

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

На правах рукописи

Шлык Наталия Сергеевна

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

Специальность 1.3.1 –
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Анатолий Владимирович Белов

Москва – 2025

Оглавление

Список использованных сокращений	4
Введение.....	6
Глава 1. Форбуш-эффекты в галактических космических лучах.....	21
1.1 Теоретическое описание.....	21
1.2 Инструменты и методы исследования вариаций космических лучей и Форбуш-эффектов	26
1.3 Основные характеристики Форбуш-эффектов.....	30
1.3.1 Различия в профилях Форбуш-эффектов.....	30
1.3.2 Количественные характеристики Форбуш-эффектов	33
1.3.3 Развитие Форбуш-эффектов во времени	37
1.3.4 Радиальная зависимость величины Форбуш-эффектов	41
1.4 Выводы по Главе 1	48
Глава 2. Возмущения солнечного ветра.....	50
2.1 Межпланетные возмущения, связанные с распространением корональных выбросов массы	50
2.1.1 Общая характеристика.....	50
2.1.2 Скорости и распространение МКВМ.....	52
2.1.3 МКВМ и модуляция космических лучей.....	58
2.1.4 МКВМ и протонные возрастания	60
2.2 Межпланетные возмущения, вызванные воздействием высокоскоростных потоков из корональных дыр	62
2.2.1 Общая характеристика.....	62
2.2.2 Геоэффективность КОВ и ВСП	63
2.3 Взаимодействующие возмущения солнечного ветра	66
2.4 Выводы по Главе 2	71
Глава 3. Характеристики Форбуш-эффектов, вызванных различными взаимодействующими возмущениями солнечного ветра	73
3.1 Изолированные события.....	78

3.2 Пары следующих друг за другом межпланетных корональных выбросов массы (ICME1+ICME2)	79
3.3 Пары межпланетного коронального выброса массы и следующего за ним высокоскоростного потока из корональной дыры (ICME+HSS)	84
3.4 Межпланетные возмущения, вступившие во взаимодействие до прибытия к Земле	87
3.5 Пары взаимодействующих высокоскоростных потоков из корональных дыр (HSS1+HSS2)	91
3.6 Результаты применения метода наложения эпох для разных групп событий..	93
3.7 Аномальная модуляция потока космических лучей под воздействием взаимодействующих межпланетных возмущений в сентябре 2014–феврале 2015 гг.	96
3.8 Экстремальные события мая 2024 г., вызванные взаимодействующими межпланетными возмущениями	99
3.9 Выводы по Главе 3	109
Заключение	110
Литература	112

Список использованных сокращений

ACE – Advanced Composition Explorer

CH – coronal hole

CIR – corotating interaction region

CME – coronal mass ejection

DBEM – Drag-Based Ensemble Model

EAM – Effective Acceleration Model

FD – Forbush decrease

FEID – Forbush-effects and Interplanetary Disturbances

GCS – Graduated Cylindrical Shell

GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite

GSM – Global survey method

HCS – heliospheric current sheet

HSS – high-speed stream

ICME – interplanetary coronal mass ejection

LASCO – Large Angle and Spectrometric Coronagraph

MC – magnetic cloud

PSP – Parker Solar Probe

SDO – Solar Dynamics Observatory

SIR – stream interaction region

SMDC – Solar Monitoring Data Center

SOHO – Solar and Heliospheric Observatory

Solo – Solar Orbiter

АО – активная область

ВСП – высокоскоростной поток

ГА – геомагнитная активность

ГКЛ – галактические космические лучи

КА – космический аппарат

КВМ – корональный выброс массы

КД – корональная дыра

КЛ – космические лучи

КОВ – коротирующая область взаимодействия

МКВМ – межпланетный корональный выброс массы

ММП – межпланетное магнитное поле

МО – магнитное облако

НМ – нейтронный монитор

СВ – солнечный ветер

СПС – солнечное протонное событие

ФП – Форбуш-понижение

ФЭ – Форбуш-эффект

Введение

Форбуш-эффекты (ФЭ) – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра [61-63, 69-70, 119]. Главными источниками ФЭ являются корональные выбросы массы (КВМ), создающие спорадические ФЭ, и высокоскоростные потоки (ВСП) плазмы из корональных дыр (КД), которые, вращаясь вместе с Солнцем, создают рекуррентные ФЭ [91, 215]. 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, 20-21, 65, 83-84, 131-132, 165-166, 174-175, 237, 258-259 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, обработанных методом глобальной съёмки (GSM) [11] для частиц с жесткостью 10 ГВ, за длительный период с 1995 по 2024 гг. Рассмотрены события, вызванные различными структурами СВ, описаны их основные характеристики и отличительные особенности, установлены связи между наблюдаемыми параметрами КЛ, межпланетной среды и геомагнитной активности [6-8, 12-15, 32-35, 41-49, 51-52, 73-76, 156, 179, 181-182, 227-228].

Актуальность исследования определяется тем фактом, что галактические КЛ очень чувствительны к изменению свойств плазмы солнечного ветра, и 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.

Целью диссертационного исследования является 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 гг.
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 соответствующих им ФЭ.

5. Изучение влияния вида и характера взаимодействия крупномасштабных структур СВ на геомагнитную активность.

Научная новизна

- На большом статистическом материале для периода с 1995 по 2024 гг. установлены характерные особенности и описаны различия Форбуш-эффектов, вызванных крупномасштабными возмущениями солнечного ветра (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 солнечного ветра, которые следует считать изолированными или взаимодействующими.
- На основе статистического и сравнительного анализа впервые установлено, что в зависимости от вида и характера взаимодействия структур солнечного ветра параметры сопутствующих Форбуш-эффектов и геомагнитной активности 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 космические лучи и продуцировать рост геомагнитной активности.
- Проанализировано поведение некоторых временных параметров Форбуш-эффектов для взаимодействующих событий и впервые установлено, что средние времена регистрации минимума Форбуш-эффекта, а также максимума скорости солнечного ветра и модуля индукции межпланетного магнитного поля значительно меньше, чем для изолированных событий, т.е. вторые события из взаимодействующих пар не дают полностью развиться первым, обрезают их.

Научная и практическая значимость работы

- I. Полученные зависимости характеристик Форбуш-эффектов от вида и параметров изолированных и взаимодействующих возмущений солнечного ветра 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 космических лучей.
- II. Установленные связи параметров изолированных и взаимодействующих возмущений солнечного ветра с последующими вариациями плотности и анизотропии космических лучей и геомагнитной активности могут быть использованы для улучшения прогнозов геоэффективности солнечных источников межпланетных возмущений и состояния космической погоды.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к применению в:

- 1) области физики космических лучей и солнечно-земных связей;
- 2) исследовании влияния космической погоды на различные аспекты деятельности человека с целью снижения рисков возникновения катастрофических явлений;
- 3) научно-методической работе со студентами ВУЗов соответствующих специальностей.

Методы исследования

- анализ литературы по теме исследования;
- систематизация и обобщение сведений;
- аналогия;
- классифицирование;
- статистические методы;
- метод глобальной съемки;
- метод кольца станций;
- метод наложения эпох.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствование и обновление созданных в ИЗМИРАН баз данных: вариаций космических лучей; солнечных вспышек; корональных выбросов массы; транзитных 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. Полученные результаты прошли апробацию в работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН с положительным результатом.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Ее 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 основные инструменты и методы исследования. Выделены и описаны основные количественные характеристики ФЭ, которые могут быть рассчитаны при обработке данных мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки. Описаны временные характеристики наиболее типичных событий ФЭ и установлены различия в профилях и экстремальных значениях параметров ФЭ, вызванными разными типами межпланетных возмущений. Проанализирована радиальная зависимость величины ФЭ по данным космических аппаратов Helios на расстояниях 0.28–1 а.е.

Во второй главе рассмотрены основные особенности различных типов возмущений солнечного ветра, связанных с корональными выбросами массы, высокоскоростными потоками из корональных дыр. Описаны особенности распространения КВМ, последствия их воздействия на галактические космические лучи, а также обсуждены связанные с ними протонные возрастания. Приведены примеры воздействия коротирующих областей взаимодействия и высокоскоростных потоков плазмы на околоземное космическое пространство (в частности, изменение потока высокоэнергичных магнитосферных электронов, характеристик Форбуш-эффектов). Описано существование сложных, оказывающих влияние друг на друга, структур солнечного ветра и определены критерии отбора взаимодействующих и изолированных межпланетных возмущений.

Третья глава посвящена изучению характеристик Форбуш-эффектов и геомагнитной активности, 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. Приведены примеры проявлений эффектов взаимодействующих возмущений СВ, установлены их причины и последствия воздействия на модуляцию КЛ и геомагнитную активность в аномальные периоды сентября 2014 – февраля 2015 гг. и мая 2024 г.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Личный вклад автора

Автор инициировала постановку задач исследования, участвовала в решении методических вопросов. Автор самостоятельно провела отбор событий, обработку полученных данных и анализ экспериментального материала, участвовала в обсуждении и интерпретации всех полученных результатов. Автор внесла значительный вклад в расширение и улучшение баз данных, созданных в ИЗМИРАН и используемых при написании диссертации. Автор принимала активное участие в подготовке докладов и написании статей по теме исследования на русском и английском языках, а также представляла их на российских и международных конференциях. При подготовке совместных публикаций полученных результатов вклад автора сопоставим или превосходит вклад других участников исследования.

Публикации

Соискатель имеет 66 опубликованных работ, из них по теме диссертации 32 научные работы общим объёмом 20.43 авторских листов, из которых 22 входят в список SCOPUS, 21 – в Web of Science. В том числе 14 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций [1-14*], 10 работ в зарубежных научных изданиях [15-24*]; 8 работ опубликовано в материалах всероссийских и международных конференций [25-32*]:

- 1*. Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Ерошенко Е.А., Абунин 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.
- 2*. 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 аэрономия. – 2021. – Т. 61. – № 6. – С. 694-703.
- 3*. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин 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.
- 4*. 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 аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 3. – С. 283-301.
- 5*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ραραϊοαννου Α. Форбуш-эффекты, наблюдавшиеся на космических аппаратах миссии HELIOS // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 456-463.
- 6*. Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белова Е.А., Абунин А.А., Παπαϊοαννου Α. 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.
- 7*. 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.

- 8*. 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.
- 9*. 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.
- 10*. 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.
- 11*. 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.
- 12*. 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.
- 13*. 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.
- 14*. 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.
- 15*. 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. – 2022. – V. 8. – N 6. – Article ID 7. – 15 pp.

- 16*. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Belova E., Abunin 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.
- 17*. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin 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.
- 18*. 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. – 2022. – V. 511. – N 4. – P. 5897-5908.
- 19*. 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.
- 20*. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abunin A., Papaioannou A., Richardson I. 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. – I. 3. P. 4652–4668.
- 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 Phys. – 2024 – V. 299. – Article ID 164. – 15pp.
- 22*. Mavromichalaki H., Papailiou M.Ch., Livada M., Gerontidou M., Paschalis 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. – ID 1033. – 17 pp.
- 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. – in press. – 9 pp.
- 25*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты, вызванные взаимодействующими возмущениями солнечного ветра // Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой: сб. науч. тр. / Климатические риски и космическая погода. – Иркутск, 2021. – С. 28-29.
- 26*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Геоэффективность парных взаимодействующих возмущений солнечного ветра // Труды XXV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца: сб. науч. тр. / Солнечная и солнечно-земная физика. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 317-320.
- 27*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Оценка транзитной скорости и времени распространения корональных выбросов массы по солнечным данным // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. – Иркутск, 2022. – С. 138-140.
- 28*. Abunina M.A., Belov A.V., Shlyk N.S., Belova E.N., Abunin A.A. Solar energetic particle events and geomagnetic disturbances driven by the same solar sources // *Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of VIII International Conference.*: сб. науч. тр. / Kaliningrad, 2023. – С. 14-17.
- 29*. Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. An empirical model for estimating ICMEs speeds and delays // *Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of VIII International Conference.*: сб. науч. тр. / – Kaliningrad, 2023. – С. 20-24.
- 30*. Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов А.В., Белов С.М., Абунин А.А. О наиболее интересных событиях в солнечном ветре и космических лучах в 2023–2024 гг // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной

физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024. – С. 5-7.

- 31*. Белов С.М., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А. База данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024. – С. 14-16.
- 32*. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Вспышки, выбросы и прогноз протонных возрастных // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024. – С. 99-101.

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 погоды», 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
- COSPAR 2022 – 44th Scientific Assembly – 16-24 July 2022 (online), Greece, Athens
- 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 гелиогеофизических 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

Глава 1. Форбуш-эффекты в галактических космических лучах

1.1 Теоретическое описание

Форбуш-эффекты (ФЭ) изначально были определены, как явление снижения интенсивности космических лучей (КЛ), происходящее во время магнитной бури, которое было обнаружено при помощи данных ионизационных камер [94, 119-120, 141, 147]. Однако позже были внесены уточнения. Так, сам С. Форбуш несколько лет спустя, анализируя данные по горизонтальному магнитному полю и КЛ на ст. Нуансауо за длительный период с 1937 по 1952 годы указывает на то, что большинство понижений интенсивности КЛ во время геомагнитных возмущений не позволило обнаружить количественных характеристик, хорошо коррелирующих между собой [121]. К аналогичным выводам, изучая отдельные события, затем пришли и другие авторы, например, [55, 112-113, 246].

В настоящее время хорошо известно, что ФЭ наблюдаются и при достаточно спокойных геомагнитных условиях, причем не только внутри земной магнитосферы. Существует ряд работ описывающих подобные явления, например, на Марсе [125, 199] и Луне [92, 236]. Кроме того, в последние десятилетия ФЭ были зарегистрированы на различных космических аппаратах вдали от каких-либо планет и их магнитосфер [75, 95, 110, 160, 204], на расстояниях до 50 а.е. по данным космических аппаратов Helios, Ulysses, Voyager, Pioneer и PAMELA.

Вышеприведенное определение ФЭ не было полным с самого начала и в настоящее время полностью устарело, но и предложенные вместо него в своем большинстве неудовлетворительны. Приведем широко распространенные определения Форбуш-эффектов из разных энциклопедий:

1) «иногда случающееся уменьшение интенсивности космических лучей, наблюдаемое на Земле, связанное с магнитными эффектами, вызванными солнечными вспышками» (Britannica [265]);

2) «временное снижение количества галактических КЛ, достигающих Землю, которое случается, когда распространяется межпланетное возмущение, состоящее из солнечного вещества (возможно КВМ) и предшествующей ему ударной волны» (Oxford Reference [266]);

3) «понижение интенсивности космических лучей, вызванное экранированием окрестностей Земли потоком высокоскоростной плазмы солнечного ветра» (справочник по солнечно-земной физике МГУ [267]).

Все эти определения нельзя считать полными.

В работе А. Белова и др. [69] предложено описание ФЭ, созданное на основе анализа большого количества событий, а также рассмотрения их связи с солнечными событиями, межпланетными условиями и геомагнитными возмущениями. «ФЭ, зарегистрированные на Земле, всегда являются лишь частью крупномасштабных явлений, вызванных возмущениями солнечного ветра, которое обычно начинается на Солнце и может распространяться во внешнюю гелиосферу. Это явление имеет пространственный масштаб около десятков астрономических единиц (а.е.) и временную шкалу до нескольких месяцев». В этой же работе [69] приведено следующее краткое определение ФЭ, которого мы и будем придерживаться в дальнейшем: «Форбуш-эффект – вариации плотности и анизотропии фоновых космических лучей, вызванные распространяющимися крупномасштабными возмущениями солнечного ветра».

В литературе также широко распространен термин «Форбуш-понижение» (ФП, в английском варианте *Forbush decrease* – *FD*), который будет далее рассматриваться как аналог приведенного выше определения.

Общая теория модуляции галактических КЛ (ГКЛ) солнечным ветром довольно подробно была описана в пионерской работе Е. Паркера [200]. Модуляция ГКЛ может быть описана с помощью уравнения переноса Фоккера-Планка для частиц, движущихся случайным образом в системе отсчета

мелкомасштабных магнитных неоднородностей, представленного позже в работе Е. Паркера [202]. Из уравнений, полученных в этой работе, следует, что четырьмя физическими механизмами, управляющими модуляцией ГКЛ, являются диффузия, дрейф, конвекция и потеря энергии. Считается, что плотность частиц ГКЛ в заданный момент времени в определенной точке пространства, определяется эффектами конвекции и диффузии (т.е. двумя членами стандартного уравнения Фоккера-Планка) и членом, добавленным самим Паркером, описывающим эффект адиабатического охлаждения частиц в расширяющемся объеме (или нагрев в случае сжатия).

А сами ФЭ можно рассматривать как некие нарушения в распределении ГКЛ, вызванные локальными изменениями одного или нескольких параметров переноса. На основе этих предположений и полученного уравнения переноса ГКЛ Паркера позднее также было опубликовано множество работ, касающихся различных вопросов распространения ГКЛ в гелиосфере (см., например, [55, 148, 209, 249, 257] и ссылки в них).

Модуляция ГКЛ особыми структурами в солнечном ветре активно исследовалась с 1950-х годов. Было показано, что существование на Солнце униполярных областей магнитного поля (*UM-regions*), которые впоследствии были ассоциированы с корональными дырами, приводит к выраженной 27-дневной модуляции потока КЛ [230]. Работа [186] упоминает некие «холодные облака», следующие за солнечными вспышками, которые изначально не заполнены частицами, но медленно заполняются по мере распространения в межпланетном пространстве и приводят к спорадическим ФЭ. Примерно в то же время в работе [233], упоминаются гидромагнитные неоднородности, распространяющиеся от Солнца в межпланетное пространство, которые захватывают космические лучи. Аналогичные структуры обсуждались также в работах [36-37].

Первый подробный обзор ФЭ, обсуждающий причины их возникновения, особенности развития, а также включающий теоретическое описание, был составлен Дж. Локвудом в начале 1970-х [167], где отмечается, что различные

физические модели, предложенные для объяснения ФЭ, можно разделить на классы:

(1) модели, которые зависят в первую очередь от упорядоченных электромагнитных полей в области Земля-Солнце [16, 55, 102, 128, 210];

(2) модели, основанные на эффектах неупорядоченных электромагнитных полей в области Земля-Солнце [18-19, 26, 162, 186, 233].

Отдельно стоит отметить модели, включающие распространение различного вида ударных волн, генерируемых в солнечной короне, предложенные в работах [27, 29-30, 167, 201]. Наибольшее развитие в итоге и получили модели, учитывающие и существование межпланетных электромагнитных полей различных типов, и существование распространяющихся в межпланетном пространстве ударных волн.

Примерно к 1980-м годам ученые пришли к единому мнению (см., например, [117]), что существует два основных типа возмущений солнечного ветра, оказывающих влияние на интенсивность потока КЛ: рекуррентные и спорадические. Первые связаны с воздействием высокоскоростных потоков (*high-speed streams* – HSS, или ВСП) из корональных дыр (*coronal hole* – СН или КД), имеющими примерно 27-дневную повторяемость в связи с вращением Солнца, а вторые – с распространением корональных выбросов массы (*Coronal mass ejection* – CME или КВМ) в межпланетном пространстве. Более подробное описание этих типов межпланетных возмущений приведено в Главе 2 настоящей диссертации.

Для объяснения ФЭ, вызванных КВМ, используются модели, в которых частицам разрешено проникать внутрь межпланетного КВМ (далее МКВМ или *interplanetary CME* – ICME) посредством перпендикулярной диффузии [88, 148, 189, 211] или дрейфов [155] и вращения [157].

Важным механизмом также является расширение магнитного жгута (в англоязычной литературе *flux rope*) – «тело» или основная часть МКВМ вследствие разницы давлений [100, 152], поскольку по мере увеличения размера магнитной структуры ее магнитное поле ослабевает [80, 99], что позволяет частицам КЛ пересекать её границы.

На данный момент можно с уверенностью говорить о том, что различные подструктуры МКВМ по-разному влияют на модуляцию ГКЛ [86, 91, 169, 176], довольно уверенно можно выделить следующие части (см. [98, 145] и ссылки в них): во-первых, ударная волна, от которой частицы КЛ отражаются, вызывая иногда наблюдаемое на Земле увеличение потока ГКЛ непосредственно перед приходом МКВМ; во-вторых, диффузионный барьер оболочки МКВМ, затрудняющий распространение ГКЛ, что способствует начальному уменьшению потока ГКЛ; и, в-третьих, сам магнитный жгут (тело МКВМ), предположительно действующий как движущийся в межпланетном пространстве экран или барьер для проникновения частиц ГКЛ, способствующий основному уменьшению их потока.

Модели ФЭ, основанные на перпендикулярной диффузии [88, 108, 189, 211], находятся в хорошем качественном согласии с наблюдениями, правильно отражают некоторые характеристики ФЭ, вызванных МКВМ, например, такие как симметричная форма, ограниченная пространственной протяженностью магнитного жгута и связью величины ФЭ с интенсивностью магнитного поля, размером жгута и временем прохождения МКВМ [59, 70, 78, 86, 106-107, 176], хотя все ещё есть свидетельства того, что простые диффузионные модели ФЭ не могут их полностью объяснить [98, 145].

В цикле работ А. Петуховой и др. [38-39, 206-207] предложен несколько другой механизм формирования ФЭ в движущемся магнитном облаке: функция распределения КЛ определяется потерями энергии в индукционном электрическом поле и квазизахватом в винтовом магнитном поле. Работы группы под руководством М. Алания [53, 252-253] посвящены развитию нестационарной 3D-модели ФЭ, а также восстановлению его жесткостного спектра. Помимо этого, 3D-модель ФЭ была подробно описана в работе X. Luo и др. [170].

Что касается моделирования ФЭ, связанных с воздействием коротирующих областей взаимодействия (*corotating interaction region*, CIR или КОВ), т.е. рекуррентных ФЭ, попытки их объяснения были сделаны еще в работах N. Iucci и др. [143-144]. Также следует отметить работу Я. Ричардсона и др. [215], в которой

была рассмотрена стационарная модель диффузии-конвекции, включающая адиабатическое охлаждение (и соответственно, торможение частиц ГКЛ) и продольные изменения скорости СВ. В этой модели эффект конвекции из-за внешнего потока СВ локально уравнивается внутренней диффузией ГКЛ.

Позднее проведенное в работах [153, 171] моделирование показало, что увеличенная конвекция, уменьшенная диффузия и дрейфы из-за усиления магнитного поля также могут способствовать формированию рекуррентных ФЭ. Вршник и др. [249] показали, что в этом случае достаточно учёта всего двух эффектов (в рамках конвективно-диффузионной модели распространения ГКЛ), а именно усиление эффекта конвекции, вызванного увеличением скорости СВ внутри высокоскоростного потока плазмы, и уменьшение эффекта диффузии, вызванного усилением магнитного поля и его флуктуациями внутри области взаимодействия разноскоростных потоков СВ (КОВ перед ВСП).

1.2 Инструменты и методы исследования вариаций космических лучей и Форбуш-эффектов

Основным источником данных о потоках КЛ на Земле начиная с 1940-х годов были различные ионизационные камеры, и первые сведения о долговременных вариациях КЛ и/или попытки выделения ФЭ были сделаны именно с помощью них [97, 113, 119-120, 242]. Кроме того с 1960-х годов на постоянной основе проводились баллонные измерения интенсивности потоков КЛ в стратосфере Земли [64]. Также активно использовались данные мюонных телескопов и годоскопов, например [30, 40, 116, 185, 190].

После изобретения в 1948 г. и последующего усовершенствования нейтронных мониторов (НМ) разных типов [231-232], они остаются ценным и исключительно полезным инструментом изучения потоков первичных КЛ с энергией от 400 МэВ до сотен ГэВ у поверхности Земли. Размещение этих

детекторов во многих точках земного шара началось практически сразу, и к 1957 г. уже около 60 станций было оснащено стандартными НМ модели IGY. В 1964 г. создали новый вариант детектора нейтронной компоненты КЛ – NM64, который обеспечивал гораздо лучшую статистику измерений, поэтому старые станции были постепенно переоснащены и созданы новые на основе супермониторов [139]. Сейчас данные всех НМ собираются в единую базу данных, доступную онлайн [<https://www.nmdb.eu/>], причем некоторые станции предоставляют данные в режиме реального времени.

Огромное количество работ по исследованию вариаций КЛ различной периодичности, выделению основных характеристик и изучению их связи с параметрами солнечного ветра написано именно на основе анализа данных отдельных НМ [105, 122, 178, 194, 224, 238, 244 и др.].

Обработка данных одного или нескольких НМ различными способами относится к так называемым локальным методам изучения вариаций КЛ. Наглядность – это одно из преимуществ локального метода. Так, разными авторами на протяжении уже нескольких десятилетий используется метод гармонического анализа временных рядов скорости счета НМ [123, 194, 203, 234, 243] или Фурье-анализ [104, 178, 183, 195, 222]. В этих исследованиях описаны различные особенности поведения анизотропии КЛ в разные периоды времени (в т.ч. в спокойные и во время ФЭ), энергетический спектр анизотропии, её долговременные изменения и т.д. С помощью локальных методов были описаны вторая и третья гармоника анизотропии КЛ [22, 28, 150, 154, 188, 191]. Локальный подход может быть основным (и, как минимум, важен) для изучения долгопериодных вариаций (связанных с солнечными циклами или сезонных) и для определения энергетической (жесткостной) зависимости характеристик анизотропии КЛ.

После создания вышеупомянутой единой мировой сети станций НМ, расположенных в разных точках планеты и имеющих различные жесткости геомагнитного обрезания, появилась фактически новая ветвь исследования, включающая глобальные методы изучения вариаций КЛ. Глобальные методы

изучения вариаций первичных КЛ (например, метод глобальной съемки – *Global Survey Method, GSM*) объединяют одновременные наземные наблюдения КЛ на отдельных детекторах для получения основных характеристик их вариаций за пределами атмосферы и магнитосферы Земли. В данном методе вся сеть НМ используется как единый многоканальный прибор, где в роли каждого канала выступает станция, которая получает информацию из определенного сектора, а все каналы целиком перекрывают небесную сферу. Многоканальность такого прибора обеспечивает надежность и непрерывность измерений, при этом статистическая точность сети заметно возрастает, а влияние аппаратурных эффектов существенно уменьшается. К примеру, отдельный нейтронный монитор (НМ64) обеспечивает статистическую точность 0.1-0.2 %/ч, в то время как вся сеть станций обеспечивает точность порядка $\sim 0.01\%$ /ч.

Метод глобальной съемки позволяет определить плотность (изотропную часть интенсивности) и анизотропию потока галактических КЛ за каждый час за пределами магнитосферы и атмосферы. Одна из самых первых и успешных реализаций глобального метода была создана в Якутске [23-25, 30, 57]. Практически в это же время свою методику предложили и японские исследователи [192]. Немного позже, в начале 70-х годов, модификация этого метода была разработана в ИЗМИРАН [66-67] и применена для обработки нескольких событий в октябре–ноябре 1968 г., а затем использовалась для обработки часовых данных нейтронных мониторов за весь период наблюдений. Детальное описание версии GSM, разработанной в ИЗМИРАН, приведено в работах [11, 72]. Группа иркутских исследователей разработала свою версию – глобально-спектрографический метод [17, 111], который стал самым сложным и многоцелевым из существующих в мире методов обработки данных нейтронных мониторов. Он используется для вычисления первой и второй гармоники анизотропии космических лучей и для определения вариаций планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания [17, 216].

Отдельно стоит упомянуть, что существует еще один глобальный способ исследования вариаций КЛ – это метод кольца станций, который позволяет

получать свойства углового распределения КЛ без разложения на гармоники. Он позволяет получить мгновенное (точнее, ежечасное) долготное распределение интенсивности КЛ, не прибегая к его моделированию. Данный метод основан на том, что основной вклад в скорость счета НМ вносят первичные КЛ, приходящие с достаточно узкой полосы долгот. В связи с этим для метода кольца станций используются данные не всех НМ, исключаются высокоширотные (приполярные), низкоширотные и высокогорные станции. Подробное описание метода кольца станций, его особенности, ограничения и применимость подробно описаны в работах [4, 5, 50].

Есть и другой метод, похожий на описанный выше метод кольца станций, но реализованный для меньшего числа высокоширотных станций, входящих в проект Spaceship Earth (<https://neutronm.bartol.udel.edu/>). Этот метод рассчитывает ежечасное питч-угловое распределение интенсивности КЛ и также позволяет наблюдать предвестники приближающихся межпланетных возмущений. Оба упомянутых метода сейчас реализованы в реальном времени, ознакомиться с результатом их работы можно по ссылкам <https://crst.izmiran.ru/crdt/circles.html?days=5> и <https://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/losscone/losscone.html>.

В течение первых нескольких десятилетий исследований потока КЛ и ФЭ, в частности, вся необходимая информация предоставлялась наблюдениями на Земле. Затем, в космическую эпоху, наблюдения КЛ с космических аппаратов (например, [180]) предоставили возможность изучения ФЭ вдали от Земли, включая их радиальную зависимость. Например, принимая во внимание наблюдения во внешней гелиосфере, авторы работ [96, 204] исследовали ФЭ на расстояниях до 50 а.е., используя данные космических аппаратов Ulysses, Voyager и Pioneer. Недавние миссии на орбите Марса и его поверхности позволили по-новому взглянуть на ФЭ, регистрируемые на других планетах [124, 136, 199].

Проводимые сейчас наблюдения во внутренней гелиосфере, например, солнечный зонд Parker Solar Probe (PSP) и солнечный орбитальный аппарат Solar Orbiter (SolO) обещают дать новое понимание радиальной зависимости вариаций

КЛ и ФЭ. Например, первые ФЭ, выявленные по измерениям SolO, были зарегистрированы в апреле 2021 г. [125] и в июне-июле того же года [54]. О первоначальных наблюдениях галактических и аномальных космических лучей с помощью PSP сообщили [212]. Однако для последних аппаратов, например, еще не накоплена достаточная статистика, поэтому данные многолетней, хоть и довольно старой миссии Helios (с конца 1974 до начала 1985 г.), по-прежнему остаются одним из лучших источников информации о межпланетных возмущениях и вариациях КЛ между Солнцем и орбитой Земли. Подробнее о результатах исследования ФЭ, зарегистрированных аппаратами Helios изложено в разделе 1.3.4.

1.3 Основные характеристики Форбуш-эффектов

1.3.1 Различия в профилях Форбуш-эффектов

Казалось бы, запуск космических аппаратов и изучение ФЭ вне планетарной магнитосферы, создание более совершенных инструментов исследования потока КЛ позволят всесторонне изучить обсуждаемые явления. Тем не менее, достаточно полных ответов на вопросы, касающиеся величины эффектов, их классификации, взаимосвязи с параметрами солнечного ветра или индексами геомагнитной активности и пр. все еще нет. Скорее, наоборот, дальнейшие исследования показывают сложность и многообразие вариаций потоков КЛ под воздействием различных межпланетных возмущений, особенно, учитывая, что далеко не всегда известно, что именно является источником конкретного события, и к какому типу оно относится. Более того, многие события имеют смешанную природу, т.е. в их создании участвуют и корональные выбросы масс, и потоки плазмы из корональных дыр.

