном СВ, а также качественным и количественным согласием с результатами, полученными другими методами, и данными по мерцаниям, полученными на других инструментах. Все результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в научных журналах, прошли апробацию на различных конференциях.

#### **Замечания по содержанию диссертации:**

1. Вторая глава диссертации основывается на анализе данных двух мерцающих радиоисточников, описание которых (или хотя бы ссылка на соответствующий каталог) отсутствует в тексте диссертации.
2. Один из значимых результатов настоящей работы – оценка среднегодовых скоростей СВ, приведенный во второй главе, однако, к сожалению, полученные величины не были сравнены с аналогичными значениями, полученными напрямую со спутников-мониторов СВ (ACE, WIND и пр.).
3. В диссертации обсуждаются негативные эффекты прихода межпланетных СМЕ или CIR к Земле, в частности, вызываемые ими магнитные бури и их последствия, однако не приведены ссылки на литературу, описывающие эти эффекты (стр. 9). Также в диссертации отсутствуют ссылки на используемые автором индексы геомагнитной активности (см., например, стр. 14).
4. На рис. 1 и 4 диссертации отсутствуют оси и не указаны единицы измерения.
5. На стр. 42 и 50 имеются упоминания о том, что в процессе работы часть точек была отбракована по среднеквадратичному отклонению, но не указано, сколь большая эта часть и могла ли она повлиять на итоговые результаты анализа.
6. При описании предложенных моделей СМЕ и CIR в 3 и 4 главах диссертации плотность внутри этих структур задается в 3 раза

большой, чем в окружающем межпланетном пространстве. Однако ни в литературном обзоре, ни с помощью статистического сравнения не обосновывается выбор именно такого значения. К тому же для случая CIR распределение плотности не может быть одинаковым и для области взаимодействия и для самого высокоскоростного потока плазмы, согласно наблюдательным данным, внутри такого потока плотность СВ, наоборот, значительно понижена.

7. В тексте диссертации содержатся незначительные опечатки, например, «чисто точек» в Таблице 1 или несогласованные окончания, например, «скорости распространения СМЕ, зарегистрированными космическими аппаратами» на с. 11.

Перечисленные замечания, однако, не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ. Работа написана грамотным научным языком, логично организована и имеет характер законченного научного исследования. Автореферат соискателя в полной мере отражает содержание диссертации и основные результаты.

Таким образом, диссертационная работа «Исследование динамики солнечного ветра по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Лукманов В.Р., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Отзыв заслушан и обсужден на заседании секции Ученого совета ИЗМИРАН по направлению "Солнечно-земная физика" 26.03.2024 г.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником А.В. Беловым и старшим научным сотрудником Н.С. Шлык отдела вариаций космических лучей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук.

В.Н.С., к.ф.-м.н.

А.В. Белов

С.Н.С., к.пед.н.

Н.С. Шлык



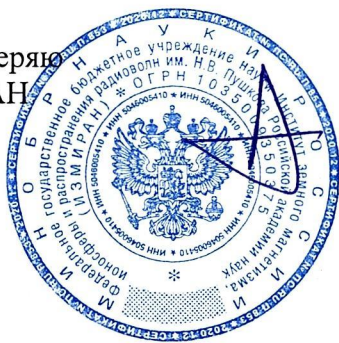
26 марта 2024 г.

Список основных публикаций А.В. Белова и Н.С. Шлык по теме рассмотренной диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Abunina M., Yanke V., Oleneva V. Virtual laboratory for the comprehensive analysis of Forbush-effects and interplanetary disturbances // *VarSITI Newsletter*. V. 21. P. 1-3. 2019.
2. Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Gaidash S.P., Eroshenko E.A., Kryakunova O.N., Nikolaevskiy N.F., Pryamushkina I.I., Trefilova L.A. Impact of different types of interplanetary medium disturbances of high-energy electrons on the geostationary orbit // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 59. N. 7. P. 878–884. 2019. DOI: 10.1134/S0016793219070041.
3. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A. Comparison between statistical properties of Forbush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes // *Advances in Space Research*. V. 63. I. 2. P. 1100-1109. 2019. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.009.
4. Papaioannou A., Belov A., Abunina M., Eroshenko E., Abunin A., Anastasiadis A., Patsourakos S., Mavromichalaki H. Interplanetary Coronal Mass Ejections as the Driver of Non-recurrent Forbush Decreases // *Astrophysical Journal*. V. 890:101 14pp. 2020. DOI: 10.3847/1538-4357/ab6bd1.
5. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 60. № 5 С. 547-556. 2020. DOI: 10.31857/S0016794020040100.
6. Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Папаиоанноу А., Мавромичалаки Е. Модуляционная эффективность корональных выбросов с различной структурой магнитного поля // *Известия РАН. Серия физическая*. Т. 85. №10. С. 1513-1516. 2021. DOI: 10.31857/S0367676521100070.
7. Belov A., Papaioannou A., Abunina M., Dumbovic M., Richardson I.G., Heber B., Kuhl P., Herbst K., Anastasiadis A., Vourlidas A., Eroshenko E., Abunin A. On the Rigidity Spectrum of Cosmic-Ray Variations within Propagating Interplanetary Disturbances: Neutron Monitor and SOHO/EPHIN Observations at ~1–10 GV // *The Astrophysical Journal*. V. 908. N. 1. ID. 5. 14 pp. DOI: 10.3847/1538-4357/abd724. 2021.
8. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 61. №6. С. 694-703. 2021. DOI: 10.31857/S0016794021060134.
9. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Сходство и различие Форбуш-понижений, связанных с потоками из корональных дыр, волоконными выбросами и выбросами из активных областей // *Геомагнетизм и Аэрномия*. Т. 62. №3. С. 283-301. 2022. DOI: 10.31857/S0016794022030117.
10. Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. V. 511. N. 4. P. 5897-5908. 2022. DOI: 10.1093/mnras/stac478.
11. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abunin A., Papaioannou A. Estimating the Transit Speed and Time of Arrival of Interplanetary Coronal Mass Ejections Using CME and Solar Flare Data // *Universe*. V. 8. I. 6. 327. 2022. DOI: 10.3390/universe8060327.
12. Belov A.V., Shlyk N.S., Abunina M.A., Belova E.A., Abunin A.A., Papaioannou A. Solar energetic particle events and Forbush decreases driven by the same solar sources // *Universe*. V. 8. I. 8. 403. 2022. DOI: 10.3390/universe8080403.

13. Белов А.В., Белова Е.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А. Геоэффективность спорадических явлений в 24 солнечном цикле // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 63. № 4. С. 534-544. 2023. DOI: 10.31857/S0016794023600291
14. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Эмпирическая модель оценки скоростей и запаздываний межпланетных корональных выбросов массы // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 63. № 5. С. 599–608. 2023. DOI: 10.31857/S0016794023600175.
15. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения и геомагнитные возмущения: 1. События, связанные с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 63. №6. С. 699–714. 2023. DOI: 10.31857/S0016794023600503.

Список научных трудов заверяю  
Ученый секретарь ИЗМИРАН  
к. ф.-м.н.



Рез

А.И. Рез