

На правах рукописи



Шлык Наталия Сергеевна

**ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ
ВОЗМУЩЕНИЯМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Специальность 1.3.1 –
Физика космоса, астрономия (физико-математические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской академии наук»

Научный руководитель:

Белов Анатолий Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отдела вариаций космических лучей Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Базилевская Галина Александровна,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник Лаборатории физики Солнца и космических лучей (Долгопрудненской научной станции) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук»

Пилипенко Вячеслав Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией физики околоземного космического пространства Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита диссертации состоится « 20 » марта 2026 г. в 12 час. 45 мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.021.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН (https://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2025/11/Dissertation_Shlyk.pdf)

Автореферат разослан 16 февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н.

А.А. Осипова

Общая характеристика работы

Форбуш-эффекты (ФЭ) – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра [1–3]. Главными источниками ФЭ являются корональные выбросы массы (КВМ), создающие спорадические ФЭ, и высокоскоростные потоки (ВСП) плазмы из корональных дыр (КД), которые, врачаясь вместе с Солнцем, создают рекуррентные ФЭ [4–5, 5*, 7*, 11*]. При этом довольно часто по мере распространения от Солнца к Земле КВМ и потоки плазмы из КД взаимодействуют между собой, что приводит к изменению наблюдаемых параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). Существует ряд работ, посвященных исследованию причин возникновения и описанию характеристик различных случаев взаимодействия возмущений СВ, например, [4–10] и др. Однако, исследований, затрагивающих особенности возникновения и развития Форбуш-эффектов, вызванных сложными взаимодействующими возмущениями СВ, не существовало. В настоящей работе были проанализированы, классифицированы и статистически обработаны несколько тысяч событий ФЭ, зарегистрированных в данных наземной мировой сети нейтронных мониторов (НМ), обработанных методом глобальной съёмки [13] (для частиц с жесткостью 10 ГВ) за длительный период с 1995 по 2024 г. Были описаны основные характеристики и отличительные особенности событий, вызванных различными структурами СВ, установлены связи между наблюдаемыми параметрами КЛ, межпланетной среды и геомагнитной активности (ГА) [1-24*].

Актуальность

Поскольку галактические КЛ очень чувствительны к изменению свойств плазмы солнечного ветра, вариации их плотности и анизотропии представляют собой ценный инструмент для исследования солнечной активности, описания различных процессов в гелиосфере и определения свойств крупномасштабных структур СВ, в том числе, при наличии сложных взаимодействующих возмущений. Галактические КЛ способны откликаться на процессы, в значительной степени удаленные от непосредственного места их регистрации на Земле, а значит исследование вариаций КЛ и, в частности, характеристик ФЭ, позволяет получить разнообразную и зачастую уникальную информацию о межпланетных возмущениях, ставших их причиной. Восстановление информации о параметрах гелиосферных возмущений является одной из важных задач солнечно-земной физики, что делает исследование ФЭ, вызванных взаимодействующими структурами СВ, актуальным, практически значимым для физики солнечно-земных связей и геофизики и применимым для прогнозирования космической погоды, поскольку информация о поведении космических лучей расширяет возможности прогнозирования влияния различных солнечных и гелиосферных событий на атмосферу и магнитосферу Земли.

Цель работы

Изучение влияния взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических КЛ, статистический анализ различных характеристик таких событий и установление связей между параметрами ФЭ и соответствующими межпланетными и геомагнитными возмущениями.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

1. Выделение и анализ различных межпланетных возмущений, приведших к регистрации ФЭ на Земле, для длительного периода с 1995 по 2024 г.
2. Определение критериев отнесения каждого конкретного события к той или иной группе.
3. Статистический сравнительный анализ параметров ФЭ в зависимости от типа солнечного источника и межпланетного возмущения для выделенных групп.
4. Установление связей между параметрами изолированных и взаимодействующих возмущений СВ и соответствующими им ФЭ.
5. Изучение влияния вида и характера взаимодействия крупномасштабных структур СВ на геомагнитную активность (ГА).

Научная новизна работы состоит в следующем:

- На большом статистическом материале для периода с 1995 по 2024 г. установлены характерные особенности и описаны различия ФЭ, вызванных крупномасштабными возмущениями СВ (в частности, межпланетными КВМ и потоками плазмы из КД).
- Разработана и описана эмпирическая модель расчета времени и скорости распространения межпланетных КВМ на основе солнечных данных.
- Впервые предложено пороговое значение времени между регистрацией отдельных межпланетных возмущений и описаны характеристики различных типов возмущений СВ, которые следует считать изолированными или взаимодействующими.
- На основе статистического и сравнительного анализа впервые установлено, что в зависимости от вида и характера взаимодействия структур СВ параметры сопутствующих ФЭ и ГА в значительной степени отличаются от параметров изолированных событий.
- Впервые показано, что наличие взаимодействия усиливает эффективность второго межпланетного возмущения в любой взаимодействующей паре, увеличивая его способность модулировать галактические КЛ и продуцировать рост ГА.
- Проанализировано поведение некоторых временных параметров Форбуш-эффектов для взаимодействующих событий и впервые установлено, что средние времена регистрации минимума Форбуш-эффекта, а также максимума скорости СВ и модуля индукции ММП значительно меньше, чем для изолированных событий.

Научная и практическая значимость работы

- I. Полученные зависимости характеристик ФЭ от вида и параметров изолированных и взаимодействующих возмущений СВ служат для более детального изучения солнечно-земных связей и позволяют глубже разобраться в физике гелиосферных процессов и свойствах крупномасштабных структур солнечной плазмы, а также могут использоваться для уточнения моделей модуляции КЛ.
- II. Установленные связи параметров изолированных и взаимодействующих возмущений СВ с последующими вариациями плотности и анизотропии КЛ и ГА могут быть использованы для улучшения прогнозов геоэффективности солнечных источников межпланетных возмущений и состояния космической погоды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствование и обновление созданных в ИЗМИРАН баз данных: вариаций космических лучей; солнечных вспышек; корональных выбросов массы; транзитентных явлений в космических лучах и межпланетной среде.
2. Эмпирическая модель расчета скорости и времени распространения межпланетных корональных выбросов массы.
3. Установленные пороговые значения параметров и описанные характеристики различных типов возмущений солнечного ветра, которые следует считать изолированными или взаимодействующими.
4. Количественные зависимости характеристик Форбуш-эффектов и параметров геомагнитной активности от вида и параметров возмущений солнечного ветра.
5. Установленные закономерности изменения временных параметров Форбуш-эффектов, вызванных взаимодействующими возмущениями солнечного ветра.