Как правило, каждый Форбуш-эффект состоит из двух основных частей: фазы спада (основная) и фазы восстановления, в течение которых плотность потока ГКЛ сначала убывает, а затем возвращается к первоначальному значению. Однако стоит отметить, что нередко наблюдаются ФЭ с более сложным профилем, содержащие предвозрастания или предпонижения перед началом основной фазы [68, 103, 158, 198] или довольно значимые изменения плотности КЛ внутри основного эффекта спада. На рис. 1 приведено изображение типичных ФЭ, вызванных воздействием различных структур СВ, в частности, МКВМ (верхняя панель) и ВСП из КД (нижняя панель).

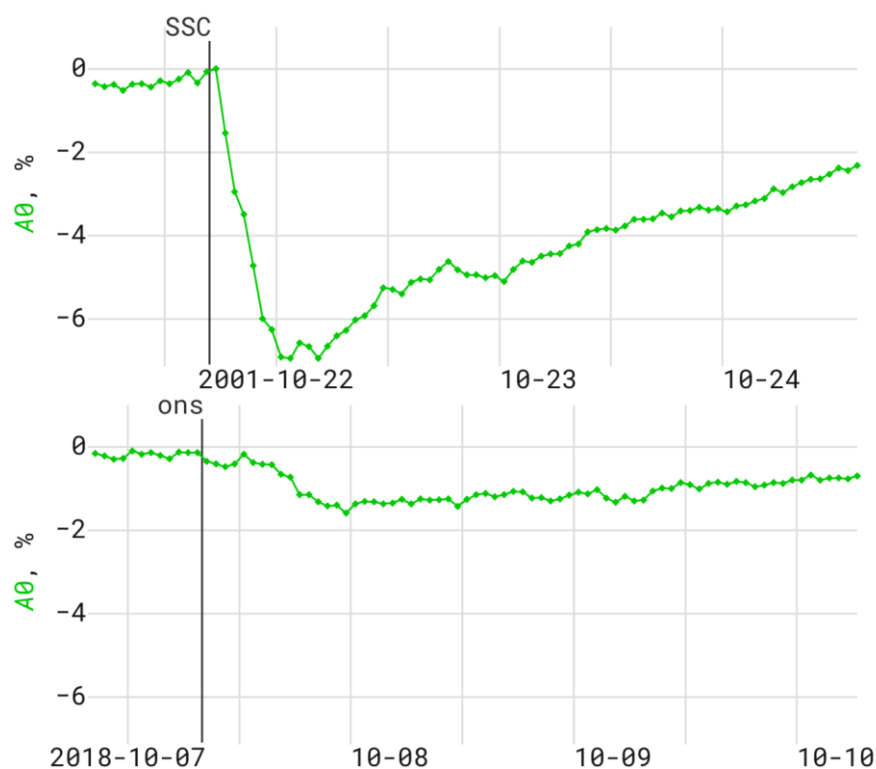


Рисунок 1 – Типичное поведение плотности ГКЛ (A_0) во время ФЭ: событие, связанное с воздействием МКВМ (вверху) и ВСП из КД (внизу).

Еще в начале исследования ФЭ в ряде работ [34, 86, 91, 106-107, 161] было показано, что распространяющиеся в межпланетном пространстве МКВМ вызывают ассиметричные эффекты большой амплитуды, которые характеризуются резким и довольно глубоким (до десятка %) понижением интенсивности КЛ. В свою очередь, высокоскоростные потоки из КД, а точнее, область взаимодействия высокоскоростного потока и спокойного солнечного

ветра (КОВ, уже упомянутые ранее) являются причиной меньших ФЭ с более симметричным и плавным профилем [31, 33, 35, 58, 70, 143, 217, 235].

Более глубокий эффект снижения интенсивности потока КЛ наблюдается, когда ударная волна, сформированная в переднем крае возмущения, распространяющегося в сторону Земли, производит двухступенчатое понижение (так называемый «классический Форбуш-эффект») [62, 89, 91, 219, 223, 257]. Впервые такой профиль ФЭ был описан в работах Л. Барндена [62-63] на основе нескольких событий в период с 1966 по 1972 гг. Автор предположил, что двухступенчатый профиль получается в результате модуляции ГКЛ сначала ударной волной (область взаимодействия – *Sheath*), а затем телом МКВМ, т.е. ударная волна создает первую ступень понижения, а вторая ступень возникает за тангенциальным разрывом в главной части возмущения. Следующим большим вкладом в изучение двухступенчатой структуры ФЭ является работа Р. Сандерсона и коллег [223], в которой было проанализировано большее число событий, связанных с магнитными облаками (особая структура внутри МКВМ, подробнее см. раздел 2.1 диссертации). Авторы показали, что и само магнитное облако, и ударная волна создают трудно проходимый барьер для космических лучей.

Действительно, область ударной волны представляет собой область возмущенных условий и сильно флуктуирующих магнитных полей перед основной частью МКВМ и магнитно связана с окружающим межпланетным пространством. Магнитная структура внутри самого МКВМ (магнитный жгут) не связана магнитно с окружающей плазмой и характеризуется плавно изменяющимся магнитным полем (см., например, обзор [151] и ссылки в нем).

В работе Х. Кейн с соавторами [86] также был сделан вывод, что и область взаимодействия, и расширяющееся магнитное облако могут вызвать понижение интенсивности ГКЛ. Затем это исследование продолжилось, и в последующих статьях (напр., [89]) авторы разделили все ФЭ на четыре класса, основываясь на характеристиках межпланетной среды, а не на данных о профиле ФЭ. Позже появились более полные обзоры, касающиеся двухступенчатой структуры ФЭ [91,

257]. Однако в работе [149] при исследовании соответствующих эффектов в космических лучах от 233 МКВМ было показано, что только малая их часть (13 событий) укладываются в двухступенчатую модель ФЭ, что приводит к необходимости дальнейшего исследования этого вопроса.

1.3.2 Количественные характеристики Форбуш-эффектов

Несмотря на описанное выше многообразие ФЭ, существует определенный набор параметров, использование которых позволяет получить представление о физической природе наблюдаемых явлений. 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, и обычно для оценки различных модуляционных эффектов достаточно использовать три первые гармоники (нулевую, первую и вторую), а для наших задач достаточно и первых двух (нулевой гармоники, которая будет отражать изменения плотности потока КЛ, и первой гармоники, отвечающей за составляющие векторной анизотропии потока КЛ). В рамках данной работы будут использованы результаты обработки данных мировой сети нейтронных мониторов (для частиц жесткостью 10 ГВ) с помощью метода глобальной съемки, подробно описанного в работах А. Белова с коллегами [11, 72] и диссертации А. Абунина [1].

На рис. 2 ниже приведен пример ФЭ, зарегистрированного 23 марта 2023 г. мировой сетью НМ и обработанного методом GSM. Зеленая кривая – поведение плотности потока КЛ (A_0 , жесткость 10 ГВ), голубые столбики на ней – величины северо-южной составляющей анизотропии КЛ (A_z), розовые столбики – величина экваториальной составляющей анизотропии КЛ (A_{xy}). Сцепленные стрелки в верхней части рисунка отражают поведение векторной анизотропии в событии.

Также на рисунке показаны основные количественные характеристики ФЭ, которые будут рассматриваться в дальнейшем: AF – магнитуда или максимальная вариация плотности КЛ; $Dmin$ – максимальное часовое уменьшение плотности КЛ в данном событии (максимальный часовой декремент); а также Ax_{max} – максимальная величина экваториальной составляющей анизотропии КЛ и Az_{range} – максимальная в событии разность величин северо-южной составляющей анизотропии КЛ. Желтым заштриховано время прохождения мимо Земли магнитного облака, t_{min} указывает на время регистрации минимума плотности КЛ, t_{end} – длительность всего события. Подробное описание поведения этих и других параметров в «среднестатистическом ФЭ» будет приведено ниже.

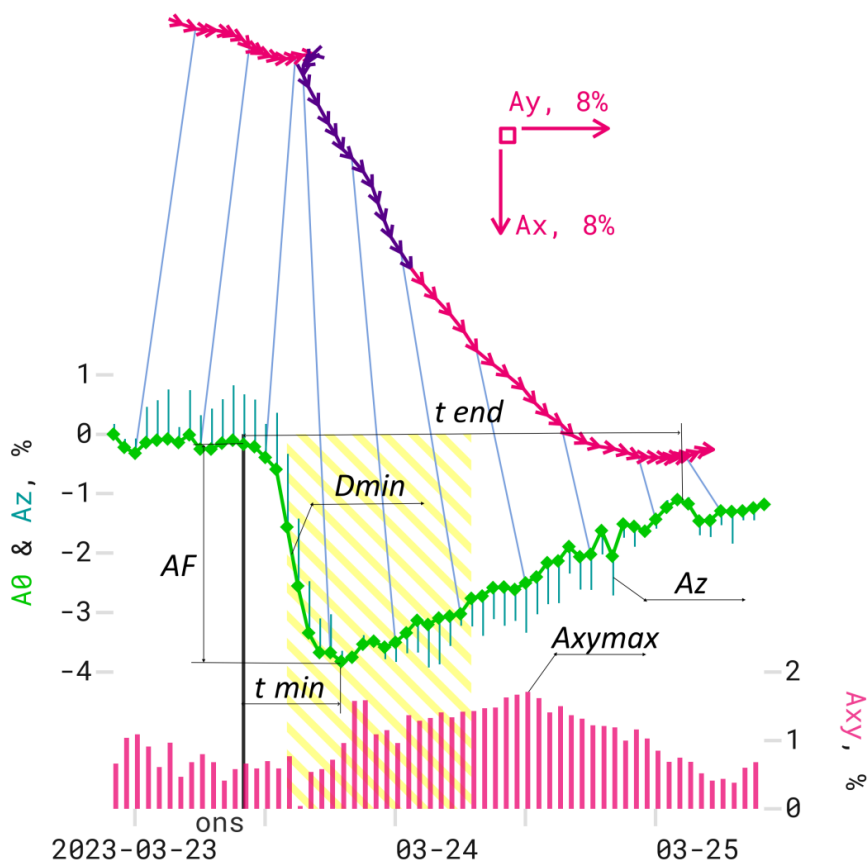


Рисунок 2 – ФЭ, зарегистрированный 23 марта 2023 г.

Дальнейший анализ основывается на событиях, содержащихся в базе данных ФЭ и межпланетных возмущений (Forbush-effects and Interplanetary Disturbances – FEID, <https://tools.izmiran.ru/feid>), созданной и поддерживаемой сотрудниками ИЗМИРАН в течение уже многих лет (см. подробное описание в дисс. [1]), которая непрерывно пополняется данными о новых событиях и сейчас

доступна в виде онлайн-инструмента с удобным интерфейсом [14]. Используемая база данных FEID помимо параметров КЛ для частиц с жесткостью 10 ГВ, также включает данные по различным параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры СВ и ММП взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), а также с соответствующих сайтов: список ударных волн – http://isgi.unistra.fr/data_download.php, корональных выбросов массы – https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, вспышек – <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>, корональных дыр – https://solen.info/solar/coronal_holes.html.

Используемая база данных содержит 8535 событий ФЭ с июля 1957 г. по декабрь 2022 г. включительно. Ниже будут приведены сводные графики и диаграммы, отражающие изменение упомянутых выше количественных характеристик всех этих ФЭ.

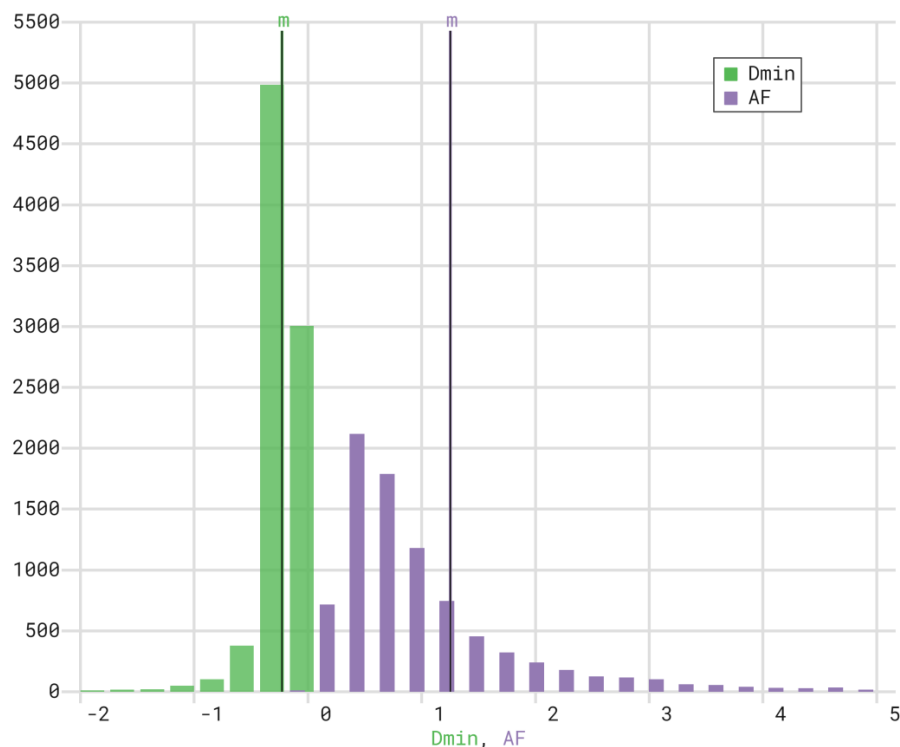


Рисунок 3 – Количество событий с различными значениями величин, характеризующих поведение потока КЛ во время ФЭ. Из соображений масштаба на рисунке не приведены 218 ФЭ с $AF \geq 5\%$ и 17 ФЭ с $Dmin \leq -2\%$.

На рисунке 3 приведено соотношение между основными величинами, характеризующими поведение потока КЛ во время ФЭ, а именно магнитуда ФЭ –

AF, и максимальное часовое понижение плотности КЛ – D_{\min} . Все эти величины измеряются в %. Из гистограммы видно, что величина ФЭ в большей части событий (60%) не превышает 1%, а среднее значение AF составляет $1.25 \pm 0.016\%$. При этом за 65 лет наблюдений было зарегистрировано всего 28 ФЭ магнитудами $\geq 10\%$, а самый большой ФЭ составляет 26.2% (29.10.2003 г.). Таким образом, ФЭ величиной более 1% уже следует считать значимыми, а ФЭ величинами 3–5% – большими. Величина D_{\min} меняется в еще более узких пределах, за весь исследуемый период лишь в 17 ФЭ были зарегистрированы значения $\leq -2\%$, среднее значение максимального часового понижения плотности КЛ составляет $-0.23 \pm 0.002\%$.

На рисунке 4 приведены распределения, полученные для характеристик векторной анизотропии КЛ: максимальная величина экваториальной составляющей анизотропии КЛ в событии – Ахумах и максимальная в событии разность величин северо-южной составляющей анизотропии КЛ – Azrange.

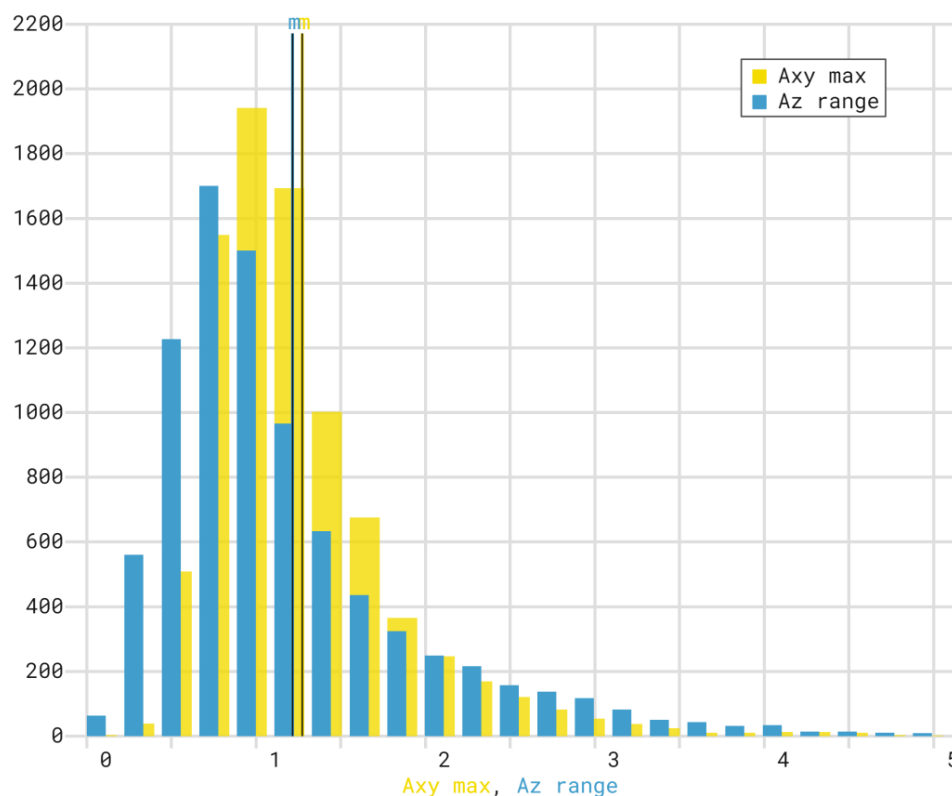


Рисунок 4 – Количество событий с разными значениями величин экваториальной и северо-южной составляющих векторной анизотропии КЛ. Из соображений масштаба на рисунке не приведены 15 ФЭ с $Ax_{\max} \geq 5\%$ и 20 ФЭ с $Az_{\text{range}} \geq 5\%$.

Величины экваториальной и северо-южной составляющих векторной анизотропии КЛ от события к событию также меняются в небольших пределах (практически всегда не превышают 5%), а в подавляющем большинстве событий (90%) имеют значения $\leq 2\%$. Средние значения Ахумах и Azrange составляют 1.27 ± 0.007 и $1.22 \pm 0.009\%$ соответственно. В диссертации М. Абуниной [3] и работе [10] показано, что для спокойного СВ типичная величина экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ около 0.53%. Поэтому увеличение значений Ахумах в событии до величин порядка 1% уже свидетельствует о наличии какого-либо межпланетного возмущения.

1.3.3 Развитие Форбуш-эффектов во времени

Кроме величины вариаций плотности и анизотропии КЛ, важной характеристикой ФЭ является также временной профиль понижения и восстановления интенсивности КЛ. Временное развитие каждого такого события в общем можно охарактеризовать продолжительностью основной фазы ФЭ – фазы спада (интервал времени между началом события и моментом регистрации максимального понижения плотности КЛ) и продолжительностью фазы восстановления (время от минимума плотности КЛ до конца существенных изменений плотности, обусловленных данным межпланетным возмущением, или же до начала следующего события). На рисунке 2 (см. выше) приведен пример ФЭ, на котором эти временные параметры обозначены как t_{\min} – длительность основной фазы ФЭ, t_{end} – продолжительность всего события.

Время восстановления плотности КЛ зависит, прежде всего, от размеров возмущения, его скорости распространения в межпланетном пространстве, а также места попадания Земли в это возмущение. В работе [168] было показано, что время восстановления ФЭ практически не зависит от энергии (жесткости) частиц; его величина варьируется от 3 до 10 дней, при этом фаза восстановления

хорошо описывается экспоненциальным законом, а среднее значение времени восстановления (5 дней) постоянно на различных фазах солнечного цикла.

На рисунке 5 приведено распределение длительности основной фазы ФЭ (t_{min}) и всего события (t_{end}) для вышеупомянутых 8535 событий. Плотность КЛ достигает своего минимального значения чаще всего в первые сутки после начала (в 64% всех событий) и средняя продолжительность основной фазы ФЭ составляет 23 ч. Также хорошо видно, что общая продолжительность всех событий не превышает 80 часов (около 3.5 суток), но следует уточнить, что отдельные ФЭ могли бы иметь и более длительную фазу восстановления, однако очень часто этот процесс нарушается, поскольку регистрируется новое межпланетное возмущение, вызывающее, соответственно, новый ФЭ. Поэтому мы будем считать, что в эти первые 3.5 дня укладываются все наиболее значительные изменения в поведении плотности и анизотропии КЛ. Средняя продолжительность событий при этом составляет всего 37.63 ч (т.е. чуть более 1.5 суток), и порядка 40% всех событий заканчиваются ранее 2-х дней, что, по-видимому, связано с наложением следующих ФЭ, возникающих в результате взаимодействия различных межпланетных возмущений, следующих друг за другом. Подробнее о таких событиях изложено в Главе 3 настоящей диссертации.

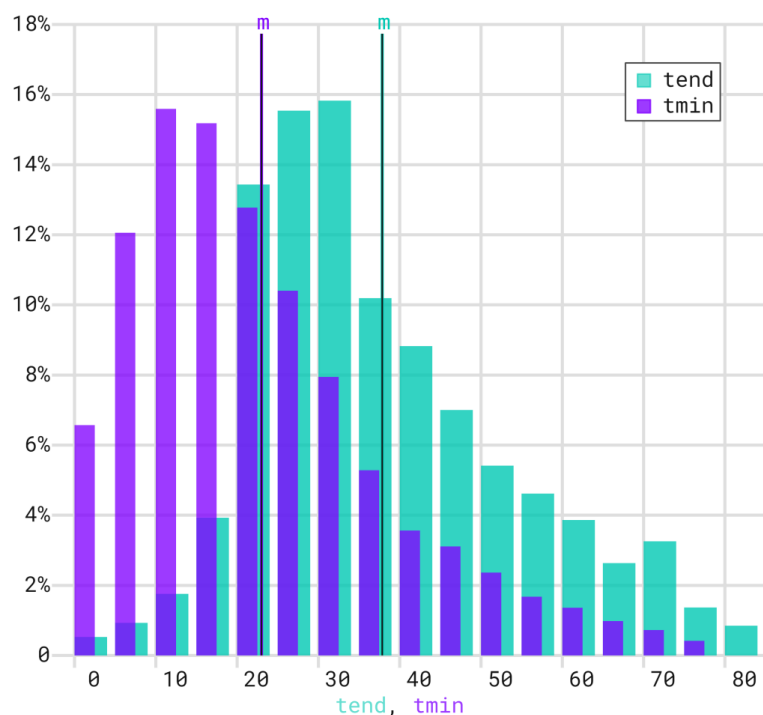


Рисунок 5 – Распределение величин t_{min} и t_{end} для исследуемых 8535 событий.

В работах [87, 143] отмечалось, что время восстановления зависит от гелиодолготы солнечного источника. В работе [2] также исследовалось развитие Форбуш-эффектов с 1976 по 2010 гг. в зависимости от гелиодолготы солнечных вспышек, ассоциированных с источниками модуляции КЛ, и было показано, что:

- а) события от восточных источников имеют протяженную фазу спада (для далеких восточных источников – от одних до трех суток, для более близких источников – около суток), восстановление происходит медленно;
- б) ФЭ, связанные с центральными источниками, отличаются малым временем спада (несколько часов);
- в) события от западных источников небольшие, быстрые и короткие (понижение не успевает развиваться полностью, так как Земля быстро выходит из возмущенной области).

В ряде работ была описана связь временного профиля ФЭ как со скоростью потока из корональных дыр, например [143], так и со скоростью распространения МКВМ [58-59, 205]. Автором диссертации в работах [32, 182] также исследовалось поведение различных временных параметров, характеризующих эффекты Форбуша, для событий 1997-2017 гг. Анализ полученных распределений показал, что для ФЭ, связанных с разными типами солнечных источников, наблюдаются заметные различия в развитии событий. Например, понижение интенсивности КЛ в группе событий СМЕ1 (связанных с КВМ из активных областей) происходит быстрее, и минимум (более глубокий) достигается несколько раньше, чем в группе событий СМЕ2 (связанных с волоконными выбросами вне активных областей) и значительно раньше, чем в группе событий СН (связанных с ВСП из КД). Интервал времени от начала ФЭ до максимального часового уменьшения плотности КЛ, в среднем, для группы СМЕ1 в два раза меньше, чем для группы СМЕ2, и в три раза меньше, чем для группы СН.

Рисунок 6 показывает временное развитие среднего события в группах СМЕ1, СМЕ2 и СН. Из рисунка видно, что для ФЭ, связанных с различными типами солнечных источников, наблюдается как сходство, так и заметные различия во временном развитии. Однако, максимальные значения различных параметров, таких как часовое уменьшение плотности (D_{min}) и экваториальная

анизотропия КЛ ($A_{\text{хmax}}$), а также максимальные скорость СВ (V_{max}) и индукция ММП (B_{max}) во всех трех группах наблюдаются на основной фазе развития ФЭ (в течение первых 15 часов от начала события). Исключение составляет скорость СВ в группе СН, достигающая, в среднем, своего максимального значения уже на фазе восстановления КЛ. Понижение интенсивности КЛ в группе СМЕ1 развивается быстрее, и минимум (более глубокий) достигается несколько раньше, чем в группе СМЕ2, и значительно раньше, чем в группе СН. Группы СМЕ1 и СМЕ2 различаются по времени максимального часового уменьшения плотности значительно, чем по длительности фазы спада. Время достижения максимальных значений интенсивности ММП и скорости СВ практически совпадает в группе СМЕ1 и характеризуется существенным отставанием максимума интенсивности ММП от максимума скорости в группе СМЕ2. Все эти различия могут быть объяснены разницей в самих структурах рассматриваемых возмущений СВ, подробнее о которых написано в Главе 2.

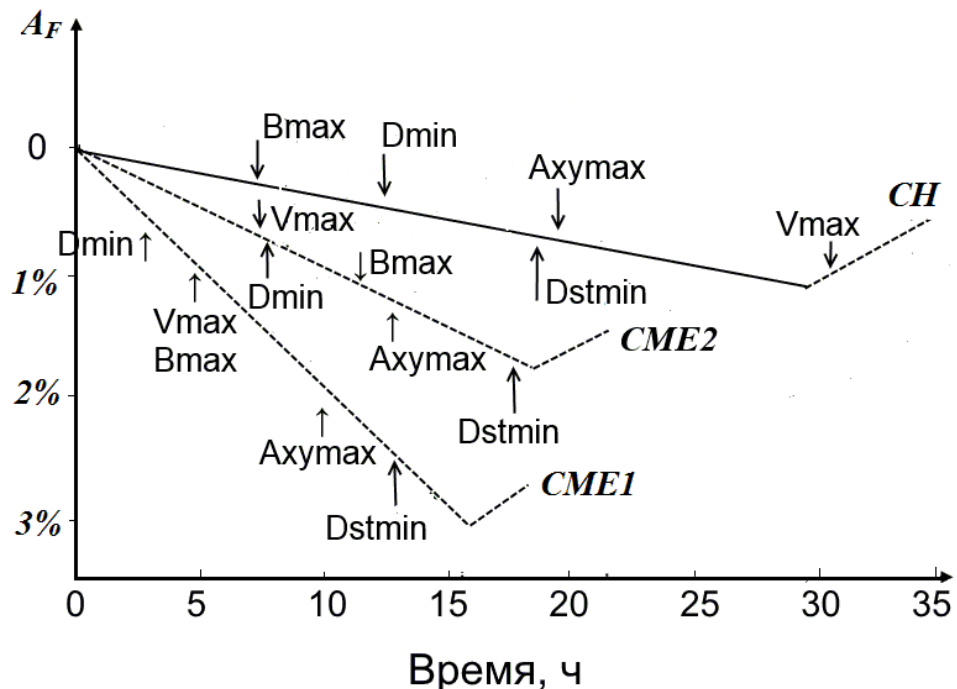


Рисунок 6 – Временное развитие среднего события ФЭ в различных группах.

1.3.4 Радиальная зависимость величины Форбуш-эффектов

Космическая миссия Helios остается пока незаменимым источником информации о вариациях КЛ и межпланетных структурах в диапазоне расстояний от 0.28 до 1 а.е. В ходе миссии эксплуатировалось два аналогичных космических аппарата (КА) – Helios A и Helios B – с идентичными детекторами, был получен длинный ряд непрерывных данных в разных каналах КЛ (в том числе, достаточно высокоэнергичных) с одновременным измерением параметров СВ и ММП. К самым ранним работам на основе данных Helios относятся статьи [159, 187], в которых рассматривается изменение интенсивности потока протонов и ядер гелия в энергетическом диапазоне 20–50 МэВ/част. В работах [87, 90] использовались данные о частицах с энергией >60 МэВ/а.е.м., и была обнаружена тесная связь между выбросами солнечного вещества и краткосрочными понижениями плотности потока КЛ. Авторы [215] по данным аппаратов Helios и IMP8 исследовали связь между понижениями плотности КЛ и характеристиками рекуррентных потоков СВ. В работе [78] были получены радиальные зависимости для скорости СВ, величины ММП и амплитуды ФЭ на основе данных о 35 магнитных облаках. В работе [177] авторы описали существующие радиальные градиенты во внутренней гелиосфере.

На основе имеющихся данных детекторов Helios (<https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/helios/helios1/>, <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/helios/helios2/>) по вариациям КЛ (канал с энергией >50 МэВ) и данным ММП и СВ автором был создан обширный каталог ФЭ, наблюдавшихся на обоих КА Helios, включающий в себя сведения о 1166 событиях за весь период функционирования аппаратов Helios A и B [44, 75]. При выделении этих ФЭ руководствовались следующими соображениями:

- 1) использовались списки ударных волн, зарегистрированных на Helios, для определения времени начала ФЭ.

- 2) в тех случаях, когда межпланетное возмущение не имело ударной волны, начало ФЭ выбиралось по резкому изменению характеристик СВ (скорости СВ и/или модуля ММП), если данные по ним были доступны.
- 3) если данные СВ и ММП отсутствовали, то начало ФЭ определялось по резким изменениям потока КЛ.

Таким образом, выделение каждого ФЭ было произведено вручную, исследовались все ряды имеющихся данных. Ограничения по магнитуде и продолжительности ФЭ возникли естественным образом из статистических погрешностей данных КЛ, например, выделять ФЭ с величиной $<1\%$, как правило, не удавалось.

На рисунке 7 показано поведение параметров СВ, КЛ и ММП для ФЭ, зарегистрированного аппаратом Helios A 26 марта 1976 г. На верхней панели изображены плотность (кружочки) и температура СВ (крестики), на средней панели – вариации плотности КЛ, на нижней панели – скорость СВ (верхняя кривая), модуль ММП и его компоненты. На круговой диаграмме на средней панели показано взаимное расположение Солнца (кружок в центре), аппаратов Helios (оранжевые кружки) и Земли (зеленый кружок) в плоскости орбиты Земли с учетом соответствующих долгот. Начало события отмечено голубым вытянутым треугольником. Данный ФЭ связан с регистрацией МКВМ: виден рост модуля ММП, скорости и плотности СВ, а также резкое падение плотности КЛ. Итоговая магнитуда данного ФЭ составила 14%. Следует отметить, что в этот период Helios A находился очень близко к Солнцу, поэтому наблюдаемые значения ММП столь велики: максимальное значения модуля ММП в этом событии составило $V_{\max} = 72.38$ нТл.