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов следует из статистического анализа большого количества событий в течение длительного периода времени. Полученные результаты согласуются с известными физическими закономерностями и общепринятыми моделями образования Форбуш-эффектов и прошли апробацию в работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН с положительным результатом.

Личный вклад автора

Шлык Н.С. инициировала постановку задач исследования, участвовала в решении методических вопросов. Автор самостоятельно провела отбор событий, обработку полученных данных и анализ экспериментального материала, принимала участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов. Шлык Н.С. внесла значительный вклад в расширение и улучшение баз данных, созданных в ИЗМИРАН и используемых при написании диссертации. Автор принимала активное участие в подготовке и написании

докладов и статей по теме исследования на русском и английском языках, а также представляла их на российских и международных конференциях.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, приведённые в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 16-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 8-12 февраля 2021 г. (online), Москва
- Международная конференция и Школа молодых ученых «Климатические риски и космическая погода», посвященные памяти Н.К. Кононовой, 14-17 июня 2021 (online), Иркутск
- XXV Всероссийская ежегодная конференция по физике солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2021», 4-8 октября 2021 года, Санкт-Петербург
- XVIIth Hvar Astrophysical Colloquium «The Sun and Heliosphere», 20-24 September 2021 (online), Хорватия, Хвар
- 17-ая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", 7-11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва
- 15th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium, 21-24 February 2022 (online), India, Mumbai
- 45-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 14-18 марта 2022 г. (online), Апатиты
- 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 27 июня – 2 июля 2022 г., МГУ, Москва
- XVII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 5-10 сентября, 2022 г., Иркутск
- XIV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2022», Москва, 3-7 октября 2022 г., Санкт-Петербург
- XXVI всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2022», г. Санкт-Петербург, 3-7 октября 2022 г., Санкт-Петербург
- NMDB@Athens: Hybrid symposium on cosmic ray studies with neutron detectors, 26-30 September 2022 (online), Athens, Greece
- 18-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 6-10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва
- 46-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2023 г. (online), Апатиты
- Симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиофеофизических процессов и событий» («ПРОГНОЗ-2023»), 29-31 мая 2023 г., ИЗМИРАН, Москва
- VIII International Conference «Atmosphere, ionosphere, safety» (AIS-2023), June 04-09, 2023, Kaliningrad, Russia
- «United Nations Workshop on the International Space Weather Initiative: The Way Forward», 26-30 June 2023(online), Vienna

- Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца – 2023», 13-16 июня (online), КрАО РАН, п. Научный
- Первая научная конференция «Проблемы космофизики» имени М.И. Панасюка, 10-13 июля 2023 г., Дубна
- XXVII Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2023», 9-13 октября 2023 года, Санкт-Петербург
- Конкурс научных работ молодых сотрудников институтов в память академика А.П. Александрова, 25 октября 2023г., ТРИНИТИ, Троицк
- 19-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 5-9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва
- 47-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 11-15 марта 2024 г. (online), Апатиты
- Симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» («ПРОГНОЗ-2024»), 27-31 мая 2024 г., ИЗМИРАН, Москва
- The 16th Workshop «Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere» 3-7 June 2024 (online), Primorsko, Bulgaria
- Городской конкурс научных работ молодых ученых, 5 июня 2024 г., Троицк
- 38-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 1-5 июля 2024 г.
- II Всероссийская школа по экспериментальной и лабораторной астрофизике и геофизике, 1-5 июля 2024 г., Саров
- XIX Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 1-6 сентября 2024 г., Иркутск
- XXVIII Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2024», 7-11 октября 2024 г., Санкт-Петербург
- «Operational and Exploration Requirements and Research Capabilities for SEP Environment Monitoring and Forecasting» workshop on October 16-19, 2024 (online), Georgia State University
- 20-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ), 10-14.02.2025, ИКИ РАН, Москва
- 48-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 10-14 марта 2025 г. (online), Апатиты
- NMDB Meeting 2025: Cosmic ray studies with neutron detectors, 19-21 March 2025, Athens, Greece
- Всероссийская Школа-конференция молодых астрономов «Космос, Астрофизика, Солнце, Планеты» – КАСП-2025, 19-23 мая 2025 г., ИЗМИРАН, Троицк
- The 17th Workshop «Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere» 2-5 June 2025 (online), Primorsko, Bulgaria
- The 5th International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA-2025), 24-26 June 2025, Moscow, Russia
- Вторая научная конференция «Проблемы космофизики» имени М.И. Панасюка, 30 июня – 4 июля 2025 г., Дубна

Публикации

Соискатель имеет 66 опубликованных работ, из них по теме диссертации 32 научные работы, в том числе 24 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 8 работ опубликованы в материалах российских и международных конференций.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Её объем составляет 138 страниц. В диссертации содержится 38 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 267 наименований.

Во **Введении** аргументирована актуальность и описана степень разработанности темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, обоснована научная новизна, показана научно-практическая значимость и достоверность полученных результатов, описаны выносимые на защиту положения и их апробация на ряде конференций, а также кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния исследований Форбуш-эффектов, описаны основные этапы развития теории описания и моделирования ФЭ, а также инструменты и методы исследования. Выделены и описаны основные количественные характеристики ФЭ, которые могут быть рассчитаны при обработке данных мировой сети НМ (для частиц жесткостью 10 ГВ) с помощью метода глобальной съемки (GSM), подробно изложенного в работе [13]. Описаны временные характеристики наиболее типичных событий ФЭ и установлены различия в профилях и экстремальных значениях параметров ФЭ, вызванных разными типами межпланетных возмущений [2*, 5*, 7*, 9–11*, 14–17*].

Самыми важными характеристиками вариаций космических лучей являются изменения плотности (изотропная часть интенсивности) и векторной анизотропии (распределение по направлениям) потока галактических КЛ. При этом вариации КЛ раскладываются по сферическим гармоникам, для наших задач достаточно использовать первые две (нулевую гармонику, которая будет отражать изменения плотности потока КЛ, и первую, отвечающую за составляющие векторной анизотропии потока КЛ). Дальнейший анализ основывается на событиях, содержащихся в базе данных ФЭ и межпланетных возмущений (Forbush-effects and Interplanetary Disturbances – FEID), созданной и поддерживаемой сотрудниками ИЗМИРАН в течение уже многих лет, которая непрерывно пополняется данными о новых событиях и сейчас доступна в виде онлайн-инструмента с удобным интерфейсом – <https://tools.izmiran.ru/feid>.

Основными количественными характеристиками ФЭ, которые будут рассматриваться в настоящей работе, являются: AF – магнитуда или максимальная вариация плотности КЛ; Dmin – максимальное часовое уменьшение плотности КЛ в данном событии (максимальный часовой

декремент); Ахумах – максимальная величина экваториальной составляющей анизотропии КЛ и Azrange – максимальная в событии разность величин северо-южной составляющей анизотропии КЛ. Кроме того, для каждого события ФЭ рассчитываются экстремальные значения параметров СВ (скорость, температура, плотность), межпланетного магнитного поля и сопутствующей геомагнитной активности (Ap- (или Kr-) и Dst-индексы).

Проведенный анализ показал, что для ФЭ, связанных с разными типами солнечных источников, наблюдаются заметные различия в характере развития событий. На рис. 1 приведено схематическое изображение усредненных профилей ФЭ, связанных с воздействием различных типов межпланетных возмущений [5*].

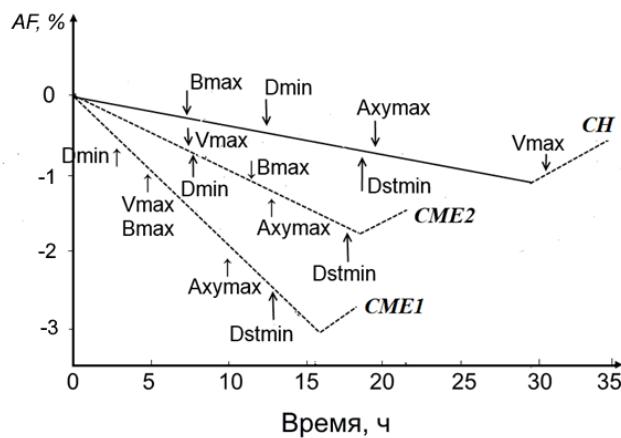


Рис. 1. Временное развитие среднего события ФЭ в различных группах

Хорошо видно, что понижение интенсивности КЛ (AF, %) в группе событий, связанных с КВМ из активных областей (СМЕ1), происходит быстрее, и минимум (более глубокий) достигается немного раньше, чем в группе событий, связанных с волоконными выбросами вне активных областей (СМЕ2), и значительно раньше, чем в группе событий, связанных с высокоскоростными потоками плазмы из КД (CH). Времена достижения максимальных значений индукции ММП и скорости СВ практически совпадают в группе СМЕ1, имеют запаздывание в группе СМЕ2 и сильно разнесены во времени для группы CH. Заметны различия и во временах достижения минимума Dst-индекса геомагнитной активности, а также максимальных значениях экваториальной составляющей анизотропии КЛ – Ахумах и часового декремента плотности КЛ – Dmin. Все эти различия могут быть объяснены разницей в самих структурах рассматриваемых возмущений СВ, которым посвящена Глава 2 диссертации.

Однако ФЭ регистрируются не только в данных наземных детекторов. На основе данных по вариациям КЛ (канал с энергией >50 МэВ) и данным ММП и СВ автором был создан обширный каталог ФЭ, наблюдавшихся на обоих космических аппаратах *Helios*, на основе которого было проведено исследование радиальной зависимости ФЭ на расстояниях 0.28–1 а.е. и сравнение с данными наземных измерений [6*, 16*]. На рис. 2 представлена зависимость величины ФЭ (радиус круга пропорционален величине понижения плотности КЛ, цвета произвольны) от максимальной величины ММП,

зарегистрированной в событии (B_{\max} , нТл; горизонтальная ось) и радиального расстояния (R , AU; вертикальная ось) в событии.

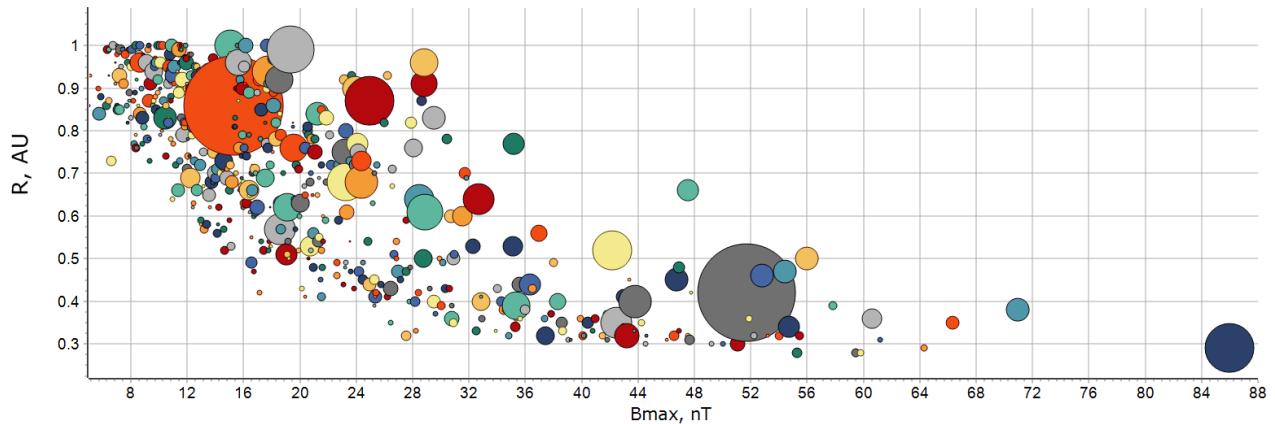


Рис. 2. Связь величины ФЭ на *Helios*, максимального ММП и радиального расстояния