На рисунке 8 приведен пример события, зарегистрированного на аппарате Helios B 24 апреля 1977 г. Вероятно, этот ФЭ вызван регистрацией ВСП из КД, о чем свидетельствуют длительные повышенные значения скорости СВ, небольшая амплитуда изменения компонент ММП при наличии высокой температуры. Helios B также находился близко к Солнцу (0.32 а.е., см. диаграмму на средней панели),

поэтому и фоновые значения ММП столь велики (~ 40 нТл). Однако величина ФЭ в этом событии составила всего $AF = 3.2\%$, в отличие от предыдущего примера.

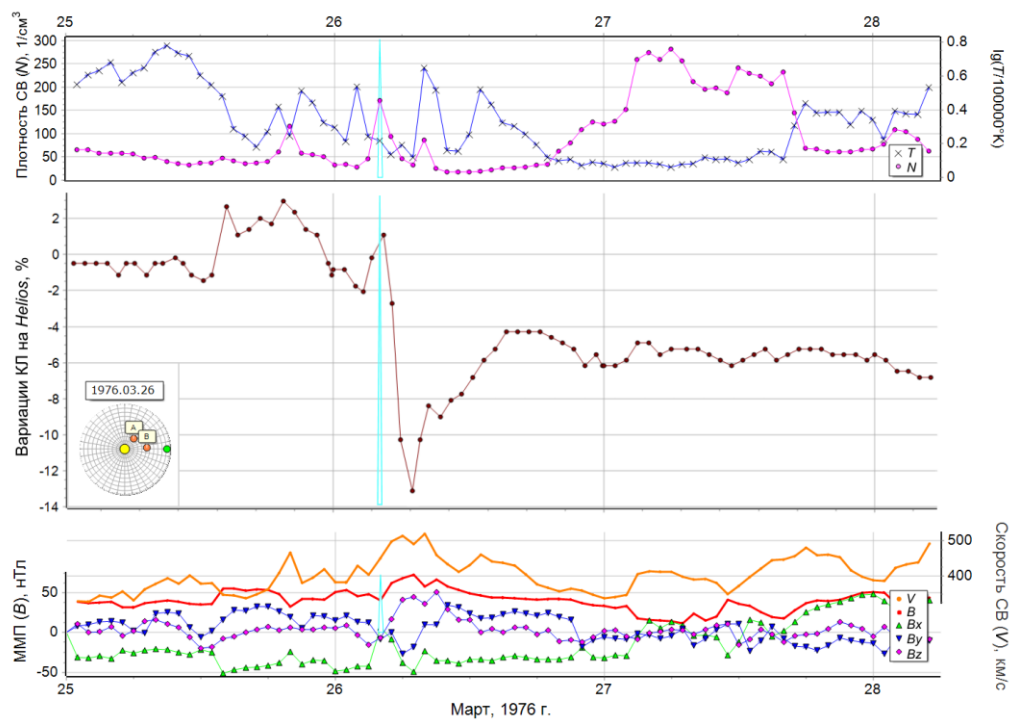


Рисунок 7 – Форбуш-эффект 26.03.1976 г., зарегистрированный космическим аппаратом Helios A на расстоянии 0.32 а.е.

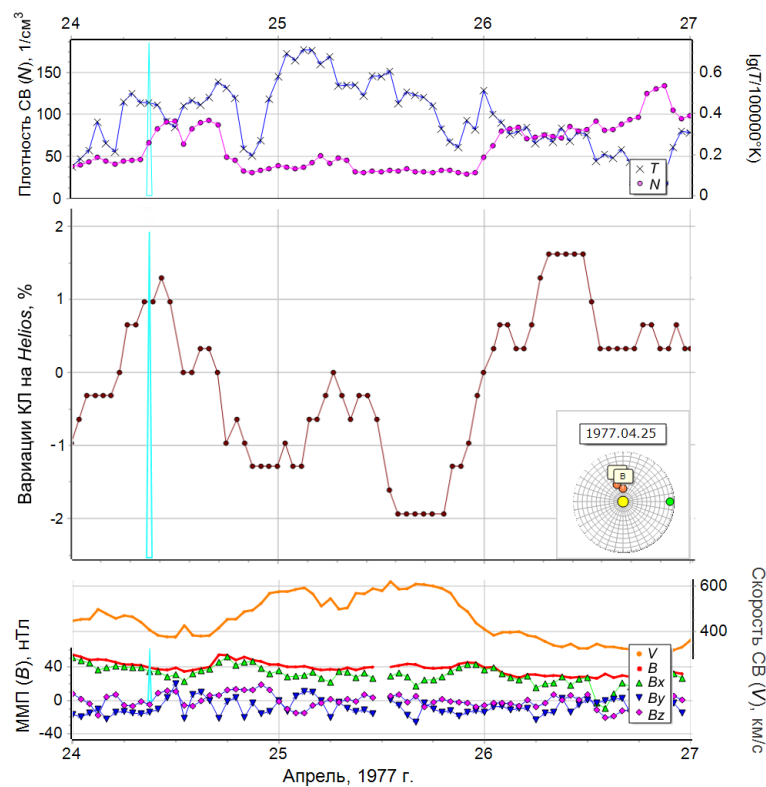


Рисунок 8 – Форбуш-эффект 24–25.04.1977 г., зарегистрированный космическим аппаратом Helios B на расстоянии 0.28 а.е.

Таким образом, можно утверждать, что детекторы Helios по мере своего перемещения часто наблюдали картину, непривычную для тех, кто исследует солнечный ветер по околоземным наблюдениям: помимо очень больших величин плотности, температуры СВ и модуля ММП, в вариациях галактических КЛ нередко прослеживается влияние солнечных КЛ (СКЛ), а также межпланетные возмущения часто объединяются и трудно определить, где кончается одно и начинается другое.

На рисунке 9 приведено распределение по величине выделенных для Helios ФЭ. ФЭ с величиной до 8% (включительно) составляют 94.3% от всего количества надежно выделенных ФЭ. Только 3.7% (28 событий) всех ФЭ имели величину более 10%. Среднее значение величины ФЭ для всех событий в данной выборке составило $3.6 \pm 0.11\%$, медианное значение – 2.7 %.

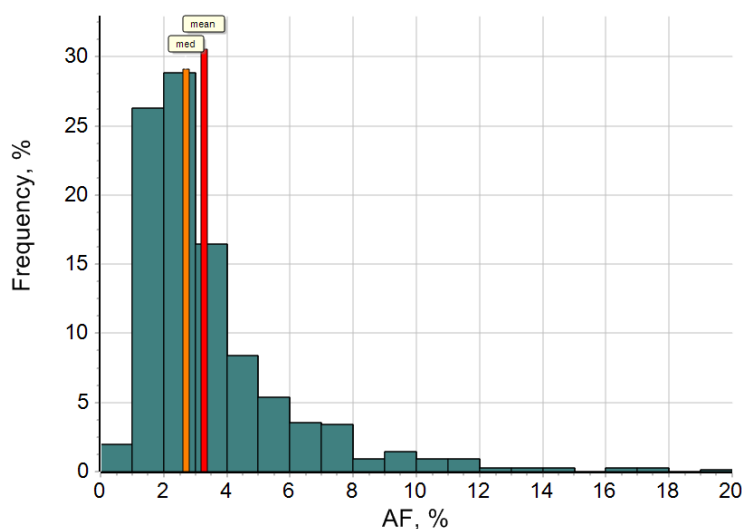


Рисунок 9 – Распределение надежно выделенных ФЭ на Helios по величине. Из соображений масштаба на рисунке не приведены три ФЭ с самыми большими магнитудами (27.6; 34.1; 34.8%).

Можно предположить существование некоторой зависимости величины ФЭ от расстояния. На рисунке 10 приведена связь магнитуды ФЭ с расстоянием от Солнца для событий с высоким качеством данных. Сравнение величины зарегистрированных на разных расстояниях ФЭ позволяет предположить, что радиальная зависимость или отсутствует, или очень слабая: коэффициент корреляции составил $ss = -0.02 \pm 0.04$, а коэффициент регрессии (наклон

степенной зависимости) $\beta = -0.03 \pm 0.06$. Ромбики с ошибками на этом рисунке относятся к средним значениям для интервалов с равными диапазонами изменения расстояния. Поскольку в рассматриваемой выборке много событий, ошибка средних значений получается малой.

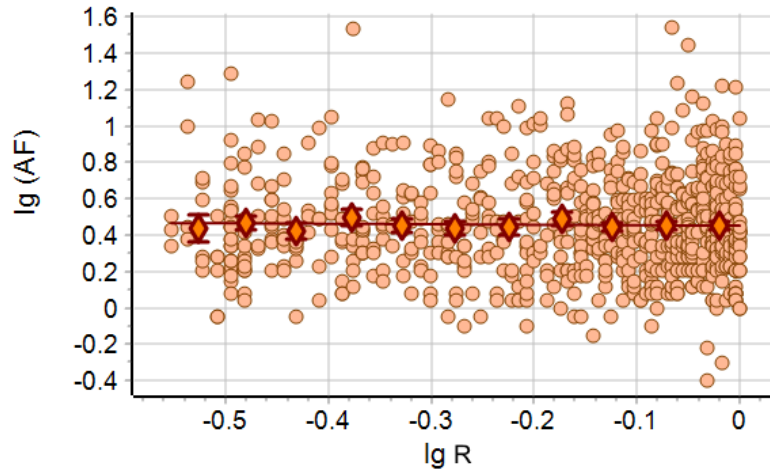


Рисунок 10 – Связь амплитуды ФЭ на Helios с расстоянием от Солнца

Отметим, что большой разброс точек на рис. 10 свидетельствует о том, что радиальная зависимость величины ФЭ, возможно, просто не является определяющей, а есть другие, более существенные зависимости. Надежное выделение радиальной зависимости затруднительно, поскольку при любом моделировании ФЭ, в первую очередь, нужно учитывать свойства межпланетных возмущений, которые индуцировали ФЭ.

На рисунке 11 представлена зависимость величины ФЭ (радиус круга пропорционален величине понижения) от максимальной величины ММП, зарегистрированной в событии (B_{\max} , нТл; горизонтальная ось) и радиального расстояния (R , AU; вертикальная ось) в событии. 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, и это также показано на предыдущем рисунке.

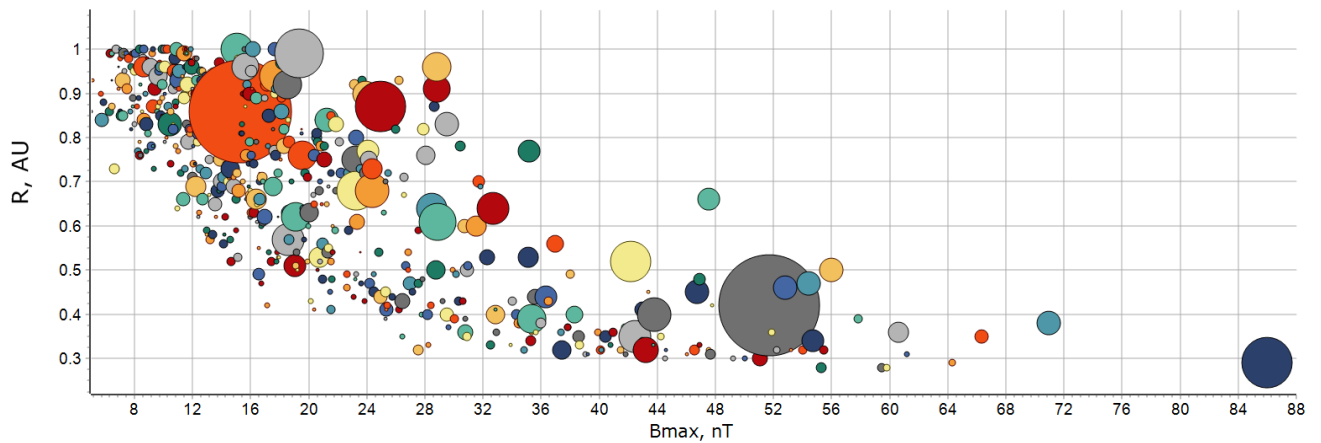


Рисунок 11 – Связь величины ФЭ на Helios, максимального ММП и радиального расстояния

Одна из гипотез заключается в том, что максимальная магнитуда ФЭ коррелирует с максимальным ММП в соответствующем межпланетном возмущении. Однако рис. 11 показывает, что это не так, и взаимосвязь более сложная. Например, вблизи Солнца в правой части рисунка наблюдается большое событие с $B_{\max} = 86$ нТл, но в середине рисунка есть и другие события с аналогичной величиной ФЭ (с $25 < B_{\max} < 45$ нТл), а также ближе к $B_{\max} = 12$ – 20 нТл. Возможно, это были редкие события с благоприятными условиями наблюдения. Тем не менее, из рис. 11 видно, что даже при сильном ММП на малых радиальных расстояниях не обязательно наблюдается большой ФЭ. Причина может заключаться в том, что решающим параметром является изменение индукции магнитного поля относительно фоновых значений, а не его абсолютной величины.

Часть событий, зарегистрированных на Helios, удалось ассоциировать с земными ФЭ (в случае подходящего расположения аппаратов), поскольку они были обусловлены одними и теми же межпланетными возмущениями. Это позволяет более точно описать источник межпланетного возмущения, а также дает хорошую возможность для изучения изменения характеристик этого возмущения по мере распространения от Солнца к Земле. Естественно ожидать, что величины таких ФЭ коррелируют между собой и различия между ними будут определяться разницей в энергетических характеристиках детекторов и возможно,

разницей расстояний от Солнца. Таким образом, связь этих величин можно представить как:

$$AF = c(AF_E)^{\alpha} r^{\beta}, \quad (1)$$

где AF – величина ФЭ, зарегистрированного на Helios, AF_E – величина аналогичного ФЭ у Земли (в FEID), r – расстояние от Солнца.

Кроме величин, вошедших в формулу, следует также учесть разницу долгот точек наблюдения: чем больше она будет, тем вероятнее будут большие различия AF и AF_E . Чтобы минимизировать долготные различия, для этого исследования были использованы только те ФЭ, которые наблюдались в достаточно узком диапазоне – с различием по долготе не более 25° .

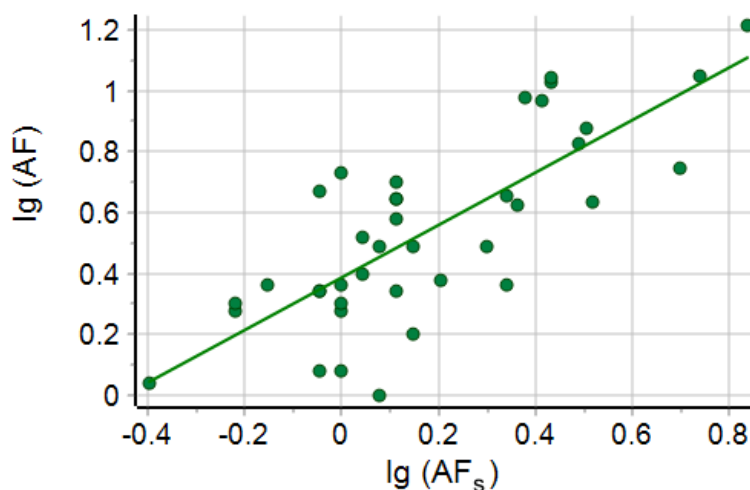


Рисунок 12 – Соотношение величины ФЭ для событий (с разницей долгот $<25^\circ$), зарегистрированных и на аппаратах Helios, и сетью НМ на Земле.

На рисунке 12 приведена зависимость величины ФЭ для 60 событий, зарегистрированных и на аппаратах Helios, и на Земле сетью НМ. Моделирование по формуле (1) дает коэффициент корреляции $cc = 0.72 \pm 0.09$ и следующие коэффициенты: $c = 0.45 \pm 0.035$; $\alpha = 0.79 \pm 0.1$; $\beta = 0.11 \pm 0.22$. Видно, что величины ФЭ, зарегистрированных в разных точках и на разных детекторах (с отличающимися энергетическими зависимостями), но обусловленные одними и теми же межпланетными возмущениями, хорошо коррелируют между собой. В данном случае мы получили положительную радиальную зависимость величины ФЭ, но этот результат никоим образом не противоречит описанному выше отсутствию

радиальной зависимости для величины ФЭ, т.к. $\beta=0$ в пределах одной статистической погрешности.

Отсутствие сильной радиальной зависимости величины ФЭ в диапазоне 0.28–1 а.е. позволяет предположить существование некоего квазистационарного состояния, т.е. баланса между генерацией ФЭ и его восстановлением. По-видимому, в этом гелиоцентрическом диапазоне не наблюдается начальная фаза формирования ФЭ как гелиосферного явления. Тот факт, что интенсивность КЛ в ФЭ, наблюдаемых Helios на расстоянии ~ 0.3 а.е., лишь на несколько процентов ниже интенсивности окружающей среды, позволяет предположить, что КЛ способны эффективно заполнять выброшенные плазменные структуры вблизи Солнца. С другой стороны, следует предположить, что неизбежная деградация большинства ФЭ происходит за пределами орбиты Земли, и ясно, что ФЭ еще могут наблюдаться далеко за пределами орбиты Земли (например, [254, 256]).

Слабая радиальная зависимость размера ФЭ, полученная в результате проведенного статистического анализа, не исключает того, что отдельно взятый ФЭ может вести себя по-разному. Например, в работах [109, 125, 255] обсуждаются два ФЭ, величина которых растет с увеличением расстояния от Солнца. Более того, был описан ряд ФЭ на Марсе и предприняты попытки сравнить их с околоземными ФЭ [124, 199]. Однако, поскольку эти ФЭ наблюдались при существенно отличающихся эффективных энергиях, надежную радиальную зависимость получить не удастся.

1.4 Выводы по Главе 1

Проведенный анализ позволил уточнить используемую в дальнейшем формулировку понятия Форбуш-эффекта. Были описаны основные этапы развития теории описания и моделирования ФЭ, а также основные инструменты и методы исследования.

Выделены основные количественные характеристики ФЭ, которые могут быть рассчитаны при обработке данных мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки, приведены средние значения этих параметров. Описаны временные характеристики наиболее типичных событий ФЭ и установлены различия в профилях и экстремальных значениях параметров ФЭ, вызванными разными типами межпланетных возмущений, в частности, корональными выбросами массы и коротирующими областями взаимодействиями перед потоками из корональных дыр.

Показано, что радиальная зависимость величин ФЭ в большом диапазоне расстояний от Солнца до орбиты Земли отсутствует (согласно данным космических аппаратов Helios).

Глава 2. Возмущения солнечного ветра

2.1 Межпланетные возмущения, связанные с распространением корональных выбросов массы

2.1.1 Общая характеристика

Межпланетные выбросы корональной массы (*Interplanetary coronal mass ejections – ICMEs*) представляют собой особые структуры солнечного ветра, которые считаются последствиями КВМ на Солнце. КВМ – это кратковременный и энергичный выброс массы и магнитного потока больших масштабов из нижней короны Солнца в межпланетное пространство [263]. Базовая конфигурация ударных динамических магнитных структур позволила объяснить внезапное начало геомагнитных бурь [129] и различные типы нетепловых солнечных радиовсплесков [118], а непосредственные изображения КВМ в белом свете впервые были получены коронографом OSO-7 в начале 1970-х гг. [245]. Скорость КВМ во внешней короне Солнца колеблется от ~ 100 км/с в минимуме до ~ 3000 км/с в максимуме солнечного цикла, при средней скорости от 300 до 500 км/с [260]. Масса КВМ в основном находится в диапазоне от 10^{13} до 10^{16} г и их кинетическая энергия в основном составляет от 10^{27} до 10^{32} эрг [247].

После выброса из солнечной короны КВМ в значительной степени сохраняет свою магнитную конфигурацию, представляющую собой сильно закрученный жгут, который способен распространяться в гелиосфере на большие расстояния, взаимодействуя с окружающим солнечным ветром и другими космическими объектами на его пути. На рис. 13 показана схема МКВМ [264], создающего впереди себя распространяющуюся в межпланетном пространстве ударную волну. Ударная волна и тело МКВМ разделены оболочкой сжатого,

нагретого и часто турбулентного окружающего слоя плазмы СВ – областью взаимодействия или Sheath. О прохождении МКВМ мимо космических аппаратов могут свидетельствовать различные характерные признаки: высокие значения ММП, плотности и скорости СВ, аномально низкие температуры СВ и др. (см. обзоры [135, 218, 263-264]).

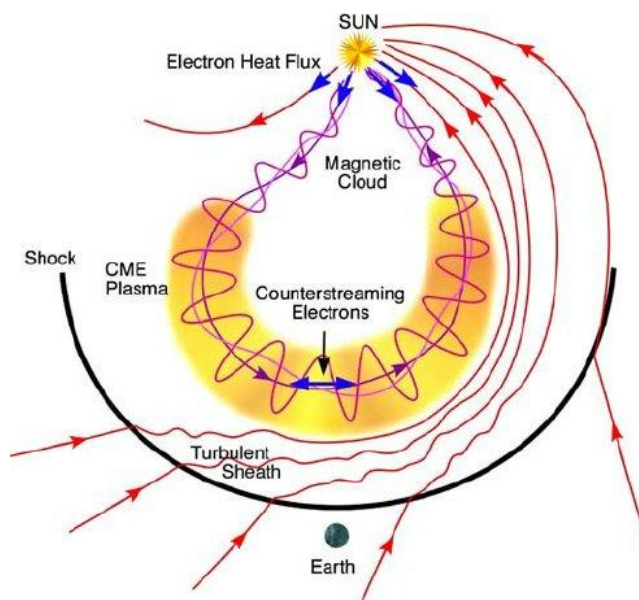


Рисунок 13 – Структура МКВМ согласно работе [264]

На рисунке 13 показаны несколько значимых частей МКВМ, в частности, спиральная конфигурация магнитного поля в виде жгута. В некоторых МКВМ обнаруживаются особые структуры, известные как «магнитные облака» – МО (*magnetic cloud* – MC), обозначены на рисунке желтым цветом [152, 219]. Они обладают определенными свойствами, которые отличаются от свойств окружающего солнечного ветра, наиболее значимыми из них являются сильное магнитное поле, плавное вращение его компонент на большие углы и пониженная температура. Также из-за большой величины магнитного поля и низких протонных температур МО свойственны низкие значения плазменной бета $\beta < 1$ [81, 135, 152].

МКВМ представляют интерес по ряду причин. Например, они могут провоцировать возникновение ударных волн в межпланетном пространстве, на которых затем ускоряются энергичные частицы (см., например, [101, 133, 213]). МКВМ также являются основными драйверами интенсивных геомагнитных бурь

[244, 262] и способны значительно модулировать интенсивность потока ГКЛ [34, 70, 91, 109, 156, 181 и др.].

На данный момент существует довольно полный и постоянно обновляемый каталог КВМ по данным аппарата SOHO/LASCO – https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, а также список МКВМ, достигших Земли – <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>, которые включают в себя данные, начиная с 1996 г. до настоящего времени. Также полезным ресурсом, содержащим данные по различным КВМ и модельное представление распространения МКВМ в гелиосфере, правда охватывающим меньший промежуток времени (с 2010 г. по настоящее время) является центр <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>.

2.1.2 Скорости и распространение МКВМ

Существует немало работ, посвященных различным аспектам изучения КВМ и МКВМ, в частности, исследованию положения их солнечных источников, наблюдаемых скоростей, условий распространения в межпланетном пространстве и прибытия на Землю. Например, авторы [142] рассмотрели теорию формирования МКВМ, наблюдаемых в гелиосфере. Обзор [151] сосредоточен на магнитной структуре КВМ и свойствах предшествующей им области взаимодействия (*Sheath*). Оценка скоростей КВМ по данным различных коронографов проводилась уже несколько десятилетий назад (например, в работах [134, 164 и др.]). В частности, авторы установили пороговые значения наблюдаемых скоростей, указали на существование проекционных эффектов у коронографов, предложили формулу для оценки скорости МКВМ по начальной скорости КВМ. Однако ряд авторов указывает на то, что правильная оценка скоростей МКВМ часто осложняется существованием сложных условий в

гелиосфере из-за других межпланетных возмущений, взаимодействием со спокойным солнечным ветром и т.д. [91, 130, 248].

На данный момент разработано много разных моделей распространения МКВМ в межпланетном пространстве, учитывающие начальное положение источника, скорость КВМ и другие факторы. Среди них, например, модель WSA ENLIL и другие магнитогидродинамические модели [115, 193, 225]; а также Graduated Cylindrical Shell (GCS) model [241]; Effective Acceleration Model (EAM) [197]; the Drag-Based Ensemble Model (DBEM) [85], модель Центра данных оперативного космического мониторинга МГУ (SMDC) [229].

Автором настоящей работы с коллегами было рассмотрено и проанализировано 364 КВМ, зарегистрированных на коронографе SOHO/LASCO и ассоциированных с солнечными вспышками, которые вызвали межпланетные возмущения, наблюдавшиеся в околоземном космическом пространстве за 1995-2021 годы [45-46, 73, 228]. Для исследования мы использовали базу данных корональных выбросов массы (по данным коронографа SOHO, используется линейная скорость) – https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/. Данные по МКВМ, достигшим Земли, собраны в базе данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID), созданной в ИЗМИРАН.

В работах [73, 228] автором диссертации было показано, что связь транзитной скорости МКВМ и начальной скорости КВМ нелинейна в области малых скоростей, что подтверждает результаты, отраженные в прошлых работах [например, 130]. Выявленная нелинейность оказалась наиболее выражена для КВМ из центральной гелиодолготной зоны. Поскольку время и скорость распространения МКВМ зависят не только от начальной скорости родительского КВМ, но и от долготы солнечного источника, естественно ожидать, что в каком-то случае ожидаемые транзитные скорость и время будут близки к ранее наблюдавшимся событиям с аналогичными солнечными данными: V_0 и $\sin\phi$. Однако, очевидно, что и учет скорости фонового СВ – V_a также важен, поскольку возможны различные сценарии взаимодействия с ним распространяющегося МКВМ: медленные выбросы могут ускоряться, а быстрые, наоборот, замедляться.

Это было учтено при разработке усовершенствованной версии модели, описанной в работах [45-46, 228]. Таким образом, основными входными параметрами для обновленной эмпирической модели оценки скоростей и запаздываний МКВМ были выбраны:

- начальная линейная скорость КВМ, рассчитанная по данным коронографа SOHO/LASCO – V_0 ;
- синус абсолютной гелиодолготы ассоциированной с КВМ солнечной вспышки – $\sin\varphi$;
- скорость фонового СВ за час до регистрации соответствующего МКВМ у Земли – V_a .

Естественно ожидать, что в некоторых событиях ожидаемая транзитная скорость и время распространения МКВМ будут близки к ранее наблюдавшимся событиям с аналогичными входными данными, а именно V_0 , $\sin\varphi$, V_a . Это означает, что мы можем использовать уже имеющиеся в нашей базе данных события для определения ожидаемой транзитной скорости и запаздывания для нового события, усредняя имеющуюся информацию в окрестности исследуемой точки. При этом учитывается вклад всех 364 точек, но так, чтобы ближайшие точки имели наибольший вес. Тогда величину ожидаемой транзитной скорости можно рассчитать следующим образом:

$$V_{tr} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2)$$

где V_i – транзитная скорость i -того события в окрестности, w_i – вес i -того события в окрестности, $N = 364$.

При этом вес i -того события определяется как:

$$\begin{cases} w_i = \frac{s_0^2}{s_v^2 + s_p^2 + s_a^2 + s_0^2}, \text{ для } s_v \leq s_{vc}, |s_p| \leq s_{pc}, s_a \leq s_{ac}, s_0 = s_{0c} \\ w_i = \left(\frac{s_0^2}{s_v^2 + s_p^2 + s_a^2 + s_0^2} \right)^2 \text{ для всех других значений } s_v, s_p, s_a \end{cases} \quad (3)$$

где $s_v = \left| \frac{1-V_0}{V_{0i}} \right|$, $s_p = (\sin p - \sin \varphi_i)$, $\sin p$ – синус абсолютного значения гелиодолготы исследуемого события, V_0 – начальная скорость КВМ исследуемого события, $\sin \varphi_i$ и V_{0i} – синус абсолютного значения гелиодолготы

ассоциированной вспышки и начальной скорости i -того события в окрестности, $s_a = \left| \frac{1-V_a}{V_{ai}} \right|$, V_a – скорость фонового СВ в исследуемом событии, V_{ai} – фоновая скорость СВ для i -того события в окрестности, s_0 – задаваемая вручную величина, определяющая ближайшую окрестность, в которой веса меняются незначительно.

Значения величин $s_{vc}, s_{pc}, s_{ac}, s_{0c}$ изменяются в зависимости от начальных скоростей КВМ. Подбор значений $s_{vc}, s_{pc}, s_{ac}, s_{0c}$ и граничных условий для V_0 был осуществлен исходя из достижения минимальных значений отклонения модельных величин транзитной скорости и времени от реально наблюдаемых в исследуемых 364 событиях. Ошибки скорости считаются аналогичным образом, как и сами транзитные скорости (с учетом веса), но вместо значения скоростей используются разности их прогнозируемого и наблюдаемого значения (по абсолютной величине).

Для равномерно расположенных по V_0 (с шагом 50 км/с) и V_a (с шагом 20 км/с) узлов были рассчитаны матрицы ожидаемых значений транзитной скорости по формуле (1) и запаздывания МКВМ по формуле (4):

$$T_{tr} = \frac{1 AU}{V_{tr}} \quad (4)$$

Для более наглядной демонстрации данных мы воспользовались контурным представлением ожидаемых транзитных величин, построенным на основе вычисленных матриц. На рисунке 2 приведена связь ожидаемого времени прибытия МВ к Земле (T_{tr}) со значениями начальной скорости соответствующего КВМ (ось X) и фоновой скорости СВ (ось Y), более темными цветами обозначены меньшие запаздывания (числа, указанные на соответствующих изолиниях). Например, для КВМ с начальной скоростью 1500 км/с при фоновой скорости 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.