Наиболее очевидной особенностью, наблюдаемой на этом рисунке, является ожидаемое уменьшение величины магнитного поля с увеличением расстояния от Солнца. Однако, рассматривая события в одинаковых диапазонах расстояний, как близко, так и далеко от Солнца, можно увидеть хорошо выраженные ФЭ с очень разными магнитудами. Сравнение величины зарегистрированных на разных расстояниях ФЭ позволяет предположить, что радиальная зависимость или отсутствует, или очень слабая. Отсутствие сильной радиальной зависимости величины ФЭ в диапазоне 0.28–1 а.е. позволило предположить существование некого квазистационарного состояния, т.е. баланса между генерацией ФЭ и его восстановлением.

Во второй главе рассмотрены особенности двух основных типов возмущений СВ: связанных с (1) корональными выбросами массы и (2) высокоскоростными потоками из корональных дыр.

В частности, описаны особенности распространения межпланетных КВМ (МКВМ), последствия воздействия их внутренних структур на галактические КЛ и геомагнитную активность, а также связанные с ними протонные возрастания [2–4*, 9–15*, 17*, 20*, 23*]. Например, автором была разработана эмпирическая модель расчета скоростей и времен распространения МКВМ [3*, 12*] на основе солнечных данных, доступных с минимальной задержкой, которая впоследствии была дополнена прогностическими инструментами для оценки ожидаемого уровня геомагнитной активности и характеристик возможных протонных возрастаний [4*, 13*]. На рис. 3 приведена связь ожидаемого времени прибытия межпланетного возмущения к Земле (T_{tr}) со значениями начальной скорости соответствующего КВМ (ось X) и фоновой скорости СВ (ось Y), разными цветами обозначены различные времена распространения МКВМ до орбиты Земли (числа, указанные на соответствующих изолиниях). Например, для КВМ с начальной скоростью 1500 км/с при фоновой скорости СВ, равной 400 км/с, ожидаемое время прибытия составляет около 60 ч, а для начальной скорости 500 км/с оно увеличивается до 80 ч. Также влияние оказывает и изменение фоновой скорости СВ.

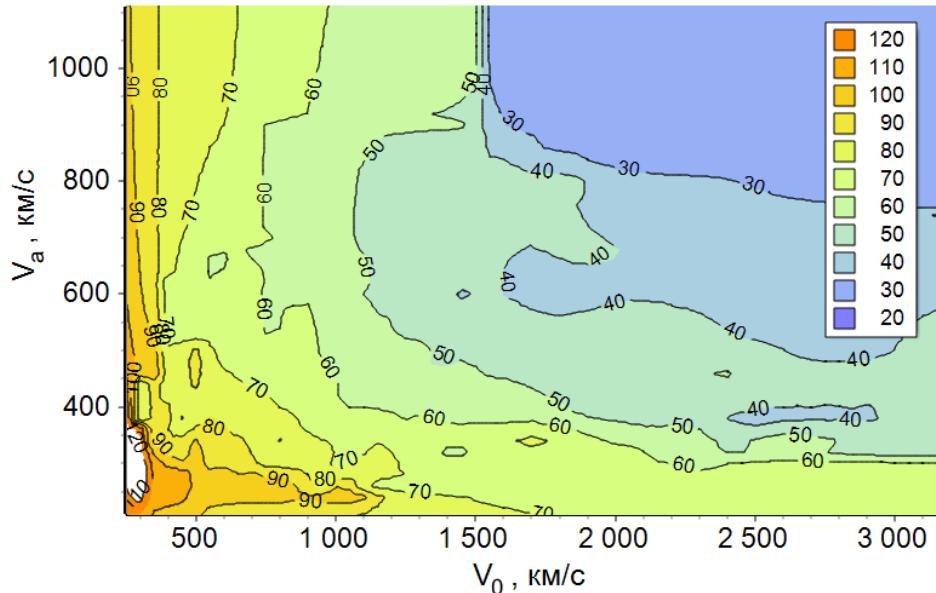


Рис. 3. Связь ожидаемого запаздывания МКВМ (T_{tr}) с начальной скоростью соответствующего КВМ (ось X) и скоростью фонового СВ (ось Y). Различным цветом обозначена градация ожидаемого транзитного времени (в часах)

В работах [5*, 7*, 11*, 14*] было показано, что распределения большинства изучаемых параметров для рекуррентных ФЭ, связанных с воздействием потоков плазмы из КД, почти симметричные, имеют меньший разброс значений скорости СВ и индукции ММП (однако при больших средних значениях скорости, чем в группах КВМ). Кроме того, установлено, что ВСП из КД не вызывают больших ФЭ (среднее значение $0.90 \pm 0.03\%$, тогда как для событий, связанных с КВМ из активных областей, оно составляет $3.29 \pm 0.25\%$), и основной эффект создается в начале события, т.е. в коротирующей области взаимодействия перед самим ВСП.

Также было описано существование сложных, оказывающих влияние друг на друга, структур СВ и определены критерии отбора взаимодействующих и изолированных межпланетных возмущений [1*, 7–8*, 14–15*, 22–24*]. Путем экспериментального отбора, на основе подсчета времени между соседними событиями в базе данных и наблюдения изменения их характеристик, автором было определено пороговое значение – 50 ч. Соответственно, события, разделенные промежутком времени ≥ 50 ч, считаются не оказывающими друг на друга влияния, и наоборот, события, разделенные промежутком времени < 50 ч, были признаны взаимодействующими. С применением метода наложения эпох было установлено, что, во-первых, для изолированных событий самые резкие изменения величины ММП происходят в первые 10 ч после начала события, а через 35–50 ч величина ММП возвращается к фоновым значениям. Во-вторых, в обозначенные выше 50 ч укладываются все основные изменения плотности потока КЛ: фаза спада длится около 20 ч, а в следующие 30 ч плотность КЛ возвращается к начальным значениям. Поведение этих же параметров для взаимодействующих событий дает совершенно другую картину: повышенное ММП не возвращается к фоновому уровню в течение нескольких десятков часов и, соответственно, оказывает влияние на профиль ФЭ, который

оказывается совершенно не типичным, поскольку фаза спада оказывается намного более длительной и сам ФЭ более глубокий. Далее будет показано, что одним из важных факторов влияния следующего события на предыдущее является именно увеличение значений ММП и изменение как глубины, так и длительности фазы спада плотности КЛ.