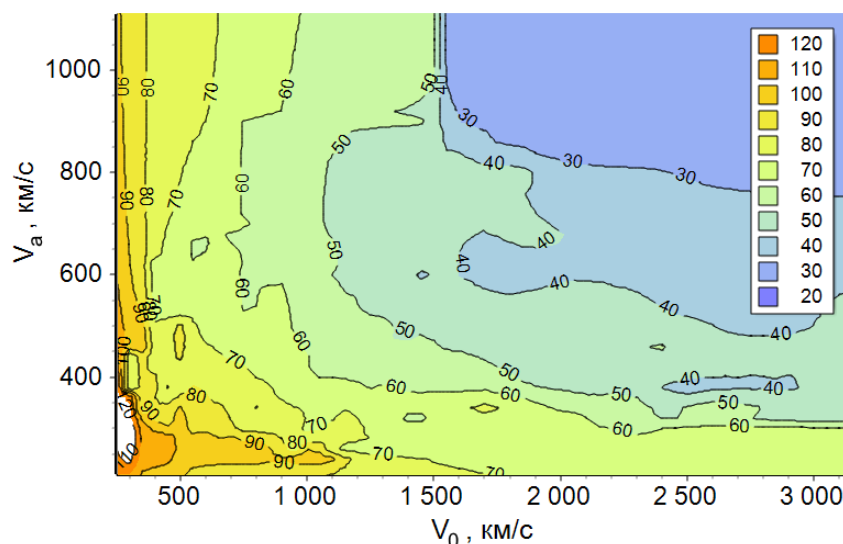


Рисунок 14 – Связь ожидаемого запаздывания МКВМ (T_{tr}) с начальной скоростью соответствующего КВМ (ось X) и скоростью фонового СВ (ось Y). Различным цветом обозначена градация ожидаемого транзитного времени по величине (в часах).

Нами также были получены зависимости ожидаемых транзитных скоростей (V_{tr} , ось y) от начальной скорости КВМ (разные кривые) и долготы ассоциированной с ним вспышки (ось x) при заданной скорости фонового СВ (для примера взято значение $V_a = 400$ км/с). По рисунку 3 можно определить ожидаемые значения: например, для КВМ с начальной скоростью порядка 700 км/с ожидаемая транзитная скорость составляет ~ 600 км/с, а для аналогичного КВМ с далеким по долготе источником ($>50^\circ$) – получаем менее 550 км/с.

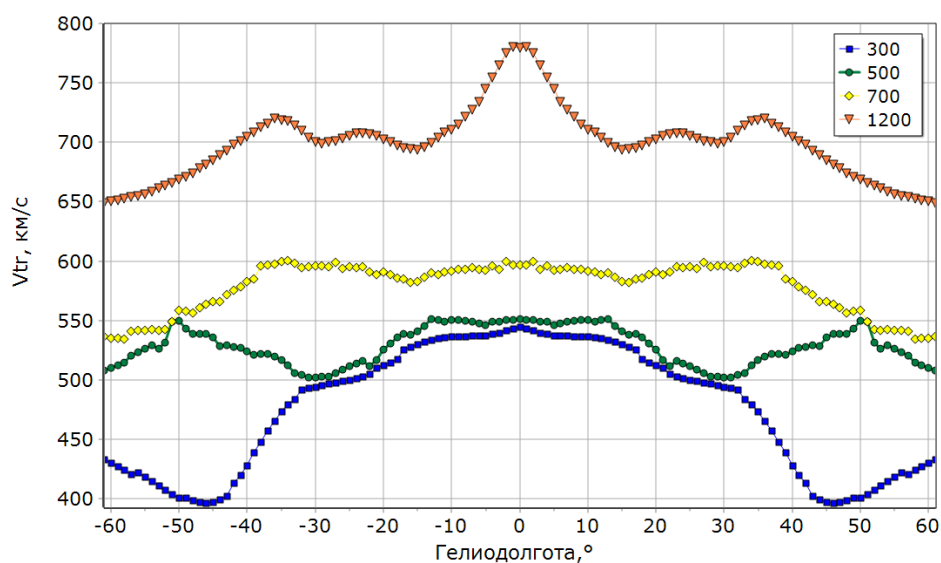


Рисунок 15 – Зависимость ожидаемых значений транзитной скорости (ось y) от долготы родительской вспышки (ось x) и начальной скорости КВМ в км/с (кривые).

В целом, можно заключить, что для получения одинаковых транзитных скоростей при сравнении событий с разной гелиодолготой, необходимы большие начальные скорости КВМ для больших долгот (применимо к исследуемой выборке событий). Например, для транзитной скорости МКВМ в 700 км/с родительское КВМ в центральной зоне (до 20°) должно иметь начальную скорость 800-900 км/с, а если родительское КВМ находится ближе к лимбу ($>70^\circ$ долготы), то его начальная скорость уже должна быть 1200-1400 км/с. Или, наоборот, если начальная скорость КВМ составляет 1400 км/с, то в случае центрального источника транзитная скорость будет около 900 км/с, а в случае лимбового источника – намного меньше, около 600 км/с.

Подобные рассуждения применимы и к сравнению времени прибытия МКВМ на Землю. Самые быстрые МКВМ регистрируются на Земле через 20-30 часов после вспышки (синий диапазон), самые медленные – более 90 часов (оранжевый диапазон). Хотя, безусловно, есть и уникальные события (например, октябрь, 2003) для которых транзитное время оказалось меньше 20 ч, но их очень мало, поэтому нельзя говорить о статистически значимых результатах их оценки.

Также было показано, что транзитная скорость МКВМ в исследуемой выборке тесно связана с максимальной скоростью, наблюдаемой на Земле ($ss = 0.89 \pm 0.027$), и создана модель, которая позволяет оценить транзитные скорость/время и максимальную скорость МКВМ у Земли на основе начальной скорости КВМ, гелиодолготы ассоциированной вспышки и значения скорости фонового СВ. Полученные результаты применяются в работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН.

Для сравнения отметим, что сложные теоретические МГД-модели дают результаты с абсолютными ошибками ± 7 часов (<https://iswa.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/>). Порядка 50% событий, обчисленных по нашей модели имеют ошибку в пределах ± 10 часов, а средняя абсолютная ошибка оценки времени прибытия составляет 11.5 часов. Для высокоскоростных центральных событий ($V_0 > 800$ км/с и $\phi \leq 10^\circ$) это значение снижается до 8.6 часа. Наши результаты более уместно сравнивать с другим

типом моделей (эмпирическими или полуэмпирическими), и эти модели имеют существенно большие погрешности: 14.5 часов (DBEM, [85]), 18.6 часов (EAM, [197]) или 20.8 часов (SMDC, [229]), поэтому использование нашей модели вполне оправдано.

Кроме того, полезно рассмотреть относительные величины ошибок определения времени распространения МКВМ, поскольку величина ошибки в часах не во всех случаях дает правильное представление о ситуации. Например, если транзитное время некоторого межпланетного возмущения составляет 100 ч, то ошибка в ± 10 часов совершенно не критична, а если оно относится к высокоскоростным и время его распространения до Земли составляет 30-40 ч, то такое значение ошибки нельзя считать хорошим. Среднее значение относительной ошибки для нашей модели составило 16.5%, поэтому оценки можно считать достаточно надежными, как для быстрых, так и медленных МКВМ.

2.1.3 МКВМ и модуляция космических лучей

Как упоминалось выше, отдельный научный вопрос – это изучение способности МКВМ модулировать КЛ. ФЭ часто начинаются с приходом к Земле ударной волны, предшествующей МКВМ, а затем интенсивность ГКЛ может дополнительно снижаться внутри тела выброса/магнитного облака.

Автором диссертации с коллегами были проанализированы межпланетные возмущения, содержащие магнитные облака, и связанные с ними ФЭ [6-7, 181]. Сейчас 465 событий за 1995–2021 гг. со всеми сопутствующими параметрами включены в общую базу данных FEID и являются его важной составной частью (подробное описание базы данных приведено в Главе 1).

Например, в работе [181] Форбуш-эффекты с 1997 по 2020 гг., связанные с корональными выбросами массы из и вне активных областей, сравнивались

между собой и, отдельно анализировались случаи, когда соответствующие возмущения СВ содержат или не содержат магнитные облака. С помощью статистических методов были изучены вариации плотности и анизотропии КЛ, скорости СВ, величины ММП и геомагнитных индексов. Показано, что для обоих типов спорадических ФЭ распределения параметров КЛ, СВ и ГА несимметричны, имеются длинные «хвосты» больших значений, они характеризуются большими значениями для группы выбросов из АО, и более эффективная модуляция КЛ происходит в этих же событиях. Области взаимодействия разноскоростных потоков СВ также чаще встречаются в группе выбросов из АО, чем для КВМ вне АО. Таким образом, было показано, что статистические характеристики параметров КЛ и СВ существенно различаются для ФЭ, связанных с КВМ из АО, сопровождаемых солнечными вспышками, и с волоконными выбросами вне АО. Отличия особенно заметны, если соответствующий МКВМ содержит МО вблизи орбиты Земли.

В работе [6] было показано, что МО создают значительную часть Форбуш-понижения, т.е. подтверждены выводы других авторов (напр., [219]) на гораздо большем статистическом материале и на более точных исходных данных, чем в более ранних работах. Установлено, что вариации КЛ внутри МО тесно связаны с максимальными параметрами СВ и ММП внутри магнитных облаков и отличаются разнообразием. В некоторых случаях МО вызывает значительные вариации (до 90% общей величины ФЭ), но есть события, в которых понижения почти незаметны (менее 10% общей величины ФЭ). Также была выявлена достаточно тесная корреляция вариаций плотности КЛ в МО с их размером, выраженным в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ), но не с длительностью МО в часах или размером в астрономических единицах.

В работе [7] было исследовано поведение различных характеристик МО с течением времени. В частности, нами было показано, что максимальные значения скорости СВ, величины ММП и индексов геомагнитной активности чаще регистрируются в начале магнитного облака, в то время как минимальные

значения температурного индекса, плотности и экваториальной составляющей анизотропии КЛ могут наблюдаться в любой части исследуемой структуры.

2.1.4 МКВМ и протонные возрастания

В продолжение анализа различных свойств явлений, вызванных распространением КВМ в межпланетном пространстве, в других наших работах [12, 48, 51, 73-74, 228] было произведено сравнение характеристик Форбуш-эффектов и солнечных протонных событий (СПС), сопутствующей геомагнитной активности, вызванных одним и тем же солнечным источником – КВМ и связанной с ним солнечной вспышкой. Выбран центральный диапазон гелиодолгот (E04–W35), в котором вспышки ассоциированы как с ФЭ, так и СПС у Земли. Все события были разделены на четыре группы по величине зарегистрированных максимальных потоков СПС для частиц с разными энергиями (здесь и далее по тексту P10 – поток протонов с энергиями >10 МэВ, P100 – поток протонов с энергиями >100 МэВ). Для сравнения была добавлена контрольная группа вспышек из того же долготного диапазона, после которых не последовала регистрация СПС, и в итоге рассматривались следующие пять групп:

- 1) GLE (10 событий, группа GLE);
- 2) $P100 \geq 0.5$ pfu (1 pfu = 1 частица/см² с ср; 29 событий, группа P100);
- 3) $P10 \geq 1$ pfu и $P100 < 0.5$ pfu (39 событий, группа P10);
- 4) $P10 < 1$ pfu и P100 не зарегистрированы (62 события, группа Weak);
- 5) Вспышки, после которых СПС не были зарегистрированы (9564 вспышки, группа Control).

Далее из выделенных событий были оставлены только те, в которых на Земле сетью НМ были зарегистрированы ФЭ, уверенно идентифицированные с солнечным источником. Было показано, что КВМ, приведшие к регистрации СПС, с большой вероятностью впоследствии вызывают значительный ФЭ на

орбите Земли и провоцируют развитие геомагнитных возмущений разной величины. Наиболее мощные межпланетные возмущения связаны с солнечными вспышками и сопутствующими КВМ, после которых были зарегистрированы GLE: во время всех межпланетных возмущений из этой группы зарегистрированы магнитные бури (в двух случаях – исключительно большие) и большие ФЭ (от 4.7 до 20.4%); все межпланетные возмущения имели высокие максимальные скорости СВ у Земли (от 669 до 1876 км/с) и большие значения модуля ММП (от 17.5 до 62 нТл).

Доказано, что ускорительная и модулирующая эффективности таких событий взаимосвязаны, что, в основном, объясняется высокими начальными скоростями КВМ. Мы также рассчитали зависимости амплитуды ФЭ (AF), Ap и Dst-индексов ГА от транзитной скорости МКВМ (V_{tr}) для всех исследуемых событий и получили, что для всех параметров существует довольно тесная связь: коэффициенты корреляции $cc(AF-V_{tr}) = 0.7 \pm 0.05$, $cc(Ap_{max}-V_{tr}) = 0.68 \pm 0.05$, $cc(Dst_{min}-V_{tr}) = -0.63 \pm 0.05$. На основе анализа был также получен прогностический инструмент для определения возможной величины ФЭ и изменения уровня ГА, основанный на данных уже начавшегося СПС (координаты вспышки, максимальный поток частиц) и начальной скорости соответствующего КВМ (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Вероятность регистрации (в %) различных величин ФЭ и максимальных геомагнитных индексов после вспышечных событий с определенными характеристиками.

Параметр/группа	GLE	P100	P10	Weak	Control
	Вероятность, %				
$AF < 3\%$	0	50	30.5	56	82.5
$3 \leq AF < 10\%$	67	50	58	44	17.5
$AF \geq 10\%$	33	0	11.5	0	0
$Kp_{max} < 5-$	0	10	19.5	32.5	45
$Kp_{max} = 5-...6+$	11	40	19	34.5	41
$Kp_{max} = 7-...8+$	56	40	50	33	14
$Kp_{max} = 9-...9$	33	10	11.5	0	0

Учитывая многообразие явлений, связанных с распространением МКВМ в межпланетном пространстве, можно утверждать, что эти солнечные явления оказывают сильное влияние на гелиосферу и состояние космической погоды, и поэтому их свойства требуют детального анализа и тщательного изучения.

2.2 Межпланетные возмущения, вызванные воздействием высокоскоростных потоков из корональных дыр

2.2.1 Общая характеристика

Взаимодействие между быстрым и медленным СВ вызывает образование областей взаимодействия потоков (*stream interaction region – SIR*). SIRs часто связаны с корональными дырами, долгоживущими областями на Солнце с преимущественно открытым магнитным полем. Из-за квазистационарного расположения низкоширотных КД, взаимодействие высоко- и низкоскоростных потоков СВ приводит к сжатию плазмы и магнитного поля, происходящему на определенном расстоянии от Солнца. Так как Солнце вращается, повторяющиеся SIR называются коротирующими областями взаимодействия (КОВ) (см., например, обзоры [220, 263] и ссылки в них).

На рисунке 16 представлено схематичное изображение образования упомянутых областей взаимодействия потоков СВ (из работы В. Пиццо [208]). Воздействие потоков плазмы из КД, может быть определено на орбите Земли, по регистрации так называемого высокоскоростного потока (ВСП), характеризующегося резким падением плотности, одновременным увеличением температуры и постепенным увеличением скорости СВ.

STREAM INTERACTION SCHEMATIC
(INERTIAL FRAME)

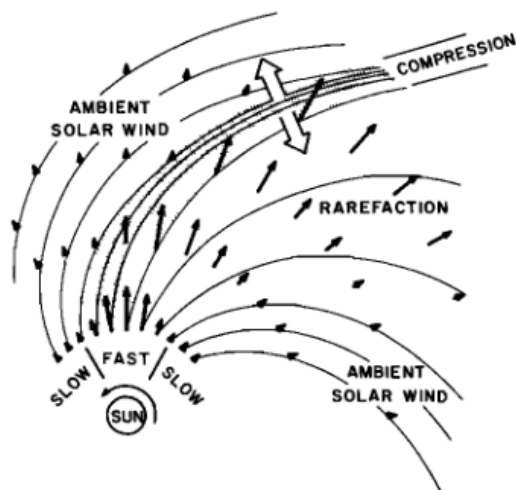


Рисунок 16 – Области взаимодействия в солнечном ветре согласно [208].

Кроме того, ВСП обычно предшествует увеличение плотности СВ за счет сжатия, и начало воздействия КОВ (а затем и ВСП) часто связано с изменением полярности ММП (секторная граница) [146, 220]. Изменение полярности ММП связано с чередованием магнитных секторов, по отношению к нейтральной линии магнитного поля Солнца (гелиосферный токовый слой – ГТС или *heliospheric current sheet* – *HCS*). Общеизвестно существование двух полярностей, однако количество магнитных секторов меняется с течением солнечного цикла, конфигурация может особенно усложняться при приближении к его максимуму.

2.2.2 Геоэффективность КОВ и ВСП

Поскольку КОВ вращаются в направлении планетарного движения, высокоскоростные потоки СВ, исходящие из расположенной в центральной зоне Солнца КД достигают Земли примерно через 3-4 дня в зависимости от скорости. Типичные интервалы высоких скоростей СВ, регистрируемые после КОВ могут привести к длительным возмущениям геомагнитного поля и/или вызвать

усиление потоков высокоэнергичных частиц (особенно электронов) в радиационных поясах Земли [77, 137, 163, 214].

Поскольку ВСП из КД представляют собой малодинамичные структуры, воздействие их на Землю может быть спрогнозировано с длительными сроками упреждения. Измерения потока плазмы СВ *in situ* в точке либрации L1 и, например, данные космических аппаратов STEREO, с изменяющимися точками обзора обеспечивают прогноз до 27 дней вперед (в зависимости от взаимного расположения). При этом, чем ближе к Земле аппаратами были проведены измерения, тем меньше изменяется временной профиль СВ [196].

Различные характеристики КД и ВСП обсуждались многими авторами. В обзоре С. Кранмера [96], в частности, подробно описаны две основные проблемы, связанных с ними: корональный нагрев и механизм ускорения быстрого и медленного СВ. Обзор Я. Ричардсона [220] посвящен взаимодействию медленного и быстрого СВ, обсуждению процессов ускорения энергичных частиц в областях взаимодействия, модуляции ГКЛ и возникновению соответствующих геомагнитных возмущений. Авторы работы [79] пришли к выводу, что магнитные бури, связанные с КОВ, более опасны для космических объектов, особенно на геосинхронной орбите, по сравнению с теми, что были вызваны МКВМ. Причина в том, что КОВ имеют большую продолжительность и более горячие плазменные слои, а значит, сильнее влияют на заряд, приобретаемый космическими аппаратами.

Ранее различными авторами было показано, что ВСП из КД могут быть причиной многих ФЭ, которые являются рекуррентными [58-59, 143, 217, 235], но эти эффекты не бывают большими (обычно не превышают 2%, [70]). Автор настоящей диссертации в серии работ [32-33, 35, 182] были изучены ФЭ 23-24 циклов солнечной активности, связанные с различными солнечными источниками, в частности: 1) КВМ из АО, сопровождающихся солнечными вспышками (группа СМЕ1); 2) волоконными КВМ за пределами АО (группа СМЕ2) и 3) ВСП из КД (группа СН). С помощью статистических методов исследовались различные характеристики ФЭ, СВ, ММП и ГА.

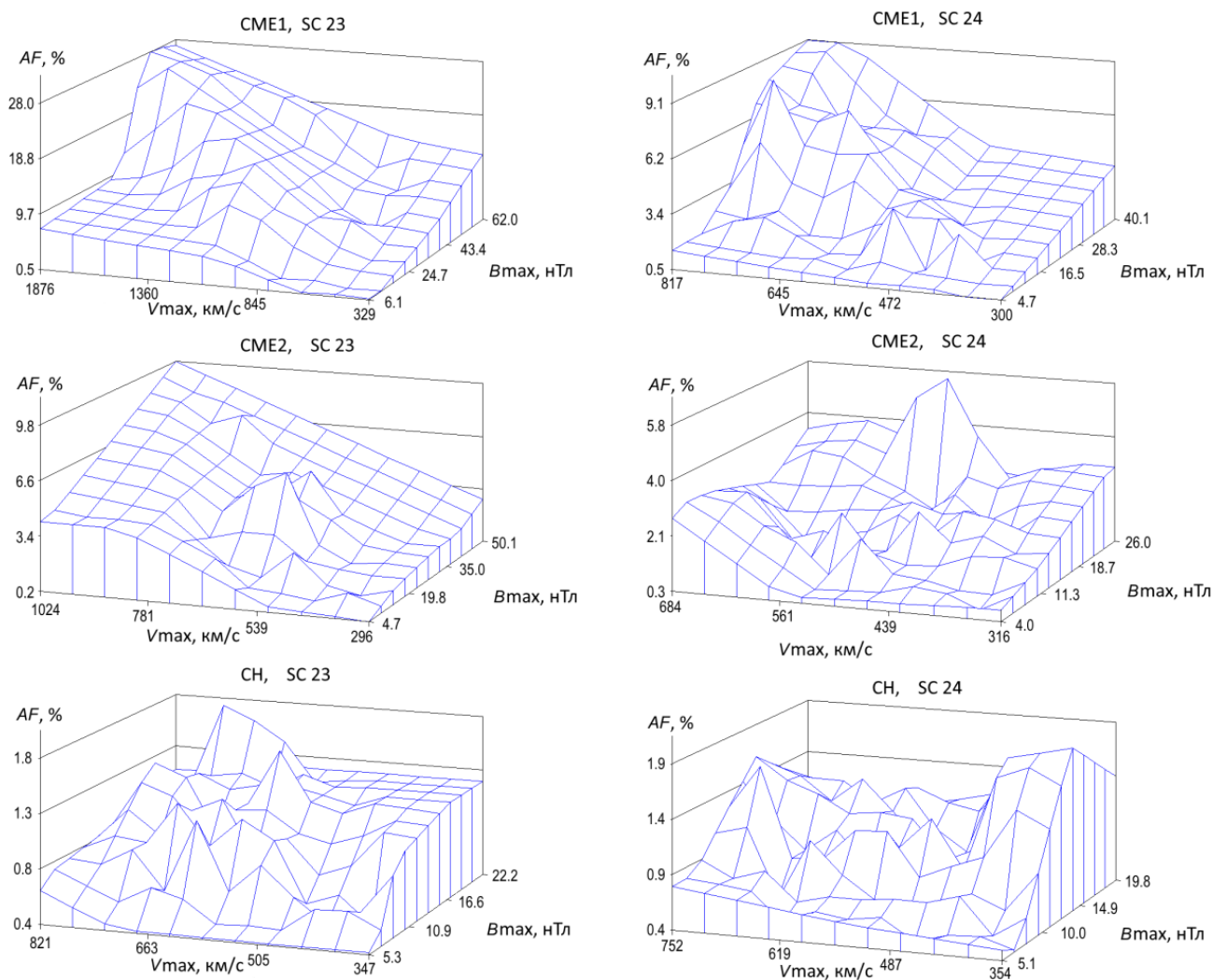


Рисунок 17 – Зависимость величины ФЭ от скорости СВ и индукции ММП в солнечных циклах 23 и 24 для разных групп событий.

Было показано, что распределения большинства параметров для рекуррентных событий, связанных с воздействием ВСП из КД, почти симметричные, имеют меньший разброс значений скорости СВ и индукции ММП (однако при больших средних значениях скорости, чем в группах КВМ) и не вызывают больших ФЭ (среднее значение 0.90 ± 0.03 %). Также установлено, что корреляция параметров ФЭ и межпланетных возмущений в группе ВСП из КД значительная ($r = 0.62$) для величины ФЭ и индукции ММП и умеренная для других пар параметров: $AF - V_{\max}$ ($r = 0.48$), $D_{\min} - B_{\max}$ (0.43), $A_{\text{хуmax}} - B_{\max}$ (0.34). Следует заметить, что максимальные значения ММП для таких событий наблюдаются именно в области взаимодействия (КОВ), и выявленная достаточно

тесная связь V_{max} и AF говорит о том, что ФЭ, связанные с воздействием потоков плазмы из КД, формируются именно в КОВ.

Кроме того, было показано, что для группы СН в солнечных циклах 23 и 24 наблюдаются значительные отличия в характере зависимости величины ФЭ от максимальных значений скорости СВ и индукции ММП, полученной методом линейной интерполяции для разных групп событий (см. рис. 17). Эти графики показывают, что линейная модель хорошо описывает зависимость AF от параметров возмущенного СВ для обеих групп СМЕ, но аналогичная линейная зависимость AF от параметров СВ выражена значительно хуже в группе СН в обоих солнечных циклах. Особенно выделяется область больших значений магнитного поля и низких значений скорости СВ для группы СН в 24-м солнечном цикле. По-видимому, для этой подгруппы событий частично сказывается не только влияние самих ВСП из КД, но и дополнительное влияние низкоскоростных МКВМ, “замешанных” в потоке плазмы. Случаи подобного совместного влияния МКВМ и ВСП из КД будут подробно обсуждаться в следующих разделах диссертации.

2.3 Взаимодействующие возмущения солнечного ветра

По мере распространения от Солнца к Земле ВСП из КД и МКВМ могут взаимодействовать между собой, что приводит к изменению ожидаемых величин параметров СВ и ММП. Существует ряд работ, посвященных исследованию различных характеристик подобных взаимодействий возмущений СВ. Например, источники взаимодействующих межпланетных возмущений и их возможная классификация обсуждаются в работах [21-22, 65, 83-84, 174] и др. Авторы отмечают изменение различных характеристик МКВМ в случае их взаимодействия, например, длинноволновых радиосигналов [131] или ионного состава солнечного ветра [221]. Еще в ранних работах (например, [82]) было

высказано предположение, что магнитные поля в последовательных КВМ могут усиливаться за счет взаимодействия с ударной волной и/или быстрым потоком СВ и тем самым вызывать сильные геомагнитные возмущения. Авторы пришли к выводу, что «взаимодействие между двумя быстрыми потоками плазмы в целом является нелинейным процессом, и, следовательно, составной поток представляет собой нечто большее, чем линейная суперпозиция его частей. Позже было показано, что взаимодействие МКВМ может привести к изменениям скорости, направления распространения, радиальному расширению, а также изменению внутренней структуры магнитного поля выбросов [172-174, 226].

Считается, что взаимодействие МКВМ между собой может быть представлено в четырех основных формах [263]:

- (1) две ударные волны, вызванные КВМ, взаимодействуют между собой, без взаимодействия основных частей МКВМ,
- (2) одна ударная волна взаимодействует с телом предшествующего МКВМ,
- (3) прямое взаимодействие между телами двух МКВМ,
- (4) магнитное пересоединение между последовательными КВМ.

Последние три могут привести к образованию множества сложных структур на расстоянии 1 а.е., начиная от частичного взаимодействия предшествующего выброса с ударной волной от следующего до регистрации множественных магнитных облаков или выброса/потока сложной структуры и большой длительности [83, 173-174, 250, 263 и ссылки в них]. Эти три случая (множественные МО, сложные выбросы и длительные события) соответствуют полному взаимодействию в том смысле, что результирующая структура на расстоянии 1 а.е. уже распространяется с плавным профилем скорости (обычно монотонно убывающим). Однако существуют также случаи частичного продолжающегося взаимодействия на орбите Земли, которые связаны с распространением быстрой ударной волны последующего выброса внутри предшествующего выброса [173].

Описания отдельных взаимодействующих событий – следующих друг за другом МКВМ – и их характеристики, рассчитанные по данным спутников,

коронографов приведены во многих работах [8, 76, 165-166, 237, 239, 259]. Работа [226] представляет собой обзор парных событий взаимодействующих КВМ, в котором уделено особое внимание физической природе этого взаимодействия. А некоторые авторы рассматривали различные аспекты взаимодействия МКВМ с ВСП из КД, в зависимости, например, от их взаимного расположения на солнечном диске [132, 140, 175].

Было показано, что взаимодействующие возмущения СВ могут быть более геоэффективными, чем те, которые регистрируются на Земле по одиночке, они вызывают значительные магнитные бури [114, 262] или приводят к образованию более сложных условий для возникновения и развития Форбуш-эффектов [41-43, 49, 227].

Существование большого количества следующим друг за другом и впоследствии накладывающихся событий не представляется удивительным. Это легко объяснить, например, тем фактом, что КД большой площади могут пересекать центральный солнечный меридиан в течение нескольких дней, и затем эффекты от их ВСП могут регистрироваться на Земле в течение нескольких суток, а за это время на солнечном диске может случиться не один выброс КВМ. Если обратиться только к официальному списку КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), легко убедиться, что они регистрируются не только каждые несколько дней, но, нередко и по несколько раз за один день. Даже если отбросить те МКВМ, что являются обратными для Земли, список всё равно будет внушительным. При этом следует учесть, что список выбросов неполный, т.к. коронографы, например, не способны регистрировать эрупции солнечного вещества, происходящие в центральной части солнечного диска и обращенные в сторону Земли, которые в большинстве случаев оказывают влияние на вариации КЛ, регистрируемые наземными детекторами. При этом такие эрупции хорошо видны на фильмах, предоставляемых, например, Solar Dynamics Observatory (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/dailymov.php>), и они учитываются нами при выделении Форбуш-эффектов и отождествлении их с солнечными источниками.

Также стоит добавить, что используемая в работе база данных FEID, предоставляет возможность исследовать Форбуш-эффекты малой амплитуды ($\geq 0.3\%$), что обеспечивается уникальным методом обработки данных (GSM, Belov et al 2018) сразу всей сети НМ, а не просто отдельных станций.

Однако вопрос о том, где лежит граница между взаимодействующими и изолированными возмущениями СВ остается открытым. Автор [41-43] на основе анализа большого количества межпланетных возмущений, собранных в базе данных FEID, установили, что в период с 1995 по 2022 годы в общей сложности было зарегистрировано более 3 тысяч событий. Несложные расчеты (отношение количества дней к количеству ФЭ) позволяют сделать вывод, что, в среднем, каждые три дня у Земли регистрируется новое межпланетное возмущение, а, следовательно, и новый ФЭ.

Гистограмма на рис. 18 отражает связь количества событий со временем (в часах) до начала следующего события $t \{FE; FE+1\}$ для всех 3858 событий, зарегистрированных в базе данных FEID за период с 1995 по 2022 г. Видно, что с большой долей вероятности (примерно 50%) встречаются события, разделенные промежутком от 20 до 60 ч, однако, встречаются и события, имеющие гораздо большие промежутки. Медиана для данной выборки (отмечена на рисунке как m) составляет 41 ч, а среднее значение (обозначена как a) – 63 ч.

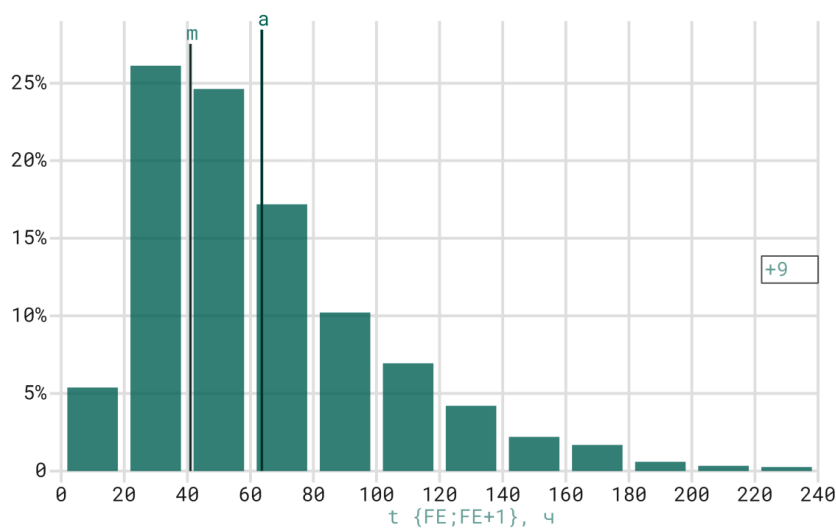


Рисунок 18 – Распределение количества событий в зависимости от времени (в часах) между соседними событиями в FEID за 1995-2022 гг. m – медиана, a – среднее.

Путем экспериментального отбора, на основе подсчета времени между соседними событиями в базе данных и наблюдения изменения их характеристик, нами было определено условное 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.

Выбор именно такого интервала времени подкрепляется также еще одним фактом. Рассмотрим только невзаимодействующие или изолированные события (т.е. те, после начала которых, в течение 50 часов не зарегистрировано новых межпланетных возмущений), независимо от типа солнечного источника, но при условии $> 80\%$ покрытия данными СВ, ММП и КЛ. Применение метода наложения эпох (см. рис. 19) позволяет сделать несколько важных выводов.

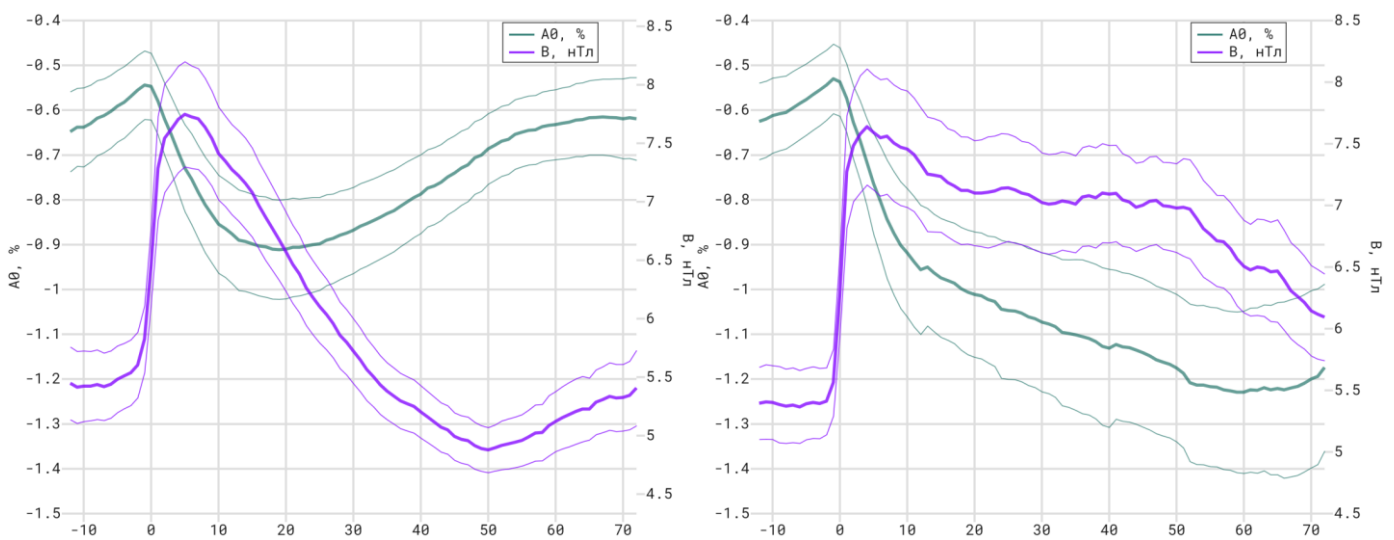


Рисунок 19 – Поведение плотности потока КЛ (зеленая кривая – A_0 , %) и величины ММП (фиолетовая кривая – B , нТл) в изолированных событиях (левая панель, 2118 событий) и во взаимодействующих событиях (правая панель, 1740 событий) за 1995-2022 гг.

Во-первых, самые резкие изменения величины ММП (фиолетовая кривая) однозначно происходят в первые 10 часов после начала события, а через 35-50 часов величина ММП однозначно возвращается к фоновым значениям. Во-вторых, в обозначенные выше 50 часов укладываются все основные изменения плотности потока КЛ: фаза спада длится около 20 ч, а в следующие 30 ч плотность КЛ возвращается к начальным значениям (см. рис. 19, левая панель).

Если же сравнить поведение этих же параметров для взаимодействующих событий (тех, в которых следующее межпланетное возмущение зарегистрировано менее чем через 50 ч после начала), также независимо от типа солнечного источника, и при условии $>80\%$ покрытия данными СВ и КЛ, картина будет совершенно другой (см. рис. 19, правая панель). Хорошо видно, что наличие взаимодействия выражается в повышенном ММП, которое не возвращается к фоновому уровню в течение нескольких десятков часов, и оказывает влияние на профиль ФЭ, который оказывается совершенно не типичным, поскольку фаза спада оказывается намного более длительной и сам ФЭ более глубокий. Очевидно, что в данном случае присутствует влияние не одного, а как минимум двух следующих друг за другом межпланетных возмущений. Далее будет показано, что одним из важных факторов влияния следующего события на предыдущее является именно увеличение значений ММП и изменение как магнитуды, так и длительности фазы спада плотности КЛ. Таким образом, можно считать выбранный временной интервал (50 ч) удовлетворительным порогом для разделения взаимодействующих и изолированных межпланетных возмущений.

2.4 Выводы по Главе 2

Рассмотрены основные характеристики различных типов возмущений солнечного ветра, связанных с КВМ и потоками плазмы из КД. Описаны особенности распространения МКВМ, предложена собственная эмпирическая модель оценки скорости и времени распространения МКВМ. Обсуждены последствия воздействия структур МКВМ на галактические космические лучи, геомагнитную активность, а также связанные с ними протонные возрастания.

Приведены примеры воздействия коротирующих областей взаимодействия и высокоскоростных потоков из КД на околоземное космическое пространство,

рассмотрены отличительные особенности модуляции потока космических лучей этими структурами.

Описано существование сложных, оказывающих влияние друг на друга, крупномасштабных возмущений солнечного ветра и определен временной критерий отбора взаимодействующих и изолированных межпланетных возмущений.

Глава 3. Характеристики Форбуш-эффектов, вызванных различными взаимодействующими возмущениями солнечного ветра

Анализ поведения параметров ММП, СВ, КЛ и ГА, а также солнечных источников позволили уточнить типы и количество групп взаимодействующих межпланетных возмущений для большого периода наблюдений с 1995 по 2022 гг. [41-43, 49, 227]. В частности, в настоящей работе будут обсуждаться 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 ВСП 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 ВСП из КД (ICME+HSS) – 176 пар.
5. Последовательно зарегистрированные на 1 а.е. пары ВСП из КД (HSS1+HSS2) – 136 пар.

Что касается пятой группы – взаимодействующих высокоскоростных потоков 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). Были отобраны две контрольные группы:

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

Уточним, что при выборе событий контрольных групп были применены дополнительные условия, т.к. многие события не являются достаточно «чистыми»

не по временному параметру, а по некоторым другим. Например, довольно часто данные СВ и вариаций КЛ позволяют сделать предположение о том, что в потоке из КД наблюдаются признаки МКВМ (пониженная температура, гладко вращающиеся компоненты поля и др.). Более подробно отличие параметров ФЭ, вызванных разными возмущениями СВ описано, например, в работах [33, 35, 182]. Для контрольной группы потоков из КД, также были исключены следующие друг за другом события (с разницей более 50 ч), вошедшие в группу взаимодействующих потоков из КД.

Интересно отметить, что количество событий в различных группах подвержено зависимости от фазы цикла солнечной активности. На рис. 20 представлено изменение количества событий в различных группах за весь исследуемый период времени (верхняя панель – группы изолированных событий, средняя панель – группы МХ, нижняя панель – группы, включающие пары взаимодействующих событий). Вертикальными стрелками (max) на верхней панели отмечены годы максимумов солнечной активности.

Хорошо видна разница в поведении количества событий в группах, включающих МКВМ и высокоскоростные потоки из КД. Большая часть событий «чистых» КД однозначно приходится на годы спада и минимума солнечной активности (2006–2009 и 2017–2019), когда количество событий с участием МКВМ, наоборот, достигает минимальных значений. Максимальное количество взаимодействующих МКВМ разных групп, наоборот, приходится на годы роста и максимума солнечной активности, что вполне ожидаемо. Интересно отметить, однако, что рост и максимум 23-го солнечного цикла характеризуется большим количеством МКВМ, взаимодействующих еще до прихода к Земле, а в 24-м цикле «перевешивают» события, связанные с участием ВСП из КД, количество, площади и частота воздействия потоков из которых действительно были более значимы, чем в 23-м цикле [137, 261]. Также стоит отметить, что размах изменения количества изолированных событий больше, чем взаимодействующих, что еще раз доказывает существование большого числа влияющих друг на друг возмущений СВ, регистрируемых на разных фазах солнечных циклов.

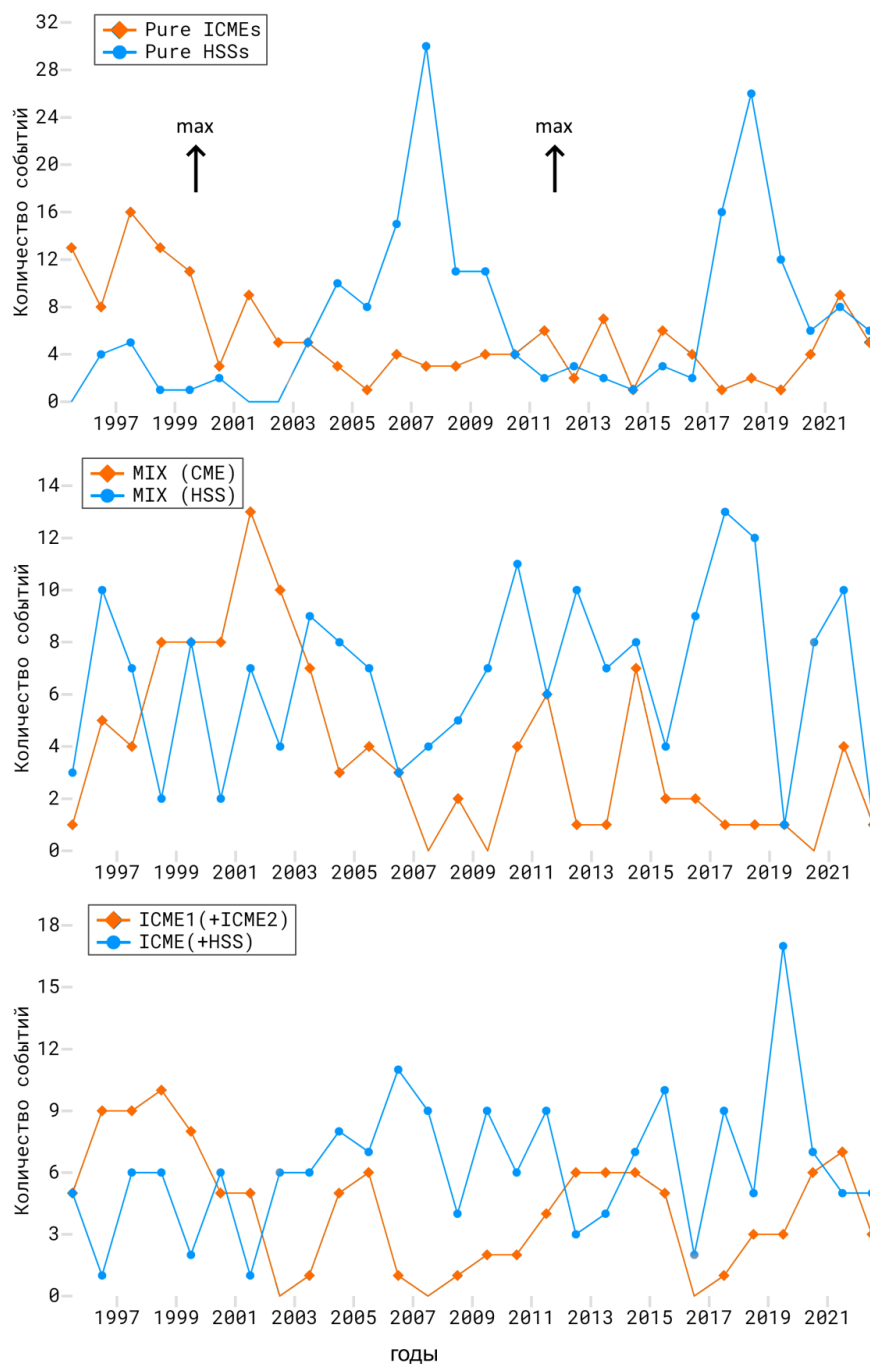


Рисунок 20 – Изменение количества событий в разных группах за период с 1995 по 2022 гг.

Для каждой группы событий были рассчитаны средние значения различных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности, в частности, максимальная скорость СВ – V_{\max} , максимальное значение ММП – B_{\max} и время их регистрации (tV_{\max} и tB_{\max}) от начала события, величина ФЭ – AF и время достижения минимума плотности КЛ – t_{\min} , максимальная экваториальная анизотропия КЛ – $A_{\text{ху}}_{\max}$ и время ее регистрации от начала события – $tA_{\text{ху}}_{\max}$, экстремальные значения геомагнитных индексов – $K_{\text{р}}_{\max}$,

Dstmin и времена их регистрации – tKpmax и tDstmin. Нами также был посчитан параметр VmBm, характеризующий возмущенность солнечного ветра и нормированный следующим образом: $VmBm = (V_{max} * B_{max}) / (V_0 * B_0)$, где V_0 и B_0 – параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются $V_0 = 400$ км/с и $B_0 = 5$ нТл). Все полученные значения приведены в Таблице 2. Каждый столбец при этом содержит данные для соседних событий в каждой группе возмущений в отдельности, а не характеристики комплексного события.

Особенности перечисленных выше различных типов взаимодействующих событий, и анализ результатов, представленных в таблице, подробно описаны в следующих разделах.

Таблица 2. Средние значения различных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для разных групп и подгрупп событий.

Параметр/ Тип межпланетного возмущения	ICME (+HSS) (176)	(ICME+) HSS (176)	ICME1 (+ICME2) (120)	(ICME1+) ICME2 (120)	HSS1 (+HSS2) (136)	(HSS1+) HSS2 (136)	MIX CME (107)	MIX HSS (186)	Pure ICMEs (153)	Pure HSSs (194)
V_{max}, км/с	416±6.3	543±8.0	447±8.5	475±10.1	502.73	553.75	500±12.6	527±7.2	447±7.5	551±7.4
tV_{max}, ч	9.7±0.67	23.9±0.96	8.5±0.77	14.2±1.26	20.74	26.46	13.4±1.30	25.2±1.09	12.5±1.02	26.3±1.04
B_{max}, нТл	9.5±0.34	11.4±0.27	8.9±0.35	12.0±0.55	9.56	10.23	13.9±0.77	11.3±0.34	10.0±0.37	10.7±0.25
tB_{max}, ч	11.5±0.67	8.6±0.65	10.3±0.83	11.4±1.14	8.68	9.11	14.2±1.24	12.5±0.70	14.4±1.05	10.4±0.64
V_{mBm}	2.05±0.10	3.20±0.11	2.06±0.11	3.05±0.20	2.47	2.92	3.75±0.33	3.07±0.13	2.31±0.12	3.02±0.09
AF, %	0.72±0.06	0.85±0.03	0.78±0.08	1.39±0.13	0.78	0.84	1.91±0.18	1.05±0.05	1.08±0.01	0.76±0.03
t_{min}, ч	14.6±0.64	26.8±1.23	16.8±0.80	25.7±1.52	24.9	28.63	23.9±1.36	30.2±1.30	24.0±1.18	29.1±1.23
A_{ху}max, %	0.99±0.03	1.06±0.02	1.17±0.05	1.32±0.06	0.92	0.96	1.59±0.07	1.11±0.03	1.24±0.05	0.96±0.02
tA_{ху}max, ч	11.6±0.66	26±1.53	12.3±0.87	19.7±1.71	21.36	30.12	19.2±1.46	24.3±1.46	22.1±1.42	23.4±1.36
K_pmax	3.09±0.11	4.01±0.09	3.13±0.12	3.93±0.16	3.45	3.76	4.36±0.15	3.97±0.08	3.45±0.12	3.89±0.08
tK_pmax, ч	9.4±0.63	13.0±0.98	8.9±0.82	11.0±1.01	11.53	13.27	14.4±1.37	16.2±0.97	14.3±1.18	14.7±0.95
D_{st}min, нТл	-22.9±2.09	-34.3±1.64	-26.1±2.04	-41.7±3.39	-24.17	-28.56	-50.2±5.45	-33.2±1.60	-30.8±2.01	-26.0±1.20
tD_{st}min, ч	12.4±0.67	19.0±1.05	11.2±0.79	15.8±1.08	19.04	21.99	22.7±1.37	23.5±1.17	18.1±1.19	22.1±1.05

3.1 Изолированные события

На рисунках 21 и 22 приведены примеры типичных событий из контрольных групп. На верхней панели указаны поведение скорости СВ (V) и модуля индукции ММП (B), на средней панели – изменение плотности КЛ (A_0) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xy}), на нижней панели – изменение геомагнитных индексов Dst и K_p . Вертикальная линия – начало события (желтая линия (SC) – момент регистрации ударной волны; фиолетовая линия (ons) – начало события в случае отсутствия ударной волны, определяемое по резким изменениям основных параметров СВ).

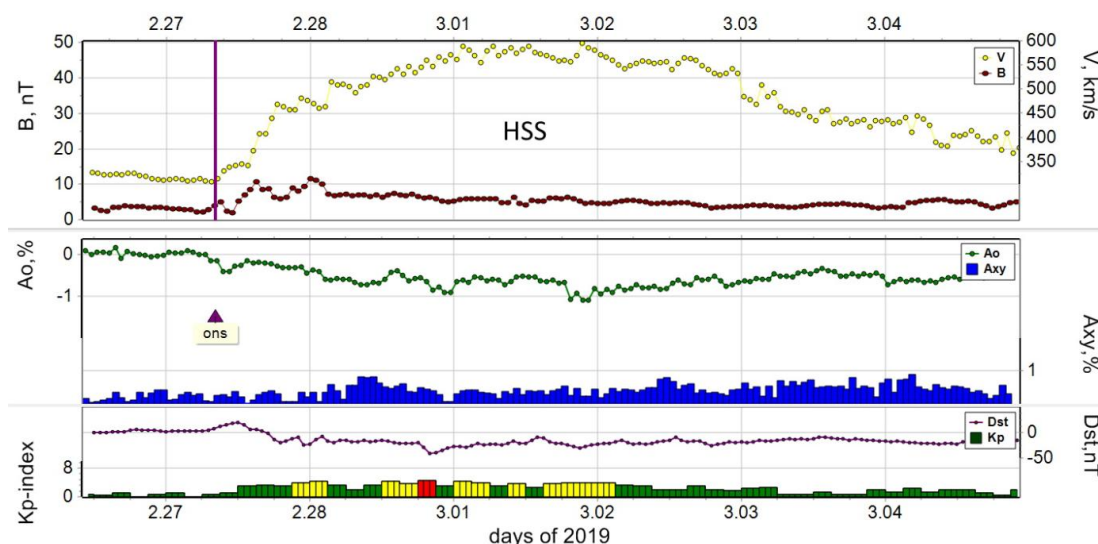


Рисунок 21 – Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для потока из КД в феврале-марте 2019 г. (пример события из группы Pure HSSs).

Общий профиль изменения параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности значительно отличается для каждого случая. Регистрация на Земле ВСП из КД (рис. 21) и МКВМ (рис. 22) обычно связана со значительным ростом модуля индукции ММП (до 32 нТл для группы Pure ICMEs и 22 нТл для группы Pure HSSs в исследуемой выборке) и увеличением скорости СВ ($V_{\max} = 888$ и 736 км/с соответственно). Однако средние значения скорости СВ больше для группы Pure HSSs (551 км/с), чем для Pure ICMEs (447 км/с), и возмущенное состояние межпланетной среды (интервалы, когда значения модуля

индукции ММП >8 нТл и/или скорость СВ >500 км/с), соответственно, наблюдается дольше (иногда до 5–7 дней). При этом величина регистрируемых ФЭ, наоборот, больше для группы Pure ICMEs, чем для группы Pure HSSs (в среднем, $AF = 1.08$ и 0.76% соответственно).

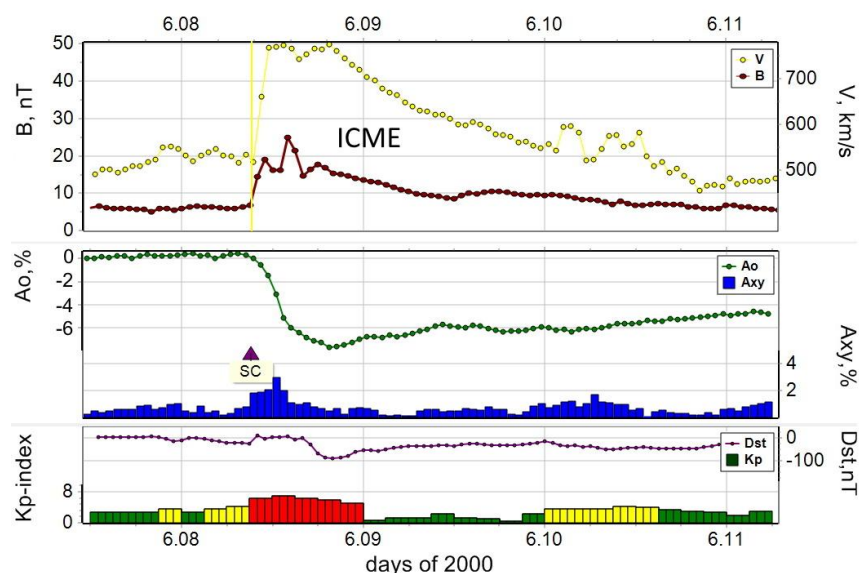


Рисунок 22 – Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для КВМ в июне 2000 г. (пример события из группы Pure ICMEs).

С точки зрения геомагнитной эффективности группа Pure ICMEs сравнима с группой Pure HSSs, средние значения геомагнитных индексов для изолированных МКВМ и ВСП из КД составляют $Dst_{min} = -30.0$ и -26.0 нТл; $Kp_{max} = 3.45$ и 3.89 соответственно, однако экстремальные значения в отдельных событиях все-таки значимо выше для группы Pure ICMEs.

3.2 Пары следующих друг за другом межпланетных корональных выбросов массы (ICME1+ICME2)

В работах [184] и [251] было показано, что не все КВМ возникают на Солнце независимо друг от друга. Были выделены два класса таких событий – симпатические и гомологичные корональные выбросы [174]. В целом, к

симпатическим КВМ относятся выбросы, происходящие в разных областях солнечного диска, но почти “одновременно” (разница до нескольких часов, [184]). Гомологичными КВМ называют выбросы, возникающие последовательно из одного и того же региона (активной области) за относительно короткий интервал (опять же несколько часов), имеющие сходную морфологию и схожие характеристики [93, 251]. Два типа взаимосвязанных КВМ являются потенциальными кандидатами на взаимодействие между собой, и такие взаимодействия могут происходить как на начальной стадии распространения в солнечной короне, так и продолжаться в межпланетном пространстве.

Авторы [166] предположили, что последовательные невзаимодействующие по мере распространения до орбиты Земли МКВМ также могут обладать большой геоэффективностью. Основная причина этого заключается в том, что первый КВМ выметает часть массы фоновое солнечного ветра, что приводит к образованию менее плотных, но более быстрых потоков СВ перед вторым КВМ. Таким образом, второй МКВМ испытывает меньшее сопротивление и распространяется быстрее [172, 174]. В исследовании [173] авторы выявили 49 ударных волн, распространявшихся внутри предыдущего коронального выброса в период с 1997 по 2006 год.

В настоящей работе будут отдельно рассмотрены как события, вступившие во взаимодействие до прибытия к орбите Земли (группа MIX CME), так и события, взаимодействие которых началось и/или продолжалось на 1 а.е. (группа ICME1+ICME2)

Для начала рассмотрим более подробно характеристики пар следующих друг за другом и взаимодействующих МКВМ. На рисунке 23 приведен пример событий 14 и 16 июня 2005 г., вошедших в эту группу. 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 была «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.

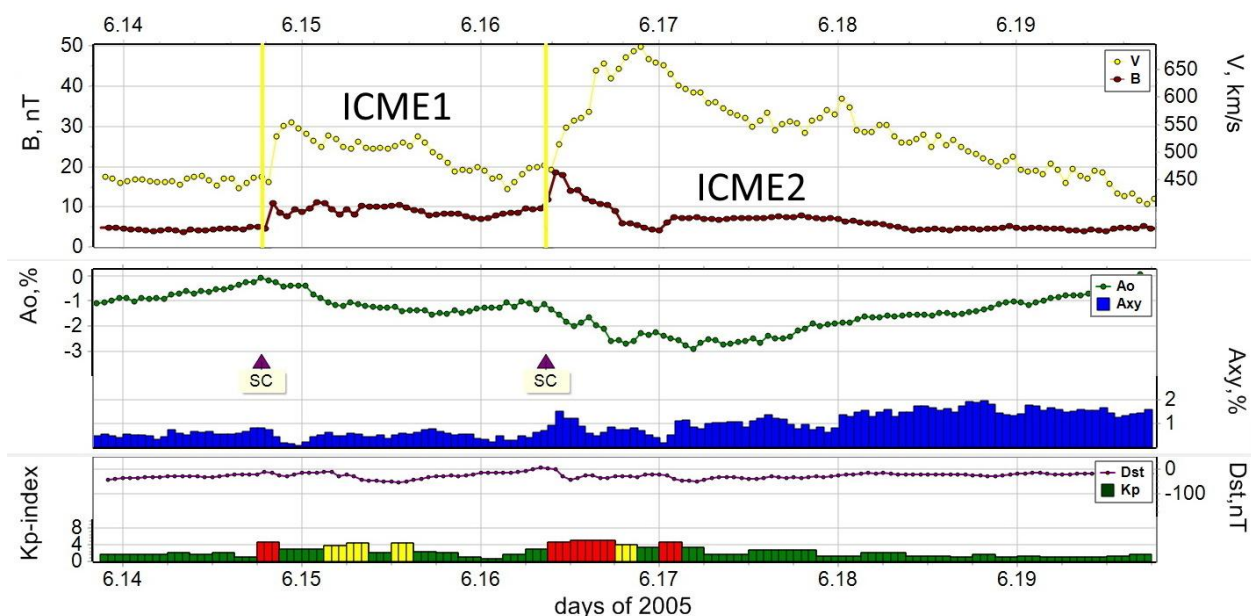


Рисунок 23 – Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для взаимодействующих КВМ в июне 2005 г. (пример события из группы ICME1+ICME2).

Что касается средних значений параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для взаимодействующих последовательных МКВМ, были обнаружены следующие изменения в сравнении с контрольной группой Pure ICMEs (см. также Таблицу 2):

- изменение времени развития парных событий, в частности, сокращение времени наступления максимумов ММП (t_{Vmax}), скорости СВ (t_{Vmax}) и времени достижения минимума ФЭ (t_{min}) – для первых событий из пары упомянутые времена уменьшаются в 1.4, 1.5 и 1.4 раза соответственно, для вторых событий практически не изменяются.
- изменение величины наблюдаемых ФЭ (AF) – для первых МКВМ величина ФЭ уменьшается (0.78% против 1.08%), а для вторых МКВМ величина ФЭ, наоборот, увеличивается (1.39% против 1.08%);
- изменение уровня геомагнитной активности (индексы A_p , K_p , Dst_{min}) – небольшое уменьшение геомагнитной эффективности первых МКВМ, и увеличение геомагнитной эффективности вторых МКВМ в сравнении с контрольной группой (например, $K_{pmax} = 3.13$ и 3.93 против 3.45)

- изменение степени возмущенности межпланетной среды (параметр $VmVm$) – для подгруппы первых ICME1(+ICME2) и вторых из пары МКВМ (ICME1+)ICME2 средние значения $VmVm$ составили 2.06 ± 0.11 и 3.05 ± 0.20 соответственно, что позволяет сделать вывод о том, что вторые события из пары КВМ оказываются мощнее, чем первые. Почти в половине событий подгруппы ICME1(+ICME2) значения параметра $VmVm$ близки к 1, т.е. фактически к спокойному солнечному ветру, по-видимому, это медленные волоконные выбросы корональных масс, движущиеся по фоновому ветру, которые впоследствии «догоняют» более быстрые выбросы, попавшие во вторую подгруппу (ICME1+)ICME2.

На гистограммах (см. рис. 24) приведены распределения величин параметров V_{max} и V_{max} для разных групп: синим цветом - контрольной группы Pure ICMEs, желтым – первых МКВМ из взаимодействующей пары, розовым – вторых МКВМ из взаимодействующей пары. Анализ гистограмм позволяет сделать вывод о том, что вторые МКВМ имеют большие скорости. Разница средних значений V_{max} для первых и вторых МКВМ из пары существенна (447 и 475 км/с соответственно), что подтверждает это предположение. Также в подгруппе (ICME1+)ICME2 регистрируются большие значения индукции магнитного поля (об этом свидетельствует и большее среднее значение и выраженный второй максимум в распределении V_{max}). Всё это приводит к росту величины регистрируемых ФЭ (AF) для вторых событий из взаимодействующей пары ICME1+ICME2 до 1.39 %, тогда как для первых событий она составляла 0.78%.

По сравнению с изолированными выбросами, геомагнитные возмущения, вызванные взаимодействующими МКВМ, должны учитывать изменения параметров, возникающие в результате их взаимодействия. Обычно (хотя и не всегда) это увеличивает их геоэффективность. Регистрация выброса на расстоянии 1 а.е. обычно занимает около суток, а это означает, что эти возмущения могут длиться многие часы. Напротив, длительность регистрации взаимодействующих выбросов или сложных образовавшихся в результате

взаимодействия структур может занимать до 3 дней [83], так что магнитосфера Земли находится под значительным воздействием возмущенного солнечного ветра в течение гораздо более длительного времени.