Третья глава диссертации посвящена изучению характеристик Форбуш-эффектов и параметров геомагнитной активности в событиях, вызванных различными видами взаимодействующих возмущений СВ, в частности, парами корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков из корональных дыр, а также описаны межпланетные возмущения, вступившие во взаимодействие до прибытия на орбиту Земли [1*, 8*, 18*, 21*, 22*, 24*].

Анализ поведения параметров ММП, СВ, КЛ и геомагнитной активности, а также солнечных источников позволили уточнить типы и количество групп взаимодействующих межпланетных возмущений для большого периода наблюдений с 1995 по 2022 гг. В частности, в настоящей работе рассматриваются следующие группы:

1. Вступившие во взаимодействие до прибытия к Земле МКВМ (MIX CME) – 107 событий;
2. Вступившие во взаимодействие до прибытия к Земле МКВМ и поток из КД (MIX HSS) – 187 событий;
3. Последовательно зарегистрированные на 1 а.е. пары МКВМ (ICME1+ICME2) – 120 пар;
4. Последовательно зарегистрированные на 1 а.е. пары МКВМ и потока из КД (ICME+HSS) – 176 пар.
5. Последовательно зарегистрированные на 1 а.е. пары потоков из КД (HSS1+HSS2) – 136 пар.

Что касается пятой группы – взаимодействующих ВСП из КД – для них время между событиями было увеличено до 120 ч в силу их более длительного воздействия на Землю в сравнении с МКВМ.

Для сравнения основных характеристик и создания контрольных групп, также были выделены изолированные события (т.е. те, на развитие которых не оказывают влияния «соседние» возмущения СВ). Нами были отобраны две контрольные группы:

1. Изолированные («чистые») МКВМ (Pure ICMEs) – 153 события.
2. Изолированные («чистые») потоки из КД (Pure HSSs) – 194 события.

Полный список исследуемых событий и значений их основных параметров доступен по ссылке http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2024/sw_dist.pdf. Для каждой группы событий были рассчитаны средние значения различных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности.

В работах [8*, 22*] было также описано изменение количества изолированных и взаимодействующих событий с течением циклов солнечной активности. Установлено, что большая часть событий, связанных с «чистыми»

ВСП из КД приходится на годы спада и минимума солнечной активности (2006–2009 и 2017–2019), в те же периоды количество событий с участием КВМ, наоборот, достигает минимальных значений. Максимальное количество взаимодействующих МКВМ разных групп, наоборот, приходится на годы роста и максимума солнечной активности, что вполне ожидаемо. При этом рост и максимум 23-го солнечного цикла характеризуется большим количеством МКВМ, взаимодействующих еще до прихода к Земле, а в 24-м цикле «перевешиваются» события, связанные с участием ВСП из КД, количество, площади и частота воздействия которых действительно стали более значимы, чем в 23-м цикле [14, 20*].

На рис. 4 приведен пример событий 28 и 29 мая 2005 г., вошедших в группу ICME1+ICME2. Регистрация обоих МКВМ на Земле была связана с ударными волнами, при этом по профилю изменения величины ММП, скорости СВ и поведению КЛ заметно, что первое событие еще имело потенциал к дальнейшему развитию, но было «обрезано» вторым событием. В свою очередь наличие возмущенной обстановки перед вторым событием привело к еще большему понижению плотности КЛ, повышению значений анизотропии КЛ в момент регистрации второй ударной волны, а также способствовало усилению геомагнитной активности.

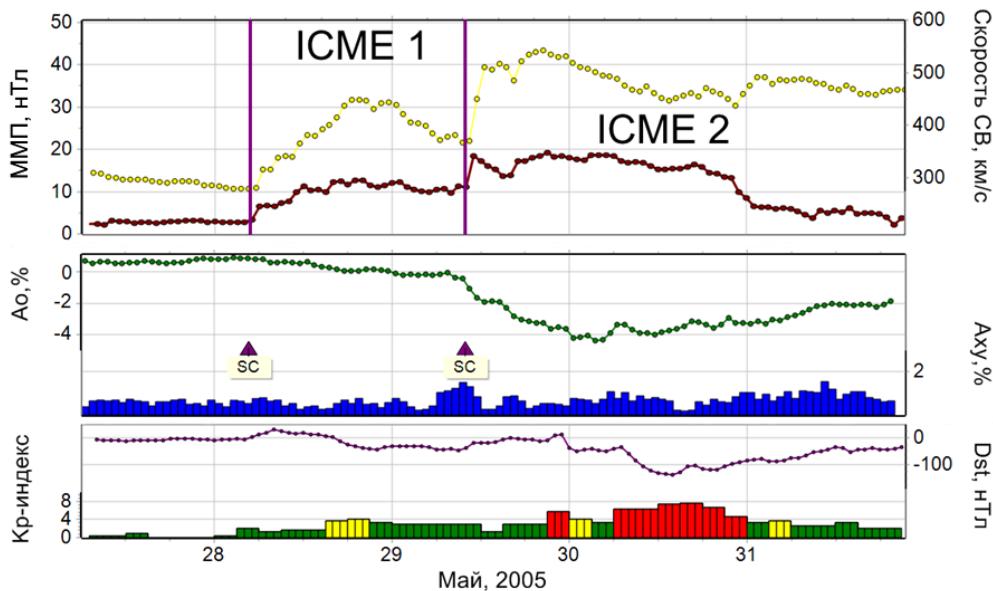


Рис. 4. Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и геомагнитной активности для взаимодействующих МКВМ в мае 2005 г. (пример события из группы ICME1+ICME2).

Анализ подобных событий и их характеристик позволил сделать вывод о том, что вторые МКВМ имеют большие скорости и большие значения индукции ММП. Всё это приводит к росту величины регистрируемых ФЭ для вторых событий из взаимодействующей пары ICME1+ICME2 до 1.39 %, тогда как для первых событий из пары она составляла 0.78%. Также можно отметить, что наиболее частым результатом взаимодействия МКВМ на расстоянии 1 а.е. являются события с множественными магнитными облаками и ударными волнами, распространяющиеся внутри предыдущего МКВМ. Каждый из них

имеет свои особенности взаимодействия с магнитосферой Земли. Зачастую длительные движущиеся сжатые магнитные поля приводят к более интенсивным геоэффектам; кроме того, ударные волны внутри МКВМ имеют более высокую вероятность наличия геоэффективной оболочки, чем ударные волны, распространяющиеся в типичных условиях СВ.

Кратко основные выводы по анализу различных ФЭ, вызванных взаимодействующими и изолированными межпланетными возмущениями, можно сформулировать следующим образом:

- 1) Космические лучи эффективнее модулируются МКВМ, чем ВСП из КД. При этом максимальные значения величины Форбуш-эффекта, модуля индукции ММП и геомагнитных индексов наблюдаются для вторых событий из пары взаимодействующих МКВМ.
- 2) Геомагнитная эффективность и степень модуляции КЛ в событиях с участием ВСП из КД, вступивших во взаимодействие с МКВМ, также увеличивается, т.е. наличие взаимодействия «обогащает» любое второе событие за счет ресурсов первого.
- 3) Степень взаимного влияния зависит от времени между «соседними» событиями, и наиболее выраженные изменения различных параметров существуют для событий, взаимодействие которых произошло еще до достижения орбиты Земли: именно в группе MIX SME зарегистрированы максимальные среди всех групп средние значения модуля ММП, величины ФЭ и уровня геомагнитных возмущений.
- 4) В рассмотренных взаимодействующих событиях средние времена наступления минимума Форбуш-эффекта, а также максимума скорости СВ и модуля индукции ММП значительно меньше, чем для изолированных событий, т.е. вторые события из пары не дают полностью развиться первым, «обрезают» их.
- 5) Вторые события во взаимодействующих парах также имеют временной сдвиг в сторону уменьшения времени развития события: наступление максимума скорости СВ и модуля индукции ММП, а также минимума плотности КЛ происходит раньше, чем в событиях контрольной группы. Исключением является группа MIX HSS, временные параметры которой оказались близки к значениям контрольной группы Pure HSSs, однако изменениям в амплитудных значениях оказались подвержены величины ФЭ и уровень геомагнитной активности.

На рис. 5 приведены результаты применения метода наложения эпох для поведения плотности потока КЛ (верхняя панель) и Ар-индекса геомагнитной активности (нижняя панель) в разных группах событий с участием МКВМ, которые наглядно демонстрируют описанные выше изменения параметров.

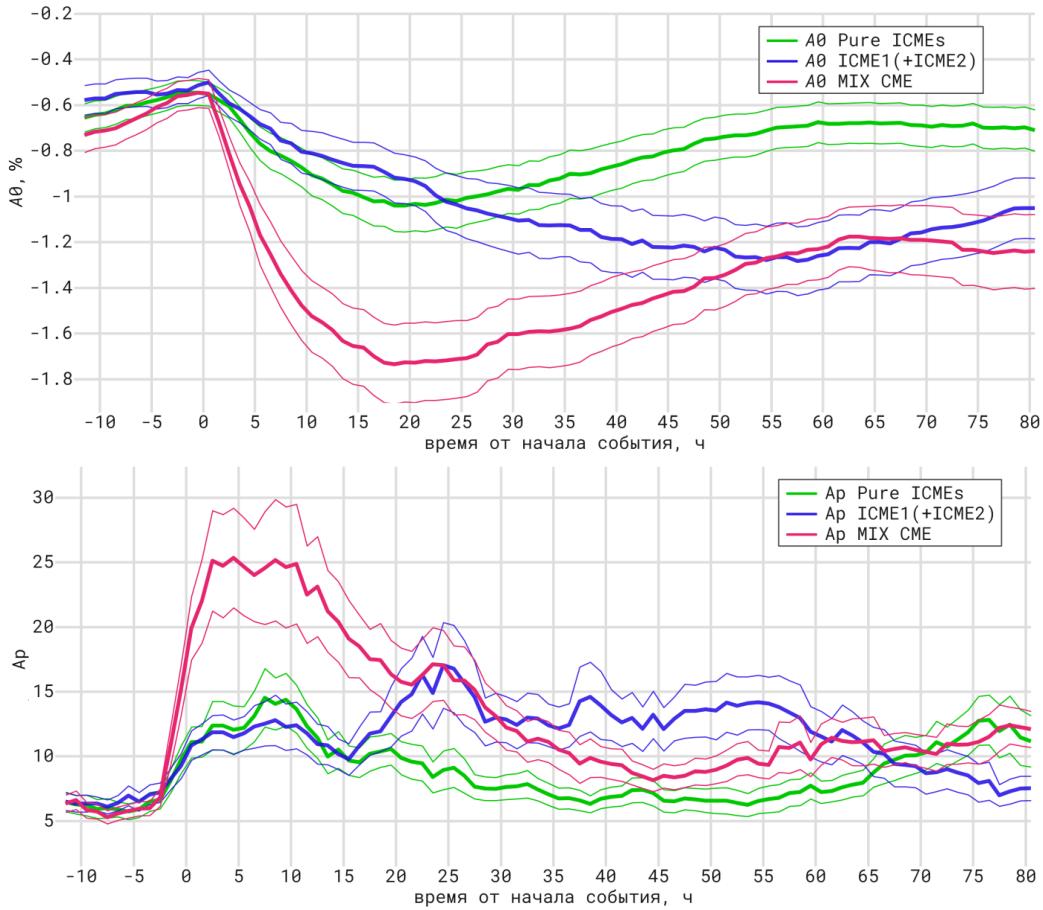


Рис. 5. Изменения плотности КЛ (А0, верхняя панель) и Ар-индекса геомагнитной активности (нижняя панель) в группах с участием МКВМ, полученные с использованием метода наложения эпох. Тонкими линиями показано отклонение $\pm\sigma$.