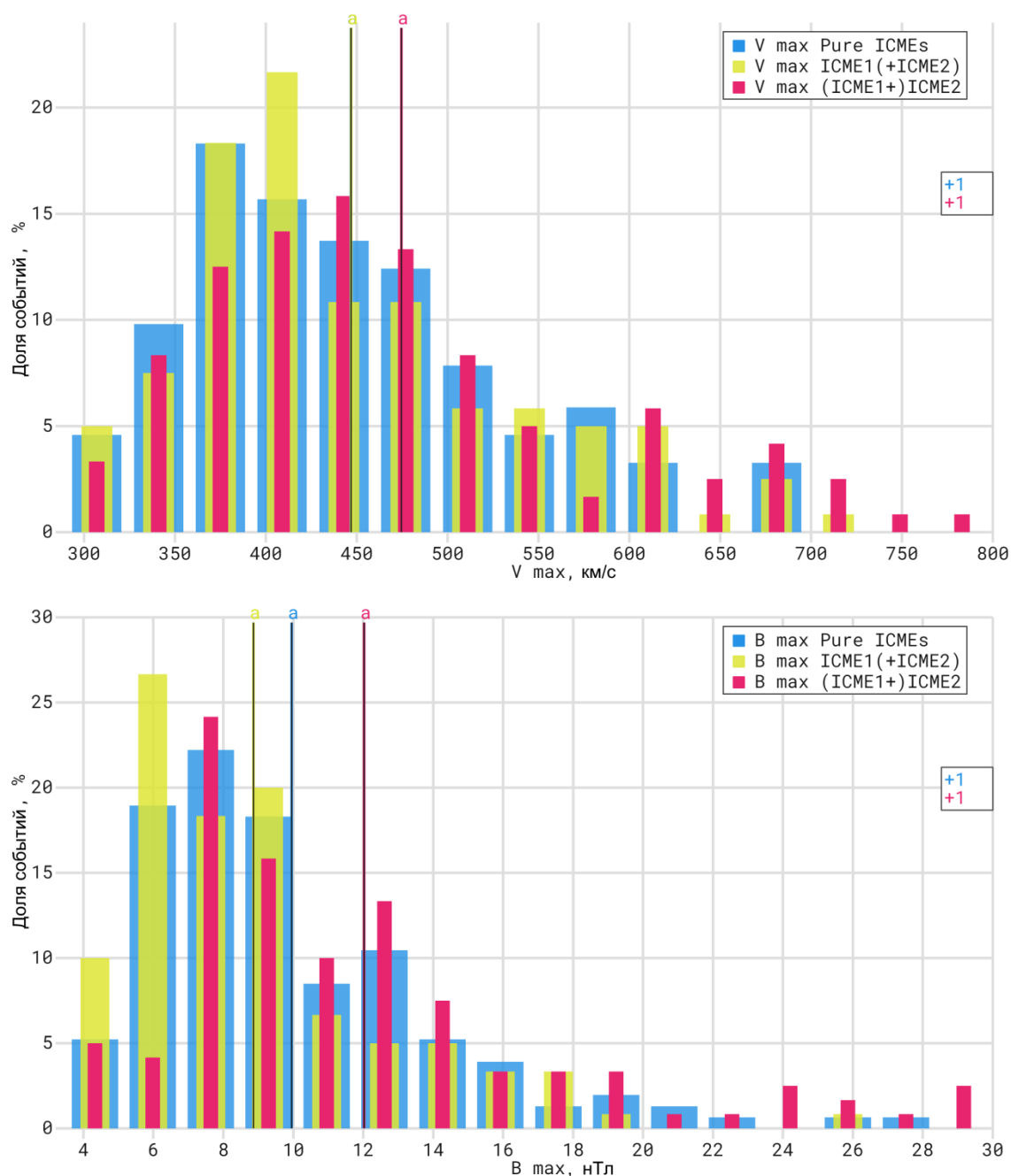


Рисунок 24 – Распределение максимальных значений скорости СВ (верхняя панель) и модуля ММП (нижняя панель) для первых (желтые столбики) и вторых (розовые столбики) МКВМ из группы ICME1+ICME2 в сравнении с контрольной группой Pure ICMEs (синие столбики). Вертикальными цветными линиями (а) обозначены средние значения параметра в соответствующей группе.

Таким образом, наиболее частым результатом взаимодействия МКВМ на расстоянии 1 а.е. являются события с множественными магнитными облаками, в которых можно различить отдельные выбросы, а также сложные выбросы, при которых некоторые индивидуальные характеристики теряются, и ударные волны, 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 солнечного ветра.

3.3 Пары межпланетного коронального выброса массы и следующего за ним высокоскоростного потока из корональной дыры (ICME+HSS)

На рисунке 25 приведен пример взаимодействующей пары межпланетных возмущений из группы ICME+HSS 27–28 сентября 2007 г. Регистрация на Земле МКВМ была связана с приходом ударной волны, ростом величины ММП и скорости СВ, однако уже на следующие сутки приходится новый рост скорости и поля, связанный с воздействием на Землю ВСП из КД, приведший к регистрации малой магнитной бури и дальнейшему снижению плотности КЛ.

В сравнении с контрольными группами ICME и HSS основные параметры событий, являющихся частью взаимодействующих пар ICME+HSS, изменились следующим образом:

- 1) Уменьшение амплитуды наблюдаемых ФЭ (AF) для МКВМ, участвующих во взаимодействии, в 1.5 раза и, наоборот, увеличение амплитуды ФЭ для HSS, участвующих во взаимодействии, в 1.2 раза.

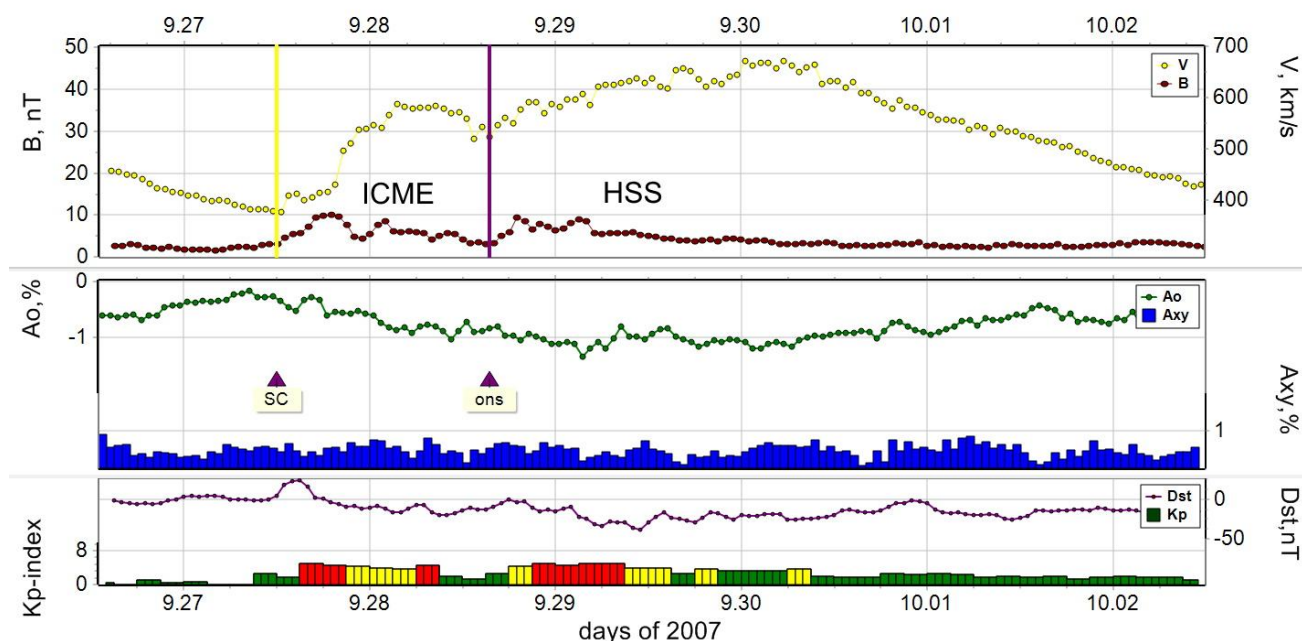


Рисунок 25 – Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для МКВМ, взаимодействующего с ВСП из КД в сентябре-октябре 2007 г. (пример события из группы ICME+HSS)

2) Сокращение времени развития события и времени достижения максимумов поля и скорости (t_{min} , t_{Vmax} , t_{Vmax}), на 3–10 ч для МКВМ, участвующих во взаимодействии, и на 2–3 ч для HSS.

3) Уменьшение геомагнитной эффективности взаимодействующего МКВМ (к примеру, среднее значение Dst_{min} составило -23 нТл против -31 нТл для контрольной группы Pure ICMEs) и увеличение геомагнитной эффективности взаимодействующего ВСП из КД ($Dst_{min} = -34$ нТл против -26 нТл контрольной группы Pure HSSs).

4) Степень возмущенности межпланетной среды (параметр $VmVm$) оказалась меньше для участвующего во взаимодействии МКВМ (2.05 против 2.31), что приводит и к уменьшению амплитуды регистрируемых ФЭ. Ниже приведены рисунки, отражающие связь этих параметров для МКВМ, взаимодействующих с ВСП из КД (слева), и контрольной группы Pure ICMEs (справа).

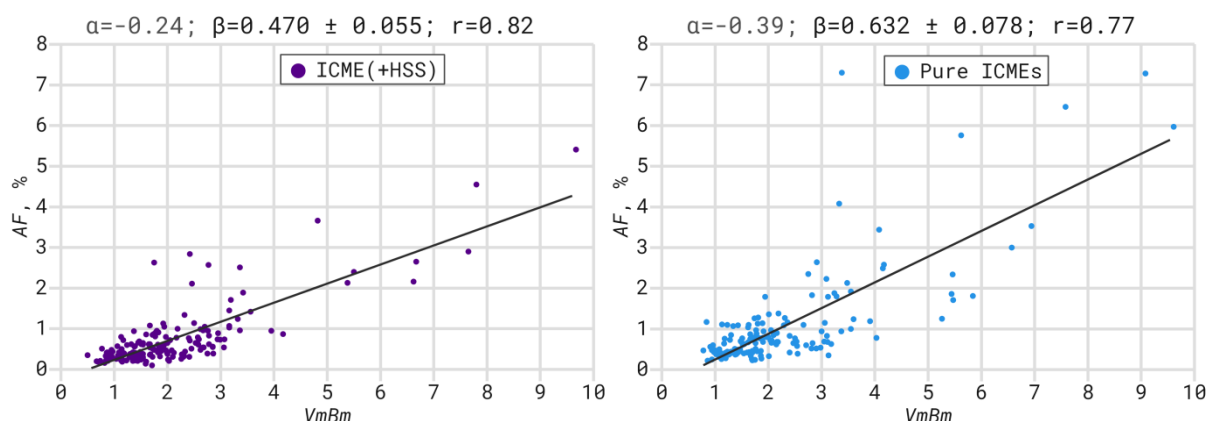


Рисунок 26 – Связь AF и VmBm для МКВМ, взаимодействующих с ВСП из КД (слева), и «чистых» МКВМ (справа).

Для обеих групп имеется высокая корреляция параметров AF и VmBm (коэффициенты корреляции 0.82 и 0.77 для левого и правого графика соответственно) при близких значениях количества событий в выборках (176 и 153). Однако, заметно, что у группы взаимодействующих МКВМ разброс значений AF несколько меньше, большая часть событий имеют магнитуды $< 2\%$, хотя контрольная группа позволяет сделать вывод, что потенциально эффективных МКВМ регистрируется немало, просто наличие взаимодействия со следующим за ними потоком плазмы из КД не даёт в полной мере проявиться.

Средние значения параметра VmBm во всех группах, включающих ВСП из КД, оказались довольно близки (~ 3), что уже является признаком возмущенного СВ (см. Табл. 2). По-видимому, ключевым моментом здесь является именно скорость СВ, которая оказывается высокой (> 500 км/с) в любом событии, включающем потоки плазмы из КД. Однако, параметр VmBm для ВСП из КД, следующего за МКВМ, отличается от значений контрольной группы Pure HSSs, в большую сторону: 3.2 против 3.02, в результате чего наблюдается небольшое увеличение их геомагнитной эффективности и эффективности модуляции КЛ. Увеличение этого параметра, по-видимому, связано с ростом регистрируемых значений индукции ММП у потоков плазмы из КД, участвующих во взаимодействии с МКВМ. На рисунке ниже приведены распределения параметров Vmax и Bmax для потоков из КД, следующих за МКВМ (желтые столбики), в сравнении с контрольной группой HSS (синие столбики).

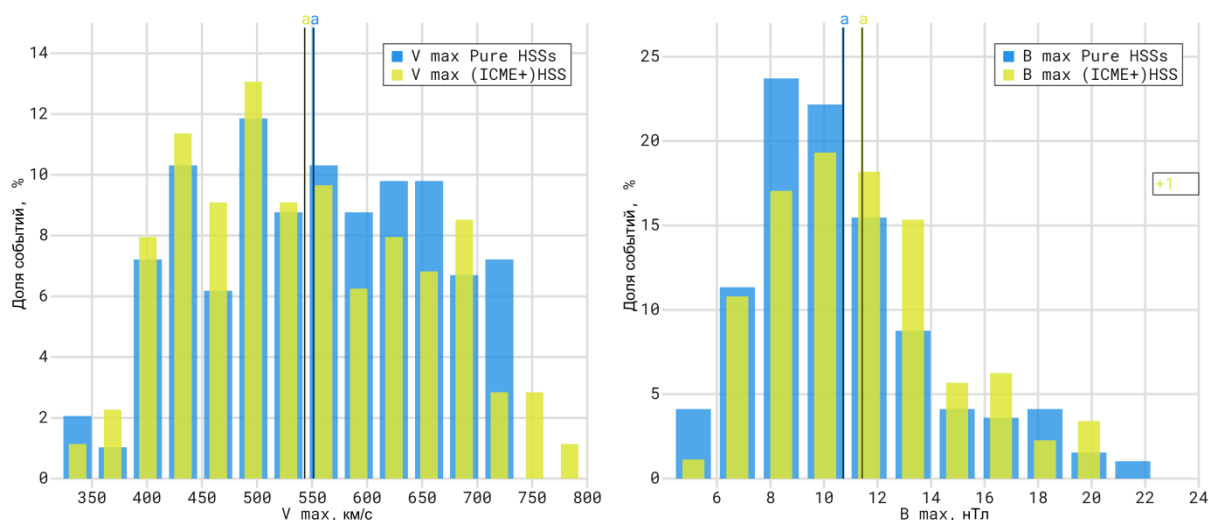


Рисунок 27 – Распределение максимальных значений скорости СВ и модуля ММП для ВСП из КД, взаимодействующего с МКВМ (желтые столбики) в сравнении с контрольной группой Pure HSSs (синие столбики). Вертикальными цветными линиями (а) обозначены средние значения параметра в соответствующей группе.

Видно, что распределение скоростей у рассматриваемых групп очень похоже и средние значения максимальных скоростей СВ близки, а вот распределение значений максимального ММП отличаются – имеется сдвиг в сторону больших значений для взаимодействующих с МКВМ потоков плазмы из КД. Это подтверждает наше предположение о том, что наличие МКВМ перед ВСП из КД, усиливает регистрируемое в нём поле, что сказывается на изменении магнитуды ФЭ и увеличении ожидаемой изначально геомагнитной активности во время этих событий.

3.4 Межпланетные возмущения, вступившие во взаимодействие до прибытия к Земле

На рисунке 28 приведено поведение основных параметров межпланетной среды, КЛ и ГА в событии 18–20 февраля 2011 г., вошедшем в группу MIX CME. Источником данного межпланетного возмущения стали несколько

ассоциированных со вспышками выбросов корональной массы, происходивших 14–15 февраля 2011 г. в АО 11158. Самыми значительными из них были два КВМ типа гало, зарегистрированных 14 февраля в 18:24UT (ассоциирован со вспышкой класса M2.2 в 17:20UT) и 15 февраля в 02:24UT (ассоциирован со вспышкой класса X2.2 в 01:44 UT). Более поздний КВМ имел намного большую начальную скорость (669 км/с и 326 км/с соответственно), но произошел в той же активной области и распространялся примерно в том же направлении. Это, по-видимому, привело к взаимодействию двух структур в межпланетном пространстве и регистрации у орбиты Земли одного, но сложного и длительного возмущения СВ. Ударная волна была зарегистрирована в 01:30UT 18 февраля 2011 г., максимальное значение ММП составило $B_{\max} = 30.6$ нТл, скорости СВ $V_{\max} = 678$ км/с (см. верхнюю панель рис. 28), наблюдалось магнитное облако длительностью 33 часа, начавшееся 18 февраля в 20:00UT (заштрихованная серая область на рисунке, данные каталога WIND (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html)). Магнитуда соответствующего ФЭ составила $AF = 4.5\%$, максимальное значение экваториальной составляющей анизотропии КЛ $A_{\text{ху}}_{\max} = 1.55\%$ (см. среднюю панель рис. 28). В данном событии были зарегистрированы интервалы малой магнитной бури (нижняя панель рис. 3, $K_{\text{pmax}} = 5-$, $D_{\text{stmin}} = -82$ нТл).

Рисунок 29 показывает поведение основных параметров ММП, СВ, КЛ и ГА в событии 23–27 октября 2020 г., вошедшем в группу MIX HSS. Источником этого межпланетного возмущения стало длительное совместное воздействие ВСП из КД C976 и C977 (https://solen.info/solar/coronal_holes.html), проходивших центральный солнечный меридиан в период с 19 по 24 октября, а также КВМ, связанного с эрупцией волокна над АО 12776, произошедшей около 12UT 19 февраля (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?img1=sdo_a193&img2=goesx&date=20201019).

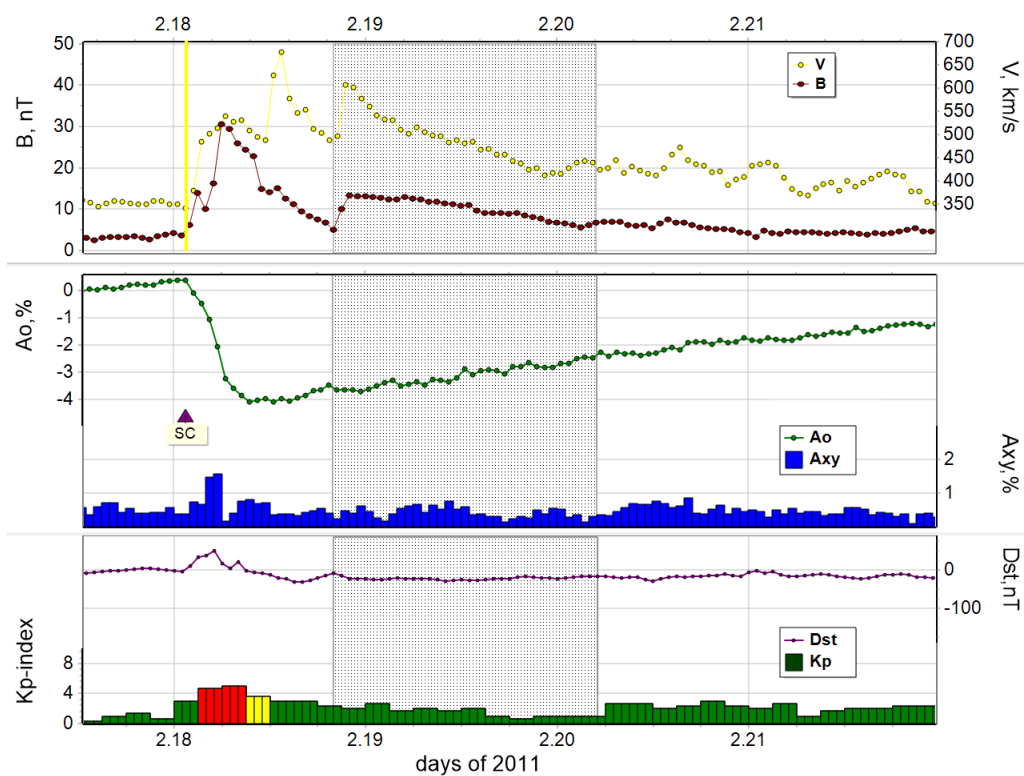


Рисунок 28 – Поведение основных параметров ММП, СВ, КЛ и ГА в событии 18–20 февраля 2011 г. (группа MIX CME).

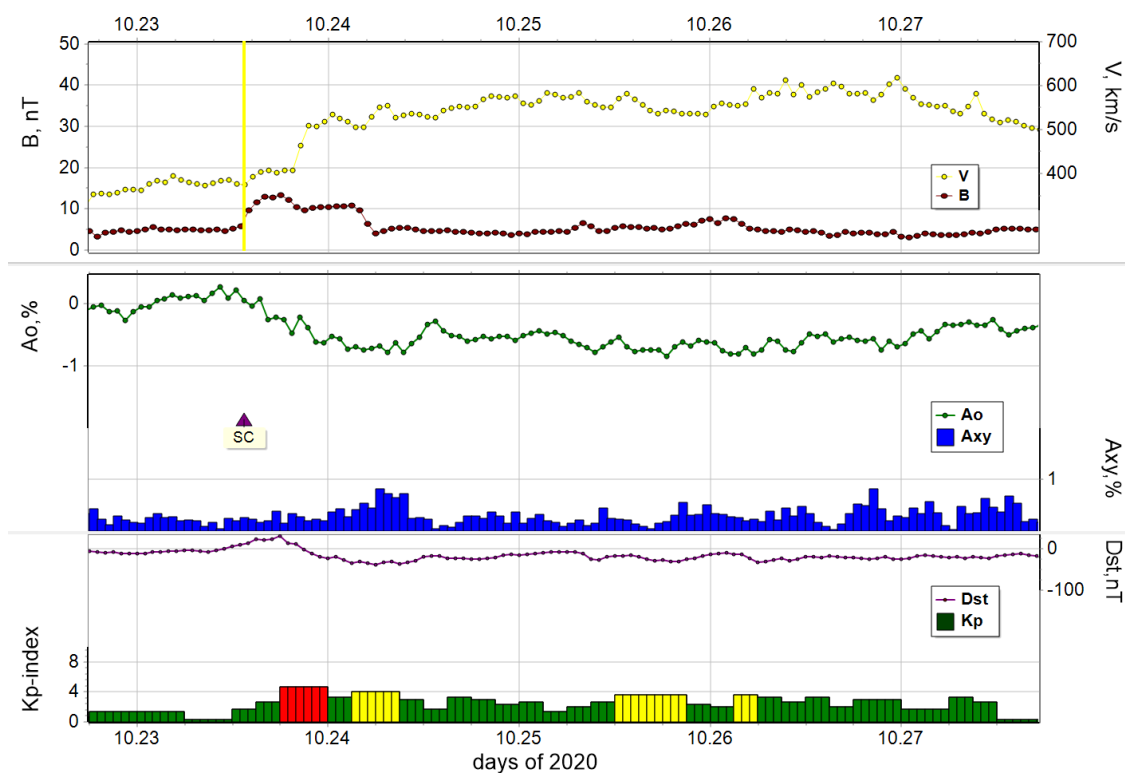


Рисунок 29 – Поведение основных характеристик ММП, СВ, КЛ и ГА в событии 23–27 октября 2020 г. (группа MIX HSS).

Данный КВМ не был зарегистрирован в коронографе, но, по-видимому, оказал влияние на околоземное космическое пространство, поскольку произошел в подходящее время, и в данных СВ и ММП в первые часы после регистрации ударной волны (23 октября в 13:20UT) имеются признаки структуры МКВМ (повышенное поле при небольшой скорости, вращение компонент ММП), а затем уже начинается сам высокоскоростной поток, однако четкой границы между этими возмущениями СВ нет. Кроме того, аналогичные признаки структуры МКВМ обнаруживаются и позже, внутри ВСП (например, 25 октября). Максимальное значение ММП в этом событии составило $V_{\max} = 13.3$ нТл, скорости СВ $V_{\max} = 584$ км/с (верхняя панель рис. 29). В вариациях потока КЛ (средняя панель рис. 4) зарегистрированы следующие экстремальные значения: $AF = 1.1\%$, $A_{\text{х}}_{\max} = 0.82\%$. В данном событии также были зарегистрированы интервалы малой магнитной бури (нижняя панель рис. 12, $K_p_{\max} = 5-$, $Dst_{\min} = -38$ нТл).

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что наибольшие значения параметра возмущенности межпланетной среды наблюдаются в группе MIX CME (среднее значение составляет 3.75 ± 0.33). Именно в этой группе наблюдаются и самые большие значения ММП (13.9 ± 0.77 нТл) и скорости СВ (500 ± 12.6 км/с) из всех групп, содержащих МКВМ.

Ранее уже было показано, что параметр $VmVm$ хорошо коррелирует с величиной ФЭ и уровнем геомагнитной активности. И, действительно, наибольшие средние значения магнитуды ФЭ (1.91%), а также экстремальные значения K_p - и Dst -индексов геомагнитной активности (4.36 и -50.2 нТл) наблюдаются в группе MIX CME, где и параметр $VmVm$ принимает максимальные значения (см. Табл. 2).

Выше обсуждалось сокращение времени регистрации минимума плотности КЛ и максимумов скорости СВ и величины ММП в первых событиях из любой взаимодействующей пары. А в обеих группах MIX (взаимодействие в которых произошло еще до орбиты Земли) явного изменения временных параметров, наоборот, не наблюдается: все значения близки к соответствующим значениям в

группах «чистых» событий, что еще раз подтверждает предположение о том, что на Земле такие события выглядят как единое межпланетное возмущение, но обладающее повышенной геоэффективностью из-за увеличенных значений скорости СВ и модуля ММП.

3.5 Пары взаимодействующих высокоскоростных потоков из корональных дыр (HSS1+HSS2)

Данная группа является самой малочисленной, поскольку подобная последовательность событий наблюдается значительно реже, в силу того что по мере распространения от Солнца к Земле потоки плазмы из КД с очень большой вероятностью взаимодействуют с МКВМ. Тем не менее, в периоды спокойного Солнца такие пары также были обнаружены и статистически обчислены. Отметим еще раз, что для выделения взаимодействующих пар потоков из КД, временной интервал между событиями был увеличен с 50 до 120 часов из-за обычно более длительного воздействия их на Землю в сравнении с МКВМ.

На рисунке 30 представлен пример пары из группы HSS1+HSS2 2-5 марта 2003 г. В указанный период на Земле было зарегистрировано влияние высокоскоростного потока сначала от северной КД, а затем южной, они проходили центральный солнечный меридиан с разницей в сутки. В результате, на фоне еще не закончившегося возмущения от первого потока, начался новый рост скорости СВ и величины ММП из-за воздействия второго потока.

Однако статистический анализ характеристик подобных пар событий показал, что значительного влияния друг на друга они не оказывают (см. таблицу 2). Так, величины производимых ФЭ или сопутствующей геомагнитной активности, отличаются от событий контрольной группы (Pure HSSs) в пределах статистической ошибки.

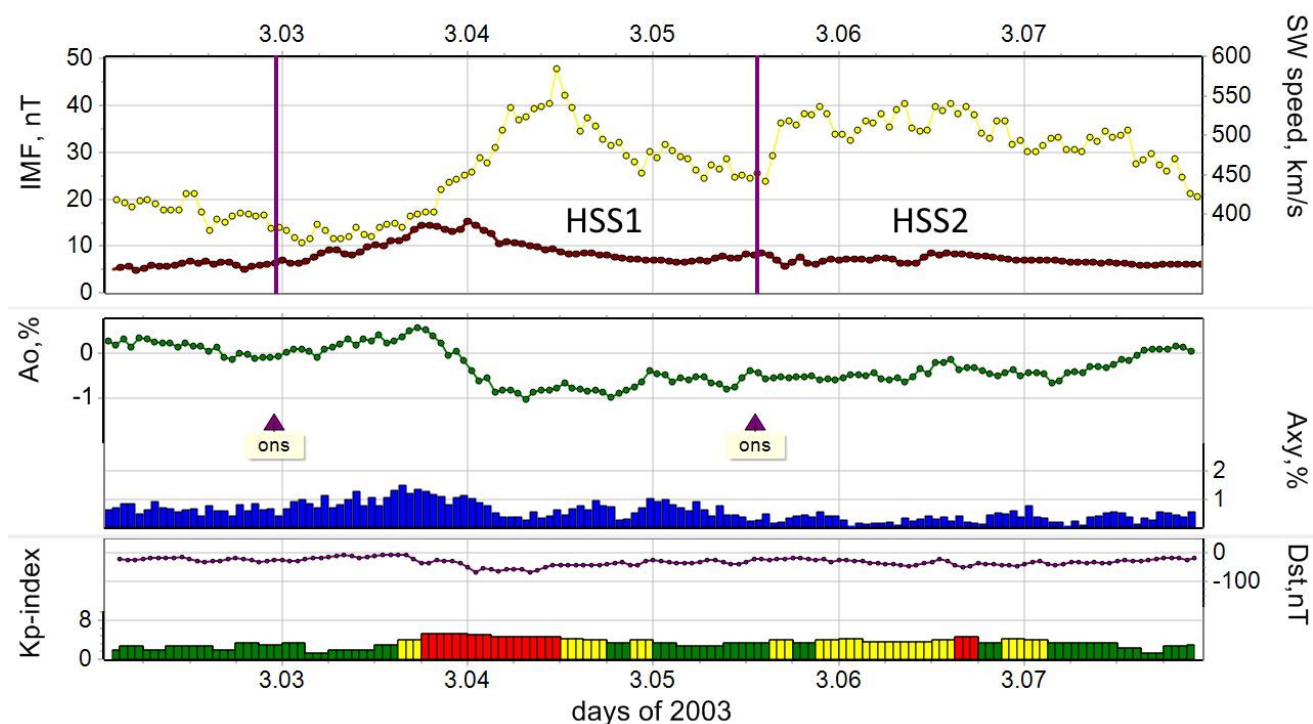


Рисунок 30 – Поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и геомагнитной активности для взаимодействующих ВСП из КД в марте 2003 г (пример события из группы HSS1+HSS2).

Единственным параметром, по которому обнаружены значимые отличия – время наступления минимума ФЭ (t_{\min}). Для следующих друг за другом ВСП из КД параметр t_{\min} составил 12.79 и 9.26 ч (HSS1 и HSS2 соответственно), в то время как для изолированных событий группы HSS $t_{\min}=23.23$ ч. При этом уменьшение времени до момента регистрации максимальных значений скорости СВ и величины ММП, как в других взаимодействующих группах не наблюдается. Сами величины скорости и поля также незначительно отличаются от контрольной группы. Таким образом, можно сделать вывод, что взаимодействие следующих друг за другом потоков вещества из КД проявляется в сокращении времени развития ФЭ каждого события из пары HSS1+HSS2.

3.6 Результаты применения метода наложения эпох для разных групп событий

Чтобы более наглядно продемонстрировать временное развитие событий разных групп, обратимся к методу наложения эпох. На рисунке 31 изображено поведение модуля ММП (верхняя панель) и скорости СВ (нижняя панель) для трех групп событий с участием ВСП из КД. Хорошо заметны отличия во временных профилях изменения обеих величин.