В качестве примеров подобных ярких проявлений эффектов взаимодействующих возмущений СВ на модуляцию КЛ и ГА были подробно рассмотрены аномальные периоды с сентября 2014 по февраль 2015 гг. и в мае 2024 г. В частности, в работе [18*] было показано, что самые глубокие понижения плотности КЛ в ноябре–декабре 2014 г. совпали со значительными ФЭ, вызванными совместным влиянием КВМ и ВСП из южной полярной КД. А также установлено, что в конце 2014 г. в гелиосфере сложилась уникальная ситуация, когда по широкому ВСП распространялась серия выбросов солнечного вещества, которые затрудняли продольное распространение КЛ, а поперечное распространение и так было затруднено регулярными магнитными полями самого ВСП, в результате чего за ударными волнами МКВМ создавались расширяющиеся «квазиловушки», в которых КЛ замедлялись и уменьшали свою плотность. Это привело и к общей дополнительной модуляции КЛ, и к её неравномерному долготному распределению.

Также в работах [19*, 24*] было показано, что события 10–13 мая 2024 г. являются наглядным примером экстремальных проявлений последствий взаимодействия различных межпланетных возмущений между собой. В описываемых событиях речь шла сразу о девяти МКВМ, распространяющихся вместе с ВСП из КД. Зарегистрированные в этот период ФЭ и геомагнитные возмущения оказались одними из самых выдающихся за последние десятилетия

сразу по нескольким параметрам: магнитуде вариаций плотности КЛ, максимальному часовому понижению плотности КЛ, величине и длительности геомагнитных возмущений.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. В рамках данной работы была в значительной степени усовершенствована и обновлена база данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений ИЗМИРАН в части добавления новых событий, уточнения характеристик событий прошлых лет, расчета новых параметров.
2. Разработана и описана эмпирическая модель расчета времени и скорости распространения межпланетных КВМ на основе солнечных данных.
3. На большом статистическом материале (с 1995 по 2024 гг.) проанализировано изменение параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, галактических космических лучей, сопутствующей геомагнитной активности для межпланетных возмущений, связанных с различными типами солнечных источников – корональными выбросами массы, высокоскоростными потоками из корональных дыр и их различными комбинациями.
4. Впервые предложен временной критерий (порог в 50 ч) отнесения того или иного события к категории взаимодействующих или изолированных, а также описаны возможные типы и условия возникновения взаимодействия корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков из корональных дыр.
5. Предложено деление по видам взаимодействия (5 групп событий) и проанализировано изменение количества событий различных видов с течением циклов солнечной активности.
6. Впервые показано, что степень взаимного влияния межпланетных возмущений зависит от времени между «соседними» событиями, а наиболее выраженные изменения различных параметров существуют для событий, взаимодействие которых произошло до достижения орбиты Земли.
7. Впервые установлено, что наличие взаимодействия усиливает второе событие за счет ресурсов первого в любой взаимодействующей паре, а именно: увеличивается модуль межпланетного магнитного поля и скорость солнечного ветра, возрастает степень модуляции потока галактических космических лучей, усиливается геомагнитная активность. Исключением являются следующие друг за другом высокоскоростные потоки из корональных дыр, для которых подобного влияния друг на друга не обнаружено.
8. Впервые показано, что для большинства взаимодействующих возмущений солнечного ветра изменениям подвержены не только экстремумы параметров космических лучей, межпланетной среды и геомагнитной активности, но и их временной профиль – первые события во

взаимодействующих парах развиваются быстрее, а вторые – оказываются более длительными и геоэффективными.

9. На основе существования описанных взаимодействующих возмущений солнечного ветра были объяснены причины увеличения амплитуд квазидвадцатисемидневной вариации потока космических лучей в сентябре 2014–феврале 2015 г., а также причины большого Форбуш-эффекта и экстремальной магнитной бури в мае 2024 г.

Таким образом, в диссертации решена научная задача изучения влияния различных типов возмущений солнечного ветра (в том числе взаимодействующих между собой) на вариации галактических космических лучей и геомагнитную активность, имеющая большое значение как для прогнозирования изменения состояния космической погоды, так и для уточнения моделей модуляции космических лучей.

Публикации по теме диссертации

- 1*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абуин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61. – № 6. – С. 694-703.
- 2*. Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Ерошенко Е.А., Абуин А.А., Оленева В.А., Прямушкина И.И., Янке В.Г. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками // Геомагнетизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61. – № 5. – С. 572-582.
- 3*. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abuin A., Papaioannou A. Estimating the transit speed and time of arrival of interplanetary coronal mass ejections using CME and solar flare data // Universe. – 2022. – V. 8. – N 6. – Article ID 7.
- 4*. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Belova E., Abuin A., Papaioannou A. Solar energetic particle events and Forbush decreases driven by the same solar sources // Universe. – 2022. – V. 8. – N 8. – Article ID 403. – 18 pp.
- 5*. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абуин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Особенности поведения временных параметров Форбуш-понижений, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 155-170.
- 6*. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абуин 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 аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 3. – С. 283-301.
- 7*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абуин А.А., Papaioannou A. Форбуш-эффекты, наблюдавшиеся на космических аппаратах миссии HELIOS // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 456-463.
- 8*. Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abuin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – V. 511. – N 4. – P. 5897-5908.
- 9*. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abuin A.A., Shlyk N.S., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases associated with coronal mass ejections from active and non-active regions: statistical comparison // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – V. 515. – N 3. – P. 4430-4444.