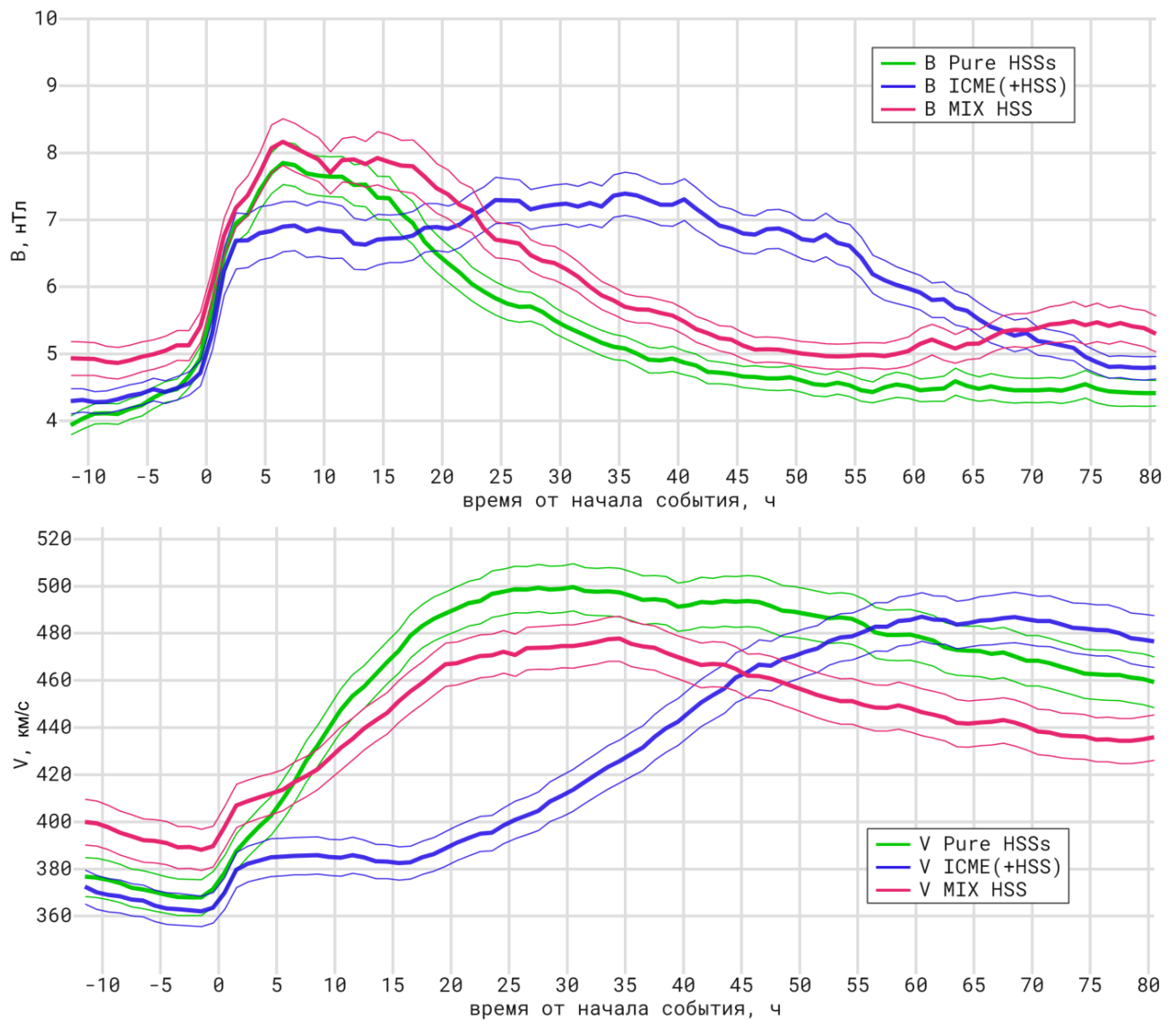


Рисунок 31 – Изменения модуля ММП (B , верхняя панель) и скорости СВ (V , нижняя панель) в группах с участием ВСП из КД, полученные с использованием метода наложения эпох. Тонкими линиями соответствующих цветов показано отклонение $\pm\sigma$.

В частности, в группе Pure HSSs величина модуля ММП возвращается к фоновым значениям быстрее, чем в других группах, хотя максимальные величины модуля ММП близки к событиям группы MIX HSS. Особенно отличается группа следующих друг за другом МКВМ и потока из КД, в которой повышенные значения ММП (около 7 нТл) держатся более двух суток от начала события, что впоследствии отражается на величине регистрируемых ФЭ и уровне геомагнитных возмущений [49].

Поведение скорости СВ в группах Pure HSSs и MIX HSS похоже, небольшие различия наблюдаются только в длительности регистрации повышенных значений. Скорость СВ в группе ICME+HSS растет значительно позже (почти сутки спустя начала события), что связано с наличием более медленных МКВМ перед высокоскоростным потоком из КД, но в итоге достигает примерно тех же величин, что в двух других группах.

На рисунке 32 приведены результаты применения метода наложения эпох для плотности КЛ (A_0 , верхняя панель) и Ар-индекса ГА (нижняя панель) для трех групп событий с участием МКВМ. Хорошо заметны отличия как в экстремальных значениях, так и во временных профилях. Для групп Pure ICMEs и MIX CME времена достижения минимума плотности КЛ близки и составляют ~18 ч, но магнитуды понижения отличаются почти в 2 раза (см. верхнюю панель рис. 32). При этом группа событий ICME1+ICME2 имеет четко выраженный двухступенчатый профиль понижения, первое из которых меньше по амплитуде, чем для «чистых» МКВМ, а второе, наоборот, больше, и значительно сдвинуто по времени вправо. Стоит отметить, что влияние второго события выражено слабее из-за выбора нулевого часа: если выбрать нулевым часом начало второго события, эффект от него будет более значимым, но при этом будет сильно сглажен эффект от первого события. Но даже несмотря на сглаживание, заметно, что вторичное снижение плотности КЛ начинается после регистрации второго события из пары.

Самые большие значения Ар-индекса (нижняя панель) регистрируются в группе MIX CME, и максимум приходится на первые часы от начала события, значения которого соответствуют возмущенной геомагнитной обстановке, хотя

следует учитывать, что метод наложения эпох сглаживает и занижает значения. В группе следующих друг за другом МКВМ значения Ар-индекса сравнимы с группой «чистых» МКВМ в течение первых суток. Затем в группе ICME1+ICME2 Ар-индекс остается повышенным (от 10 до 15) еще на протяжении почти двух суток, что соответствует слабовозмущенной геомагнитной обстановке. Это свидетельствует о большей геоэффективности парных событий в отношении длительности геомагнитных возмущений [49].

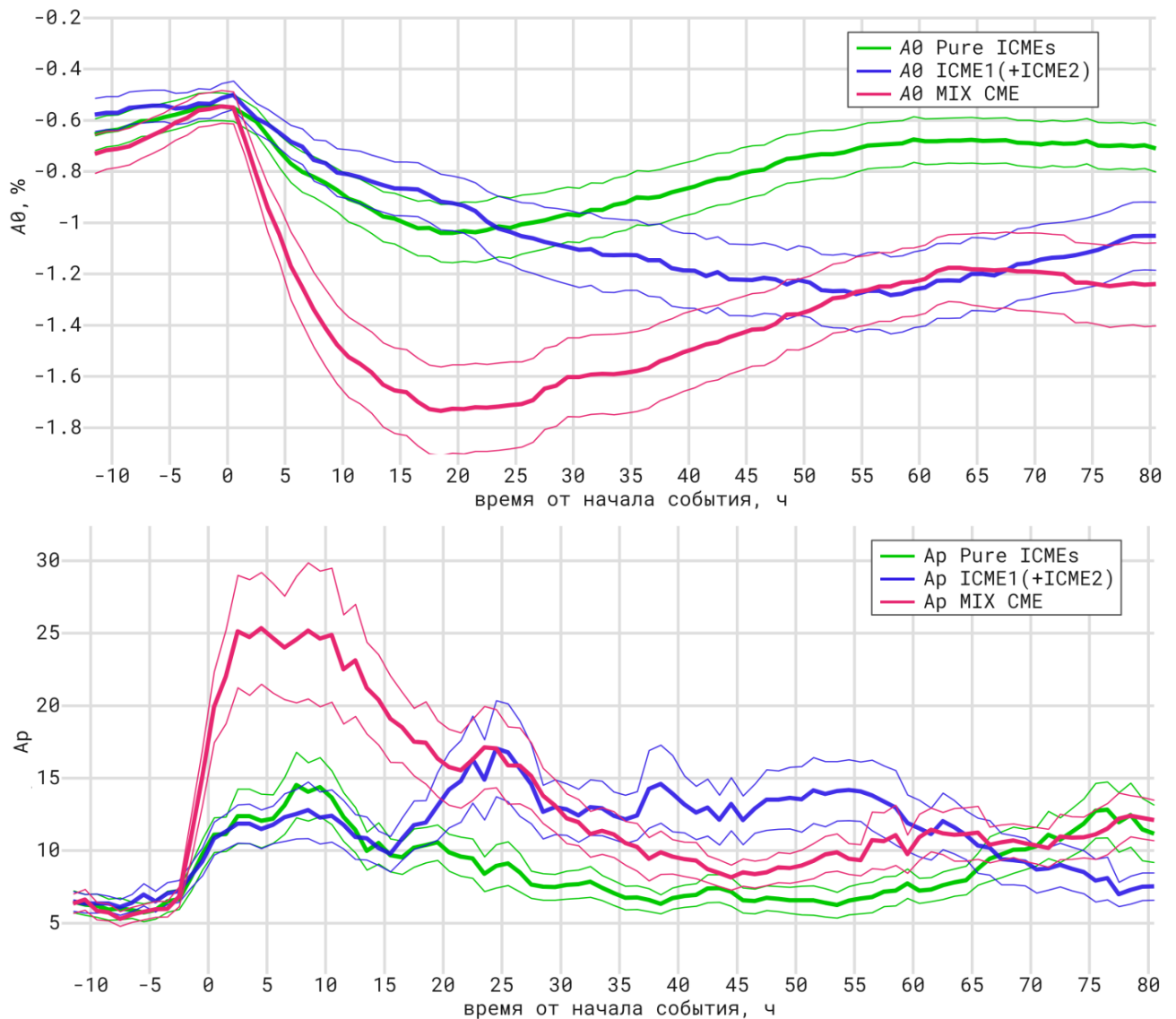


Рисунок 32 – Изменения плотности КЛ (A_0 , верхняя панель) и Ар-индекса ГА (нижняя панель) в группах с участием МКВМ, полученные с использованием метода наложения эпох. Тонкими линиями соответствующих цветов показано отклонение $\pm\sigma$.

3.7 Аномальная модуляция потока космических лучей под воздействием взаимодействующих межпланетных возмущений в сентябре 2014–феврале 2015 гг.

В работе [47] автором диссертации исследована аномалия поведения галактических космических лучей в сентябре 2014 г. – феврале 2015 г., проявившаяся в значительной модуляции их потока с периодом, близким к периоду вращения Солнца. В частности, были подробно рассмотрены величины общей модуляции потока КЛ (частиц с жесткостью 10 ГВ), данные по которым получены по мировой сети нейтронных мониторов (NMDB, <http://www01.nmdb.eu/>) и обработаны с использованием метода глобальной съемки [11]. На рисунке 33 приведены обсуждаемые вариации плотности галактических КЛ. Видно, что квазидвадцатисемидневная периодичность необычно высокой амплитуды (до 11%) начала проявляться на границе августа и сентября 2014 г. и продолжалась до начала марта 2015 г. Впервые на это обращается внимание в работе [127].

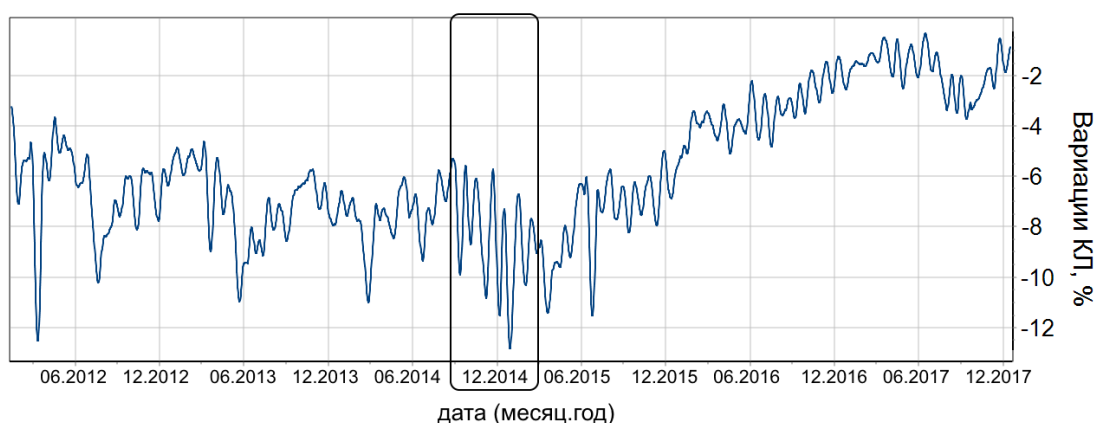


Рисунок 33 – Вариации галактических КЛ (жесткостью 10 ГВ) за 2012–2017 гг. по данным сети нейтронных мониторов со скользящим 27-дневным усреднением. Исследуемый период выделен прямоугольником.

На 2014 г. пришелся формальный максимум активности 24-го солнечного цикла, и хотя активность Солнца вблизи этого максимума была ниже обычной для

подобных периодов [9, 13], но все же была заметной и существенной. В частности, в 2014 г. было много широких и быстрых КВМ, в том числе в рассматриваемом отрезке времени. Например, КВМ типа гало, зарегистрированные 1 сентября 2014 г. в 11:12 и 22:24 UT, выделяются даже среди других мощных КВМ, их начальные скорости составили 1901 и 1404 км/с соответственно (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Эти КВМ, предположительно, были выброшены из зоны активных областей, которые в это время находилась в $\approx 20\text{--}30^\circ$ за восточным лимбом, а позднее получили номера 12157 и 12158 (на близких долготах наблюдались две АО в Северном и Южном полушариях одновременно).

В последующие дни сентября вышеупомянутые АО произвели еще несколько мощных вспышек и быстрых КВМ, и более поздние КВМ вызвали значительные ФЭ у Земли. Так, согласно базе данных FEID, 11 и 12 сентября 2014 г. были зарегистрированы ФЭ величиной 2.1 и 5.9 % соответственно, вызванные МКВМ, ассоциированными со вспышками в АО 12158. Даты этих ФЭ хорошо совпадают с первым минимумом, указанным в табл. 2 из [47].

В следующем обороте значительной дополнительной модуляции КЛ не наблюдалось. Хотя следует отметить, что именно в этот период на солнечном диске существовала АО необычайно большой площади (АО 12192, ~ 4300 миллионных долей солнечного полушария), производившая серии замкнутых (неэруптивных) вспышек М- и X- классов, описанию которых посвящено немало работ (например, [240]). Казалось бы, такая АО могла внести существенный вклад в рекуррентность, однако, все эти вспышки не привели к выбросам корональной массы (возможно, из-за слишком сильных магнитных полей), поэтому дополнительных понижений потока КЛ впоследствии воздействия МКВМ не было зарегистрировано.

Далее, 10 и 11 ноября 2014 г. зарегистрированы ФЭ с величинами 3.6 и 2.2 %. Первый из них связан с воздействием ассоциированного со вспышкой КВМ из АО12205 (которая судя по местоположению с учетом двух солнечных оборотов может быть бывшей АО12158), а второй – с высокоскоростным потоком из

южной КД, которая оказалась более геоэффективной благодаря наличию перед ней МКВМ [41-43, 47, 227]. Эти даты удовлетворяют положению ноябрьского минимума квазидвадцатисемидневной вариации.

На декабрь 2014 г. попадает два больших понижения в изотропной части вариаций КЛ в первой и третьей декаде месяца. 1 и 3 декабря были зарегистрированы ФЭ величиной 3.4 и 2.1 %, а в период 21–23 декабря – три ФЭ подряд с величинами 6, 2 и 2.7 % соответственно. Первые два из упомянутых ФЭ, по-видимому, обусловлены совместным влиянием потока из южной полярной КД и КВМ от 28–29 ноября на юго-востоке в АО 12222 (которая по расположению на солнечном диске вполне может являться рекуррентной для вышеупомянутой АО 12157). ФЭ 21–23 декабря связаны также с воздействием МКВМ (от 17 и 18 декабря в АО 12241 и 20 декабря в АО 12242, соответственно) при наличии дополнительного влияния потока плазмы из КД с отрицательной полярностью, которая также проходила центральный меридиан в указанные даты.

Таким образом, самые глубокие понижения плотности КЛ в ноябре–декабре 2014 г. совпали со значительными ФЭ, вызванными совместным влиянием МКВМ и ВСП из южной полярной КД. Однако южная полярная КД имела значительную площадь и поле и в более позднее время, но быстрых КВМ, направленных в сторону Земли, в этот период не случалось, поэтому такой же значительной модуляции потока галактических КЛ не наблюдалось.

Следует заключить, что особенности модуляции КЛ в конце 2014 и начале 2015 гг. обусловлены объединением рекуррентных и спорадических явлений. Рекуррентность, в первую очередь, была связана с большими корональными дырами, особенно с южной полярной КД. Однако сами по себе КД не могли создать обсуждаемые вариации КЛ, ведь даже самые большие и самые высокоскоростные КД не создают больших Форбуш-эффектов. Достаточно вспомнить огромные долгоживущие трансэкваториальные КД 2003 г., максимальный ФЭ от которых не превысил 1.4% (согласно базе данных FEID). ФЭ от КД создается в области ее взаимодействия (КОВ), а в самом ВСП обычно наблюдается восстановление интенсивности КЛ.

Но также сложно объяснить дополнительную модуляцию КЛ только лишь одной магнитной ловушкой, возникающей при распространении КВМ в межпланетном пространстве. Трудности в обеспечении долгого существования такой ловушки даже не самое главное. Основная проблема в том, что стабильные ловушки практически не влияют на высокоэнергичные КЛ. Для их эффективной модуляции нужны расширяющиеся ловушки [108, 162, 189], а поскольку при расширении эффективность ловушки уменьшается, нужны многочисленные возобновляемые ловушки. Именно такую ситуацию мы получили в конце 2014 г., когда по широкому ВСП распространялась серия выбросов солнечного вещества. Они затрудняли продольное распространение КЛ, а поскольку поперечное распространение в регулярных полях высокоскоростных потоков всегда затруднено, за выбросами создавались расширяющиеся квазिलовушки, в которых КЛ замедлялись и уменьшали свою плотность. Это привело и к общей дополнительной модуляции КЛ и к ее неравномерному распределению по долготе.

3.8 Экстремальные события мая 2024 г., вызванные взаимодействующими межпланетными возмущениями

В мае 2024 года наблюдался очередной всплеск солнечной активности, в результате которого на Земле была зарегистрирована самая мощная за последние 20 лет магнитная буря. Такие экстремальные события всегда вызывают большой интерес у различных исследователей (см. [138, 179] и др.). Автором диссертации в работе [52] были подробно изучены особенности поведения плотности и анизотропии КЛ (рассчитанных с помощью GSM для частиц с жесткостью 10 ГВ по данным сети НМ) и их связи с солнечными источниками и геомагнитными возмущениями для экстремальных событий мая 2024 года.

30 апреля на юго-восточном лимбе солнечного диска появилась АО 13664 (официально была пронумерована 2 мая). В период 2-15 мая в ней было зарегистрировано 89 вспышек, из которых 48 – класса М и 10 – класса Х (<https://solarmonitor.org/>, <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-event-reports>). 8 мая на Солнце в АО 13664 наблюдалось 11 вспышек, из них три – Х1.0 в 4:37 UT, М8.7 в 11:26 и Х1.0 в 21:08 – были связаны с КВМ типа гало с начальными скоростями $V_0 = 530, 677$ и 952 км/с соответственно. Также, около 18UT произошла эрупция большого волокна на северо-востоке центральной зоны ($V_0 = 401$ км/с). Помимо этого 8 мая центральный солнечный меридиан в северной полусфере пересекала корональная дыра CH1221 (положительной полярности) (https://solen.info/solar/coronal_holes.html). 9 мая активность в АО 13664 продолжилась: было зарегистрировано еще 11 вспышек только класса М и Х. Со вспышками Х2.2 (в 08:45 UT) и Х1.1 (в 17:23 UT) были также связаны КВМ типа гало ($V_0 = 1280$ и 1024 км/с соответственно).

10 и 11 мая в обсуждаемой АО произошли еще две большие вспышки (Х3.9 и Х5.8) с быстрыми КВМ, которые привели к регистрации роста потоков частиц в околоземном космическом пространстве, зарегистрированные на спутниках серии GOES. КВМ типа гало, связанное со вспышкой Х3.9 ($V_0 = 953$ км/с) было зарегистрировано 10 мая в 07:12 UT, а КВМ, ассоциированный со вспышкой Х5.8 наблюдался 11 мая в 01:36 UT ($V_0 = 1614$ км/с). На рисунке 34 представлены потоки частиц разных энергий по данным КА GOES, высотный ход КВМ и поток мягкого рентгена в период 8-11 мая 2024 г. (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/sephctx). Отметим также, что вечером 10 мая наблюдалась эрупция большого волокна к югу от центра (частичное гало $V_0 = 686$ км/с в 21:17 UT), что также внесло свой вклад в усложнение межпланетной обстановки в описываемый период. На рис. 34 все КВМ, повлиявшие, по мнению авторов, на состояние околоземного космического пространства, отмечены соответствующими номерами. Все данные по солнечным и межпланетным источникам для удобства сведены в Таблицу 3.

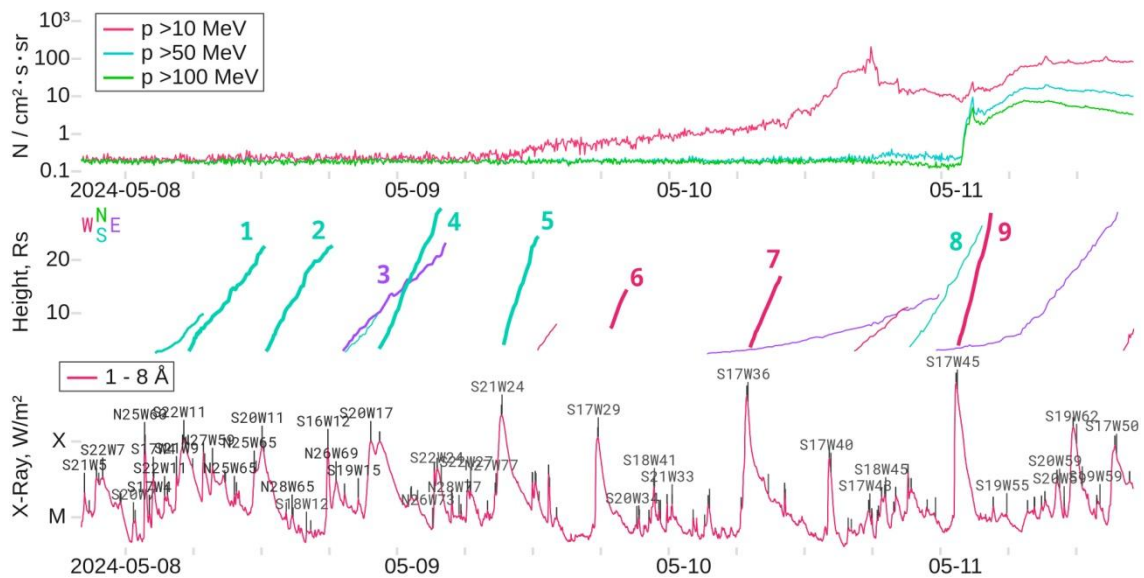


Рисунок 34 – Потоки протонов, высотный ход KBM и рентгеновские вспышки 8-11 мая 2024 (адаптировано https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/sephtx/).

Таблица 3. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных возмущений и Форбуш-эффектов в мае 2024 г.

№	Дата и время вспышки	Класс вспышки	Гелио-координаты	Дата и время KBM	V_0 , км/с	Тип KBM
1	2024.05.08 04:37	X1.0	S18W17	2024.05.08 05:36	530	Halo
2	2024.05.08 11:26	M8.7	S20W11	2024.05.08 12:24	677	Halo
3	2024.05.08 ~18UT	DSF	North-east of the center	2024.05.08 19:12	401	Partial Halo
4	2024.05.08 21:08	X1.0	S20W17	2024.05.08 22:24	952	Halo
5	2024.05.09 08:45	X2.2	S20W26	2024.05.09 09:24	1280	Halo
6	2024.05.09 17:23	X1.1	S14W28	2024.05.09 18:52	1024	Halo
7	2024.05.10 06:27	X3.9	S17W34	2024.05.10 07:12	953	Halo
8	2024.05.10 ~20UT	DSF	South of the center	2024.05.10 21:17	686	Partial Halo
9	2024.05.11 01:10	X5.8	S15W45	2024.05.11 01:36	1614	Halo

Описанные выше солнечные события привели к очень возмущенной и сложной межпланетной обстановке, наблюдавшейся 10-13 мая, что подтверждается и результатами моделирования разных групп (например, <https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction> или https://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20240511_060000_2.0_anim.tim-den.gif).

10 мая в 16:38 UT (см. рис. 35) в околоземном космическом пространстве (по данным КА Wind) была зарегистрирована ударная волна из-за воздействия межпланетного возмущения, источником которого стали вступившие во взаимодействие по мере распространения в межпланетном пространстве КВМ от 8-9 мая. Основной движущей силой был, вероятно, первый быстрый выброс от 9 мая (КВМ №5), который догонял плазму от всех более медленных выбросов, случившихся еще 8 мая (КВМ №1–4). Через несколько часов (около 21UT), по-видимому, орбиты Земли достиг еще один КВМ от 9 мая (КВМ №6). В результате воздействия перечисленных межпланетных возмущений скорость СВ увеличилась до ~800 км/с, а величина ММП – до 70 нТл. Такие большие значения ММП ранее никогда не регистрировались, предыдущий рекорд в 62 нТл был зарегистрирован 6 ноября 2001 г.

Во второй половине дня 11 мая (~17 UT) околоземной орбиты достиг КВМ от 10 мая (№7) – скорость СВ еще увеличилась (до 960 км/с), а во второй половине дня 12 мая, вероятно, на магнитосферу Земли начали воздействовать последние из перечисленных выбросов от 10 и 11 мая (КВМ №8–9). Такие большие значения скорости СВ 13 мая может объясняться дополнительным ВСП из КД (СН1221). Плотность СВ 10-11 мая также имела высокие значения ($D_{\max} = 48.1$ частиц/см³).

Внезапное начало бури было зарегистрировано 10 мая в 17:05 UT. Трехчасовой Кр-индекс увеличился до 8 и не опускался ниже 6 вплоть до 06 UT 12 мая. Столь длительная магнитная буря объясняется совместным воздействием нескольких мощных КВМ, описанных выше. 11 мая были зарегистрированы интервалы экстремальной магнитной бури ($K_{\max} = 9$); предыдущие подобные значения наблюдались более 20 лет назад во время знаменитых Хеллоуинских

событий 29-30 октября 2003 года. Dst-индекс снизился до значения -412 нТл, что также является одним из рекордных значений с начала космической эры. Еще один выдающийся параметр в рассматриваемой магнитной буре – среднесуточные значения Ар-индекса, 11 мая он достиг значения 271, ещё большие значения были зарегистрированы только однажды 13 ноября 1960 года (280). Во время упомянутых Хеллоуинских событий среднесуточный Ар-индекс составил 204 и 191 за 29 и 30 октября соответственно.

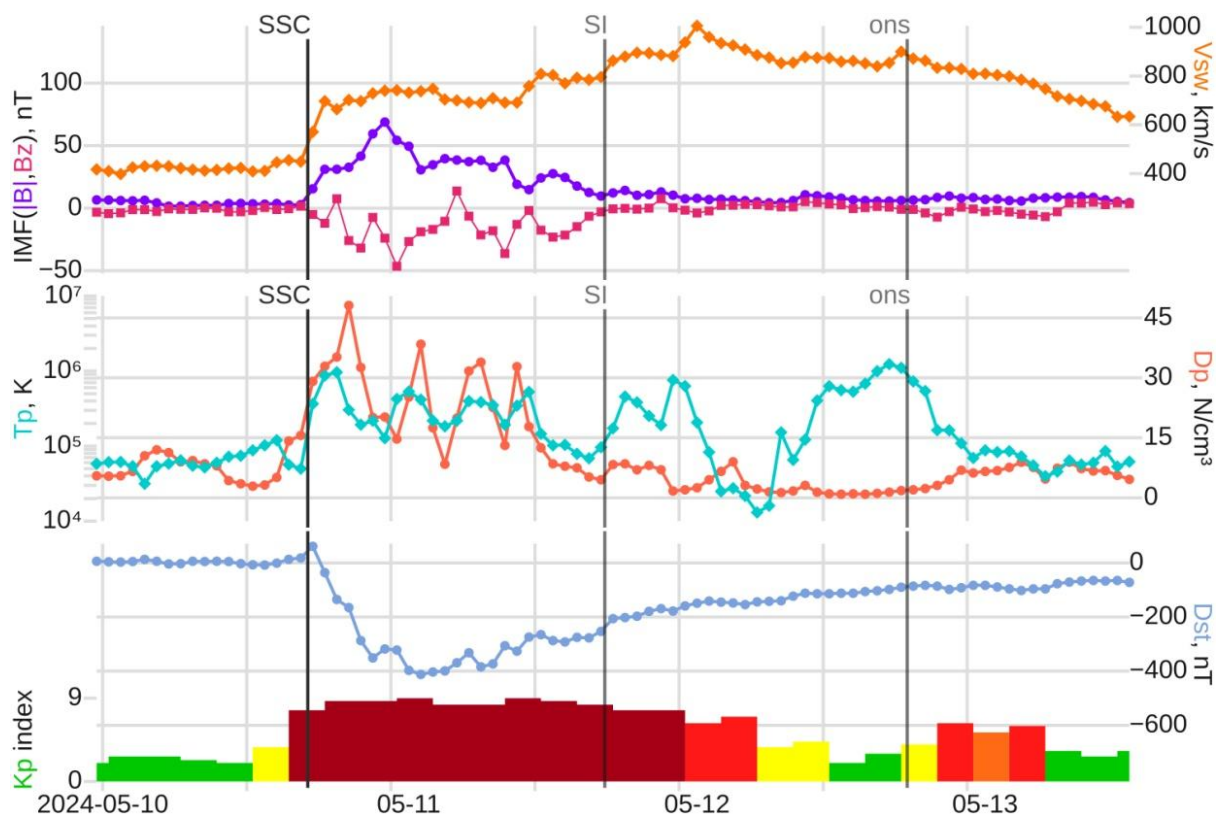


Рисунок 35 – Поведение основных параметров межпланетной среды и геомагнитной активности сверху вниз: скорость СВ, модуль ММП и его Bz-компонента, плотность и температура СВ (по данным КА DISCOVER), Kp и Dst индексы ГА в период 10-13 мая 2024 г.

С 21UT 12 мая по 06UT 13 мая была зарегистрирована еще одна магнитная буря ($K_{pmax} = 6$), вызванная совместным воздействием на магнитосферу Земли KBM №8-9 и CH1221. Все данные по зарегистрированным геомагнитным возмущениям и экстремальным значениям основных параметров СВ и ММП представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Экстремальные значения основных параметров СВ, ММП и ГА в период 10-13 мая 2024 г.