- 10*. Белов А.В., Белова Е.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А. Геоэффективность спорадических явлений в 24-м солнечном цикле // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 4. – С. 534-544.
- 11*. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения, связанные с корональными дырами, корональными выбросами из активных областей и волоконными выбросами: сравнение в солнечных циклах 23 и 24 // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 5. – С. 581-598.
- 12*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Эмпирическая модель оценки скоростей и запаздываний межпланетных корональных выбросов массы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 5. – С. 599-608.
- 13*. Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белова Е.А., Абунин А.А., Папаиоанну А. Протонные возрастания и Форбуш-эффекты с одними и теми же солнечными источниками // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2023. – Т. 87. – № 7. – С. 1005-1009.
- 14*. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Shlyk N.S., Oleneva V.A., Yanke V.G. Statistical comparison of time profiles of Forbush decreases associated with coronal mass ejections and streams from coronal holes in solar cycles 23–24 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – V. 521. – N 3. – P. 4544-4560.
- 15*. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Развитие Форбуш-понижений, связанных с корональными выбросами из активных областей и регионов вне активных областей // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 1. – С. 43-57.
- 16*. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abunin A., Papaioannou A., Richardson Ia.G., Lario D. Study of the radial dependence of Forbush decreases at 0.28–1 AU using data from the HELIOS 1 and 2 spacecraft // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – V. 521. – N 3. – P. 4652-4668.
- 17*. Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунин А.А., Мелкумян А.А., Прямушкина И.И., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные временные характеристики вариаций космических лучей и сопутствующих параметров в магнитных облаках // Геомагнетизм и аэрономия. – 2024. – Т. 64. – № 1. – С. 29-38.
- 18*. Шлык Н.С., Белов А.В., Обридко В.Н., Абунина М.А., Абунин А.А. Аномальные квазирекуррентные вариации космических лучей в сентябре 2014 – феврале 2015 годов // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2024. – Т. 64. – №2 – С. 240-252.
- 19*. Mavromichalaki H., Papailiou M.Ch., Livada M., Gerontidou M., Paschalidis P., Stassinakis A., Abunina M., Shlyk N., Abunin A., Belov A., Yanke V., Crosby N., Dierckxsens M., Drube L. Unusual Forbush decreases and geomagnetic storms on 24 March, 2024 and 11 May, 2024 // Atmosphere. – 2024. – V. 15. – N 9. Article ID 1033. – 17 pp.
- 20*. Белов А.В., Белова Е.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белов С.М., Абунин А.А. Форбуш-эффекты и геомагнитные бури // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2024. – Т. 64. – № 3. – С. 323-336.
- 21*. Belov S.M., Shlyk N.S., Abunina M.A., Belov A.V., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. On the most interesting events in solar wind and cosmic rays in February-April, 2023 // Solar Physics. – 2024 – V. 299. – Article ID 164. – 15pp.

- 22*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Белов С.М., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Некоторые особенности взаимодействующих возмущений солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. – 2024. – Т. 64. – № 4. – С. 465–478.
- 23*. Kryakunova O., Seifullina B., Abunina M., Shlyk N., Abunin A., Nikolayevskiy N., Tsepakina I. Forbush Effects Associated with Disappeared Solar Filaments // Atmosphere. – 2025. – V. 16. – Article ID 735. – 8 pp.
- 24*. Abunina M. A., Shlyk N. S., Belov A. V., Belov S. M., Abunin A. A. On the features of great Forbush effect during May 2024 extreme geomagnetic storm // Advances in Space Research. – 2025. – V. 76. – I. 12. – P. 7578–7586.

Цитируемая литература

1. Forbush, S.E., On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // Phys. Rev. – 1937 – V. 51. – P. 1108–1109.
2. Barnden L.R. The large-scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases // Proc. 13th Int. Cosmic Ray Conf., Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1277–1282.
3. Belov A. V., Eroshenko. E. A., Oleneva V. A., Struminsky A. B., Yanke V. G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. – 2001 – V. 27. – N. 3. – P. 625–630.
4. Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. – 2000. – V. 93. – N. 1–2. – P. 55–77.
5. Richardson I.G., Wibberenz G., and Cane H.Y. The relationship between recurring cosmic ray depressions and corotating solar wind streams at ≤ 1 AU: IMP 8 and Helios I and 2 anticoincidence guard rate observations // J. Geophys. Res. – 1996. –V. 101. – P. 13483 – 13496.
6. Иванов К.Г. Солнечные источники межпланетных ударных волн // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – №3. – С. 24–31.
7. Behannon K.W., Burlaga L.F., and Hewish A., Structure and evolution of compound streams at less than or equal to 1 AU // J. Geophys. Res. – 1991. – V. 96. – P. 21213–21225.
8. Burlaga L.F., Plunkett S.P., St. Cyr O.C. Successive CMEs and complex ejecta // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107. – № A10. – P. SSH 1-1–SSH 1-12.
9. Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., Bougeret J.L. Radio signatures of coronal mass ejection interaction: Coronal mass ejection cannibalism? //– Astrophys. J. – 2001. – V. 548. – № 1. – P. L91–L94.
10. Lugaz N., Temmer M., Wang Y., Farrugia C.J. The Interaction of successive Coronal Mass Ejections: a review // Solar Phys. – 2017. – V. 292. – Article ID 64. – 37 pp.
11. Mäkelä P., Gopalswamy N., Xie H., Mohamed A. A., Akiyama S., Yashiro S. Coronal hole influence on the observed structure of interplanetary CMEs // Solar Phys. – 2013. – V. 284. – P. 59–75.
12. Rodkin D.G., Shugay Y.S., Slemzin I.S., and Veselovsky V.A., Interaction of high-speed and transient fluxes of solar wind at the maximum of solar cycle 24 // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2016. – V. 43. – № 9. – P. 287–290.
13. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58. – № 3. – С. 374–389.
14. Hajra R., Sunny J.V., Babu M., Nair A.G. Interplanetary sheaths and corotating interaction regions: A comparative statistical study on their characteristics and geoeffectiveness // Solar Phys. – 2022. – V. 297. – Article ID 97. – 19 pp.