№	Начало события	Vmax, км/с	Dmax, частиц/см ³	Bmax, нТл	Bzmin, нТл	Dstmin, нТл	Kpmax
1	10.05.2024 17:05	814	48.1	69.8	-40	-412	9
2	11.05.2024 17:49	963	9	14.1	-3.4	-253	8+
3	12.05.2024 19:00	859	8.9	9.6	-6.3	-102	6+

В описываемый период времени (10-13 мая 2024 г.) у Земли были зарегистрированы три межпланетных возмущения смешанной природы, поэтому в поддерживаемую ИЗМИРАН базу данных FEID было добавлено три новых события: 10 мая в 17:05UT, связанное с регистрацией серии KBM от 8 и 9 мая (ФЭ №1); 11 мая в 17:49UT, ассоциированное с KBM №7 (ФЭ №2); и 12 мая в 19:00, источником которого было совместное влияние KBM №8–9 и ВСП из КД CH1221 (ФЭ №3). Времена начала ФЭ совпадают со временем регистрации ударной волны и/или началом геомагнитного возмущения. Основное внимание при анализе данных КЛ будет уделено именно первому ФЭ, поскольку последующие два ФЭ наблюдались на фоне восстановления первого, наибольшего понижения интенсивности КЛ. Основные характеристики ФЭ для частиц жесткостью 10 ГВ, полученные по методу GSM, в период 10-13 мая 2024 г. приведены в Таблице 5. Подробное обсуждение всех упомянутых параметров и их поведения в описываемый период приведено ниже.

Таблица 5. Основные характеристики ФЭ для частиц жесткостью 10 ГВ, полученные по методу GSM, в период 10-13 мая 2024 г.

№	Начало ФЭ	AF, %	Dmin, %	Axy max, %	Axy mean, %	Az range, %	Основные источники межпланетных возмущений
1	10.05.2024 17:05	15.7	-4.4	1.91	0.9	3.1	KBM №1-6
2	11.05.2024 17:49	1.1	-0.6	1.72	1.1	1.6	KBM №7
3	12.05.2024 19:00	2.8	-0.4	2.45	1.1	3.3	KBM №8–9, ВСП из КД CH1221

В ИЗМИРАН также был разработан и реализован онлайн метод кольца станций (<https://tools.izmiran.ru/w/ros> [50]). Обычно этот метод используется для прогнозирования прихода к орбите Земли мощных межпланетных возмущений за 2-12 ч. В изучаемом событии в мае 2024 года также были выявлены предвестники приближающегося межпланетного возмущения за ~ 7 ч до регистрации ударной волны (см. рис. 36, голубые кружки (предвозрастание) в долготном диапазоне $150\text{--}300^\circ$ перед первой ударной волной). Это явление подробно описывалось в [179], существует еще одна особенность в этом событии, которую также хорошо видно на долготно-временной диаграмме (рис. 36). Эта особенность – не сразу начавшийся ФЭ, причем на всех станциях: после регистрации ударной волны понижение в скорости счета НМ началось только через два-три часа, а не практически сразу, как это часто бывает в больших ФЭ [50]. По-видимому, в первые часы еще сохраняется связь околоземного космического пространства с областью вне Форбуш-понижения, и, кроме того, количество частиц, ускоренных перед фронтом ударной волны могло быть настолько большим, что по началу компенсировало обычно сниженное количество частиц КЛ за фронтом межпланетного возмущения.

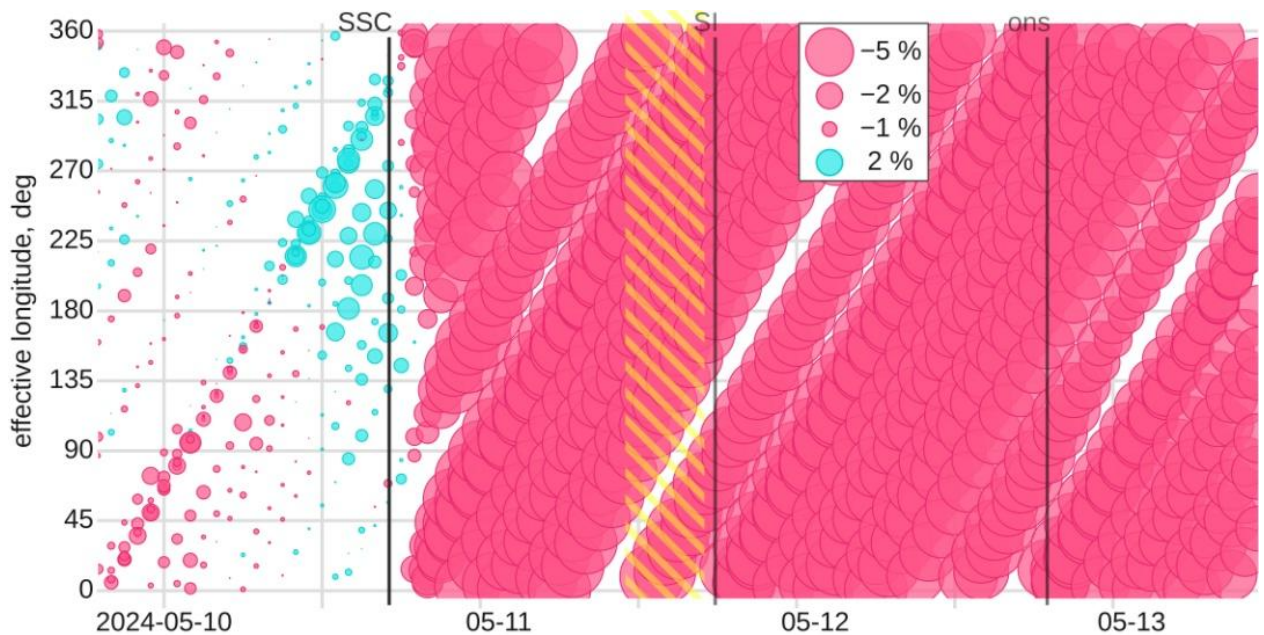


Рисунок 36 – Долготно-временное распределение вариаций КЛ, полученное по методу кольца станций в период 10 –13 мая 2024 г.

По данным сети станций НМ, обработанным GSM, в мае 2024 года наблюдался самый большой ФЭ за последние 20 лет. Магнитуда этого ФЭ для частиц жесткостью 10 ГВ составила 15.7% (рис. 37). Предыдущий очень большой ФЭ с магнитудой $\sim 26\%$ был зарегистрирован 29 октября 2003 г., он же был и максимальным за все время наблюдений. В первые два часа после регистрации ударной волны снижение плотности КЛ было не очень интенсивным, примерно на 1%. За следующие два часа – еще на $\sim 3.8\%$, а самые резкие изменения наблюдались в последующие два часа, когда за каждый час регистрировалось падение на $\sim 4.4\%$. В следующие два часа вариации плотности КЛ достигли своего минимума ($\sim 01\text{UT}$ 11 мая), после чего наблюдалось медленное восстановление интенсивности потока КЛ. Если сравнить максимальные часовые изменения плотности КЛ в событии 10-11 мая с другими событиями, то изучаемый ФЭ является одним из самых выдающихся. Большие значения часового декремента наблюдались только 29 октября 2003 года (-5.6% в час) и 28 октября 1991 года (-4.6% в час). Однако если рассмотреть декремент плотности за два часа подряд, то только в событии 28 октября 1991 года наблюдались еще большие значения (-10.2%).

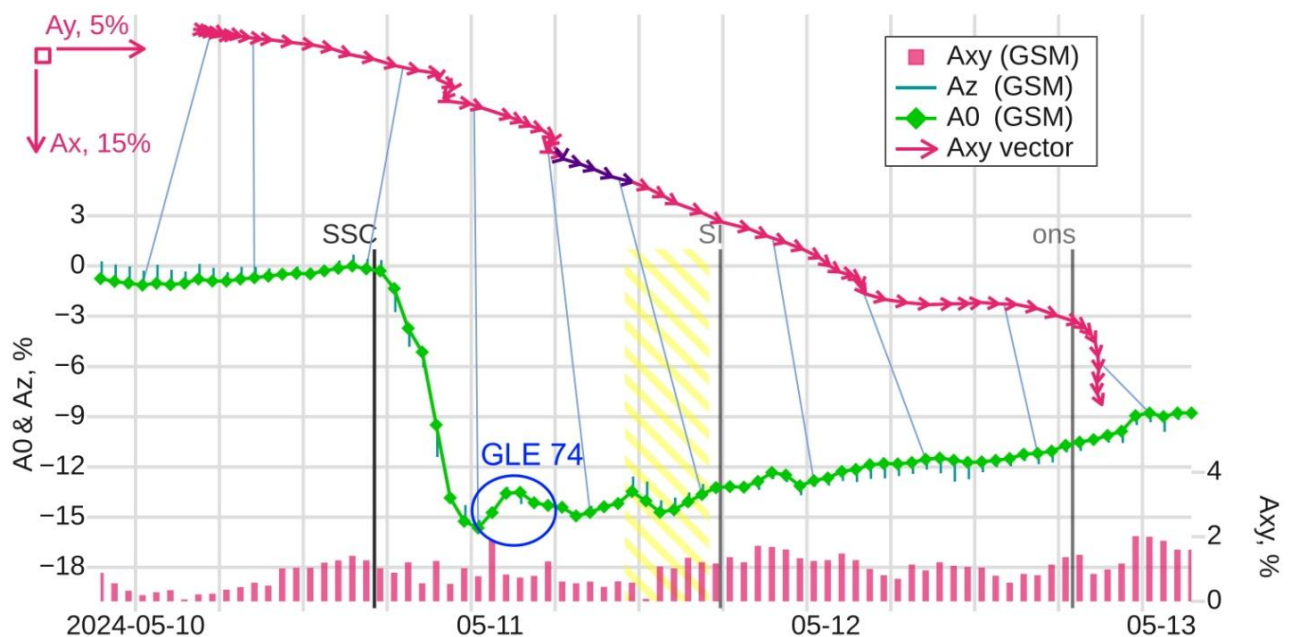


Рисунок 37 – Поведение плотности и анизотропии КЛ жесткостью 10 ГВ по данным сети НМ, обработанным методом глобальной съемки в период 10 –13 мая 2024 г.

Изменение северо-южной составляющей анизотропии КЛ ($Azrange$) во время ФЭ №1 составило $\sim 3.1\%$, и эта величина значительно меньше среднего значения $Azrange = 4.26 \pm 0.3\%$, рассчитанного для всех ФЭ с амплитудой $>10\%$, имеющих в нашей БД. По значениям экваториальной составляющей анизотропии КЛ (Axu) исследуемое событие тоже необычно мало. $Axumax = 1.9\%$, и это значение минимально среди ФЭ с амплитудой $>10\%$; в среднем у ФЭ $>10\%$ средняя максимальная величина Axu составляет $4.4 \pm 0.4\%$. И даже если рассмотреть среднее значение часовых изменений $Axu = 0.9\%$, оно также окажется наименьшим (среднее значение $Axu = 1.7 \pm 0.1\%$ для ФЭ $>10\%$). Такие аномально малые значения составляющих анизотропии КЛ могут говорить о том, что кроме радиального градиента в это время существовали достаточно большие широтный и/или азимутальные градиенты, что, в свою очередь, означает, что Земля находилась не в самом центре ФЭ, где бы наблюдался абсолютный минимум, а несколько западнее. Значит, истинный минимум этого ФЭ должен был быть существенно глубже, чем измеренные у Земли 15.7% . Предложенная конфигурация также может объяснять упомянутое выше «отложенное начало» ФЭ (видимое на рис. 36). За двое суток восстановление потока КЛ до фоновых значений еще не завершилось. Подобное медленное восстановление вообще довольно типично для глубоких ФЭ [160, 167], но в данном случае оно дополнительно замедлилось из-за воздействия серии межпланетных возмущений. Возможно, данный ФЭ мог быть зарегистрирован и с большей магнитудой, но утром 11 мая было зарегистрировано GLE, источником которого была вспышка X.5.8 (11 мая в 01:10 UT). В базе данных IGLED (<https://gle.oulu.fi>) данное GLE получило номер 74, и имело амплитуду $\sim 8\%$ (по данным NM SOPO). По данным GSM можно оценить его амплитуду в $\sim 2\%$ (условно, это значение «среднее» по всем станциям NM, см. рис. 37).

Как уже было сказано выше, 10-11 мая наблюдалась экстремальная геомагнитная буря. Столь сильно возмущение магнитного поля Земли не могло не оказать влияния на вариации потока ГКЛ, регистрируемые наземными детекторами. Т.н. магнитосферный эффект неоднократно наблюдался в данных

наземных детекторов и описан в литературе [60, 126]. На рис. 38 приведено поведение плотности КЛ, рассчитанное GSM с учетом (коричневая кривая) и без учета (синяя кривая) магнитосферного эффекта. Учет магнитосферного эффекта производится по формулам, приведенным в работе [71], с учетом изменений Dst – индекса. Из рисунка видно, что разница в вариациях плотности в период наибольших геомагнитных возмущений достигает 4%.

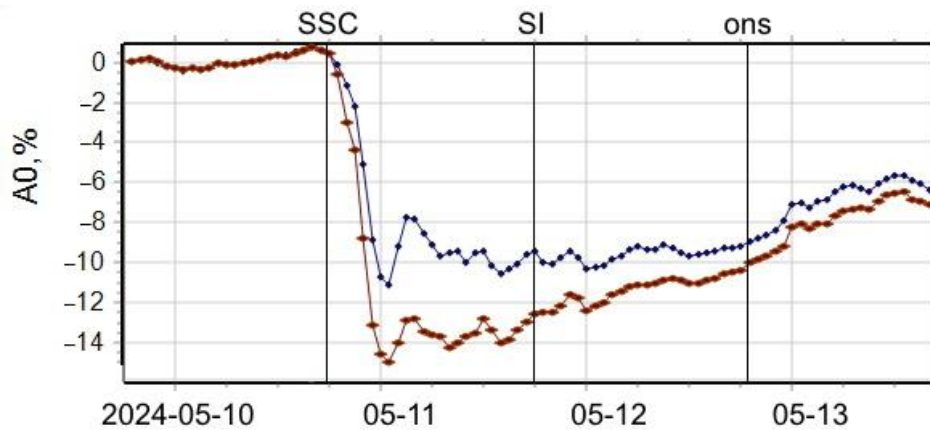


Рисунок 38 – Поведение плотности КЛ жесткостью 10 ГВ, рассчитанное с помощью GSM с учетом (коричневая кривая) и без учета (синяя кривая) магнитосферного эффекта.

В данном событии структуру магнитного облака выделяют не все исследователи. Но в работе [138] авторы указывают на три временных отрезка в течение 11 мая со структурой МО по минутным данным СВ: с ~03:28 до 07:54 UT, с ~08:25 до 10:36 UT, и с ~11:19 до 17:17 UT. Однако особенности поведения КЛ, в частности анизотропии КЛ, могут дать дополнительную информацию о внутренней структуре межпланетных возмущений. Резкие изменения направления экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (сцепленная векторная диаграмма на рис. 37) в ~09-10 UT 11 мая, а также изменение знака северо-южной компоненты анизотропии КЛ (тонкие голубые столбцы, нанесенные на кривую A_0) в ~11 UT, и обратная смена знака A_z в ~17 UT, наряду с основными характеристиками МО в данных солнечного ветра [81, 152] говорит о том, что есть выделенная структура, которая достаточно велика, чтобы повлиять на высокоэнергичные КЛ. На основании вышеперечисленного предполагается, что, несмотря на сложную структуру межпланетного возмущения, вызванного

взаимодействием нескольких КВМ, структура МО сохранилась, по крайней мере, в период с 11 UT до 17 UT (отмечено желтой штриховкой на рис. 36-37).

Таким образом, следует заключить, что рассмотренные события 10-13 мая 2024 г. являются ярким примером экстремальных проявлений последствий взаимодействия различных межпланетных возмущений между собой. В данном случае речь шла сразу о 9 МКВМ, распространяющихся в ВСП из КД. Описываемые события оказались одними из самых выдающихся за всю историю наблюдений сразу по нескольким параметрам: амплитуде вариаций плотности КЛ, максимальному часовому понижению плотности КЛ, величине и длительности геомагнитных возмущений.

3.9 Выводы по Главе 3

Описаны возможные типы взаимодействующих структур солнечного ветра, проанализирована зависимость частоты регистрации взаимодействующих межпланетных возмущений разных типов от цикла солнечной активности. Показано изменение геомагнитной эффективности и степени модуляции космических лучей в случае воздействия различных комбинаций межпланетных возмущений. Описаны различия во временных профилях Форбуш-эффектов и геомагнитных возмущений, а также изменения времен регистрации максимумов скорости солнечного ветра и модуля индукции межпланетного магнитного поля для нескольких типов взаимодействующих возмущений солнечного ветра.

Приведены примеры проявлений эффектов взаимодействующих возмущений солнечного ветра, установлены их причины и последствия воздействия на модуляцию космических лучей и геомагнитную активность в аномальные периоды сентября 2014–февраля 2015 гг. и мая 2024 г.

Заключение

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

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 еще 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 гг., а также причины большого Форбуш-эффекта и экстремальной магнитной бури, зарегистрированных 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 качественного прогнозирования изменения состояния космической погоды, так и для уточнения моделей модуляции космических лучей.

Литература

1. Абунин, А.А. Характеристики Форбуш-эффектов и их связь с солнечными, межпланетными и геомагнитными возмущениями: дис. ... канд. ф.-м. наук : 01.03.03 / Артём Анатольевич Абунин; ГАО РАН – СПб., 2014. – 155 л.
2. Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Асипенка А.С., Оленева В.А., Янке В.Г. Связь параметров Форбуш-эффектов с гелиодолготой солнечных источников // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2013. – Т. 53. – № 1. – С. 13–22.
3. Абунина, М.А. Анизотропия космических лучей в различных структурах солнечного ветра: дис. ... канд. ф.-м. наук : 01.03.03 / Мария Александровна Абунина; ГАО РАН – СПб., 2016. – 164 л.
4. Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 1. Общее описание // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020а. – Т. 60. – № 1. – С. 41–48.
5. Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 2. Примеры использования // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020б. – Т. 60. – № 2. – С. 187–194.
6. Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Ерошенко Е.А., Абунин 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.
7. 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. – 2024а. – Т. 64. – № 1. – С. 29–38.
8. Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов А.В., Белов С.М., Абунин А.А. О наиболее интересных событиях в солнечном ветре и космических лучах в 2023–2024 гг //

- Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024б. – С. 5-7.
9. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Кожухов М.А. Динамика солнечной и геомагнитной активности. III. Солнечная и геомагнитная активность в 24 цикле. Реконструкция динамики солнечной и геомагнитной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 172. – № 5. – С.10–24.
 10. Белов А. В., Абунина М. А., Абунин А. А., Ерошенко Е. А., Оленева В. А., Янке В. Г. Векторная анизотропия космических лучей и локальные характеристики межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – № 4. – С. 423–432.
 11. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., 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.
 12. Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белова Е.А., Абунин А.А., Папаиоанноу А. Протонные возрастания и Форбуш-эффекты с одними и теми же солнечными источниками // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2023 а. – Т. 87. – № 7. – С. 1005-1009.
 13. 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. – 2023б. – Т. 63. – № 4. – С. 534-544.
 14. Белов С.М., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А. База данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024. – С. 14-16.
 15. 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.

- 16.Дорман Л.И. Вариации космических лучей. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, – 1957. – 492 с.
- 17.Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения / Сб. «Вариации космических лучей и исследования космоса», ИЗМИРАН, – 1986. – С. 232–237.
- 18.Долгинов А.З., Топтыгин И.Н. Движение космических частиц в случайном магнитном поле // Изв. АН СССР Сер. Физ. – 1966а. – Т. 30. – №11. – С. 1780-1783
- 19.Долгинов А.З., Топтыгин И.Н. Многократное рассеяние частиц в магнитном поле со случайными неоднородностями // ЖЭТФ. – 1966б. Т. 51. – № 6 (12). – С. 1771-1783.
- 20.Иванов К.Г. Солнечные источники межпланетных ударных волн // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С. 24–31.
- 21.Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36. – № 2. – С.19–27.
- 22.Кравцов Н.Г. Третья гармоника интенсивности космических лучей. Вариации космических лучей и солнечный ветер / Якутск: ЯФ СО АН СССР, – 1980. – С. 55–61.
- 23.Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И., Скрипин Г.В. Новый метод исследования анизотропии космических лучей. Исследование по геомагнетизму и аэрономии. / М.: Наука, – 1966а. – 105 с.
- 24.Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1966б. – Т. 6. – № 8. – С. 991–996.
- 25.Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. II. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1967. – Т. 7. – № 1. – С. 11–15.
- 26.Крымский Г.Ф. Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве. / М.: Наука, – 1969. – 152 с.

- 27.Крымский Г.Ф., Транский И.А. К распространению ударных волн в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. – 1973а. – Т. 13. – №6. – С. 1011-1019
- 28.Крымский Г.Ф., Скрипин Г.В., Григорьев В.Г. О третьей гармонике в суточной вариации космических лучей / В кн.: Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. – 1973б. – Якутск: ЯФ СО АН СССР. – С. 118–125.
- 29.Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и форбуш-эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. – 1974. – Т. 14. – №3. – С. 407-410.
- 30.Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер / Новосибирск: Наука, – 1981. – 224 с.
- 31.Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные свойства Форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58. – № 2. – С. 163–176.
- 32.Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин 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. – 2022а. – Т. 62. – № 2. – С. 155-170.
- 33.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 аэрономия. – 2022б. – Т. 62. – № 3. – С. 283-301.
- 34.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. – 2023а. – Т. 63. – № 1. – С. 43-57.

- 35.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. – 2023б. – Т. 63. – № 5. – С. 581-598.
- 36.Могилевский Э.И. О проникновении в солнечную корону локальных магнитных полей и генерации геоэффективных корпускулярных потоков // Геомагнетизм и Аэрономия. – 1961. – Т. 1. – № 2. – С. 153-155.
- 37.Могилевский Э.И. О природе воздействия солнечного корпускулярного потока на магнитосферу земли // Геомагнетизм и Аэрономия. – 1963. – Т. 3. – № 6. – С. 1001-1013.
- 38.Петухова, А. С. Модель формирования Форбуш понижения в электромагнитном поле магнитного облака : дис. ... канд. ф.-м. наук : 01.04.16 / Анастасия Станиславовна Петухова; НИЯУ МИФИ – М., 2022. – 112 л.
- 39.Петухова А. С., Петухов И. С., Петухов С. И., Готовцев И. С. Особенности динамики параметров среды и плотности космических лучей в сильных форбуш-понижениях, связанных с магнитными облаками // Солнечно-земная физика. – 2023. – № 2. – С. 94-100.
- 40.Шафер Г.В. Прецизионные наблюдения космических лучей в Якутске / Новосибирск: Наука, – 1984. – 732 с.
- 41.Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты, вызванные взаимодействующими возмущениями солнечного ветра // Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой: сб. науч. тр. / Климатические риски и космическая погода. – Иркутск, 2021а. – С. 28-29.
- 42.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 аэрономия. – 2021б. – Т. 61. – № 6. – С. 694-703.

- 43.Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Геоэффективность парных взаимодействующих возмущений солнечного ветра // Труды XXV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца: сб. науч. тр. / Солнечная и солнечно-земная физика. – Санкт-Петербург, 2021в. – С. 317-320.
- 44.Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Papaioannou A. Форбуш-эффекты, наблюдавшиеся на космических аппаратах миссии HELIOS // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 456-463.
- 45.Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Оценка транзитной скорости и времени распространения корональных выбросов массы по солнечным данным // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. – Иркутск, 2022. – С. 138-140.
- 46.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.
- 47.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. – 2024а. – Т. 64. – №2 – С. 240-252.
- 48.Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Вспышки, выбросы и прогноз протонных возрастаний // Труды XVIII Конференции молодых ученых: сб. науч. тр. / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом. – Иркутск, 2024б. – С. 99-101.
- 49.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. – 2024в. – Т. 64. – № 4. – С. 465–478.
- 50.Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Abunin A.A., Yanke V.G., Melkumyan A.A., Shlyk N.S., Pryamushkina I.I. Ring of Stations Method in Cosmic Rays Variations Research // Solar Phys. – 2020. – V. 295. – N. 1. – Article number 69. – 17 pp.

51. Abunina M.A., Belov A.V., Shlyk N.S., Belova E.N., Abunin A.A. Solar energetic particle events and geomagnetic disturbances driven by the same solar sources // Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of VIII International Conference.: сб. науч. тр. / Kaliningrad, 2023. – С. 14-17.
52. 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. – in press. – 9 pp.
53. Alania M.V., Wawrzynczak A. Forbush decrease of the galactic cosmic ray intensity: experimental study and theoretical modeling // Astrophys. Space Sci. Trans. – 2008. – V. 4. – P. 59-63.
54. Aran A., Pacheco D., Laurenza M. Evidence for local particle acceleration in the first recurrent galactic cosmic ray depression observed by Solar Orbiter // Astronomy & Astrophysics. – 2021. – V. 656. – id L10. – 8 pp.
55. Alfven H. Changes in Cosmic Ray Intensity Associated with Magnetic Storms // Nature. – 1946. – V. 158. P. 618–619.
56. Alfven H. On the Origin of Cosmic Radiation // Tellus. – 1954. – V. 6. – I. 2. – P. 232–253.
57. Altuchov A.M., Krimsky G.F., Kuzmin A.I. The method of "Global survey" for investigation cosmic ray modulation / Proc. 11th ICRC, Budapest. – 1969. – V. 4. – P. 457–460.
58. Badruddin. Cosmic ray modulation: effects of high speed solar wind streams // Astrophys. Space Sci. – 1996. – V. 246. – P. 171–191.
59. Badruddin, Kumar A. Study of the cosmic-ray modulation during the passage of ICMEs and CIRs. // Solar Phys. – 2016. – V. 291. – P. 559–580.
60. Baisultanova L., Belov A., Yanke V. Magnetospheric effects of cosmic rays within the different phases of the magnetic storms / Proc. 24th ICRC, Rome. – 1995. – V. 4. – P. 1090–1093.
61. Barnden L.R. Forbush decreases 1966-1972; their solar and interplanetary associations and their anisotropies // Proc. 13th ICRC, Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1271–1276.

62. Barnden L.R. The large-scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases // Proc. 13th ICRC, Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1277–1282.
63. Barouch E., Burlaga L.F. Causes of Forbush decreases and other cosmic ray variations // J. Geophys. Res. – 1975. – V. 80. – P. 449–456.
64. Bazilevskaya G. A., Svirzhevskaya A. K. On the stratospheric measurements of cosmic rays // Space Sci. Rev. – 1998. – V. 85. – P. 431–521.
65. Behannon K.W., Burlaga L. F., 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.
66. Belov A.V., Blokh Ya.A., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Inozemtseva O.I., Kaminer N.S. Studies of isotropic and anisotropic cosmic ray variations in the Earth's vicinities during disturbed periods / Proc. 13th ICRC, Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1247–1255.
67. Belov A.V., Blokh Ya.L., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Inozemtseva O.I., Kaminer N.S. Anisotropy and time-dependent changes in the spectrum of cosmic-ray intensity variations during August, 1972 // AN USSR Izv. Ser. Fiz. – 1974. – V. 38. – P. 1867–1875.
68. Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Iucci N., Villaresi G., Yanke V.G. Search for predictors of Forbush decreases / Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome. – 1995. – V. 4. – P. 888–891.
69. 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.
70. Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp. – 2009. – V. 257. – P. 439–450.
71. Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H. Galactic Cosmic Ray Density Variations in Magnetic Clouds // Solar Phys. – 2015. – V. 290. – P. 1429–1444.
72. Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki H. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Phys. – 2018. – V. 293. – N. 4. – article id. 68. – 23 pp.

73. 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*. – 2022a. – V. 8. – N 6. – Article ID 7. – 15 pp.
74. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Belova E., Abunin A., Papaioannou A. Solar energetic particle events and Forbush decreases driven by the same solar sources // *Universe*. – 2022b. – V. 8. – N 8. – Article ID 403. – 18 pp.
75. Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abunin A., Papaioannou A., Richardson I. 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. – I. 3. P. 4652–4668.
76. 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 Phys.* – 2024 – V. 299. – Article ID 164. – 15pp.
77. Blake J.B., Baker D.N., Turner N., Ogilvie K.W., Lepping R.P. Correlation of changes in the outer-zone relativistic electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24. – P. 927–929.
78. Blanco J. J., Hidalgo M. A., Gómez-Herrero R., Rodríguez-Pacheco J., Heber B., Wimmer-Schweingruber R. F., Martín C. Energetic-particle-flux decreases related to magnetic cloud passages as observed by the *Helios* 1 and 2 spacecraft // *Astronomy & Astrophysics*. – 2013. – V. 556. – A146. – 9 pp.
79. Borovsky J. E., Denton M. H. Differences between CME-driven storms and CIR driven storms // *J. Geophys. Res. (Space Physics)*. – 2006. – V. 111. – ID A07S08. – 17 pp.
80. Bothmer V., Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // *Annales Geophysicae*. – 1998. – V. 16. I. 1. – P. 1–24.
81. Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: *Voyager*, *Helios*, and *IMP 8* observations // *J. Geophys. Res.* – 1981. – V. 86. – P. 6673–6684.
82. Burlaga L.F., Behannon K.W., Klein L.W. Compound streams, magnetic clouds, and major geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* – 1987. – V. 92. – N. A6. – P. 5725–5734

83. Burlaga L. F., Plunkett S. P., St. Cyr O. C. Successive CMEs and complex ejecta // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107. – N A10. – P. SSH 1-1-SSH 1-12.
84. Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T. Merged interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108. – N A12. – P. SSH 2-1-SSH 2-12.
85. Čalogović J., Dumbović M., Vršnak B., Sudar D., Martinić K., Temmer M., Veronig A. Probabilistic Drag-Based Ensemble Model (DBEM) evaluation for heliospheric propagation of CMEs // Solar Phys. – 2021. – V. 296. – Article ID 114. – 30 pp.
86. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T. Cosmic ray decreases and particle acceleration in 1978–1982 and associated solar wind structures // J. Geophys. Res. – 1993. – V. 98. – P. 13295–13302
87. Cane H., Richardson I., von Rosenvinge T., Wibberenz G. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study // J. Geophys. Res. – 1994. – V. 99. – N A11. – P. 21429–21442.
88. Cane H. V., Richardson I. G., Wibberenz G. The Response of Energetic Particles to the Presence of Ejecta Material / Proc. 24th ICRC. Rome. Italy. –1995. – V. 4. – P. 377–380.
89. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge, T.T. Cosmic ray decreases: 1964-1994 // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101. – P. 21561–21572
90. Cane H., Richardson I., Wibberenz G. Helios 1 and 2 observations of particle decreases, ejecta, and magnetic clouds // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102. – N A4. – P. 7075–7086.
91. Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. – 2000. – V. 93. – P. 55–77.
92. Case A. W. Galactic cosmic ray variations at the moon // ProQuest Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.) Boston University, 2011.; Publication Number: AAT 3430354; ISBN: 9781124295879; Source: Dissertation Abstracts International, Volume: 71-11. Section: B, page: 6816; 154 p. Pub Date: May 2011

- 93.Chen C., Wang Y., Shen C., Ye P., Zhang J., Wang S. Statistical study of coronal mass ejection source locations: 2. Role of active regions in CME production // J. Geophys. Res. – Space. – 2011. – V. 116. – N A12. – ID A12108. – 15 pp.
- 94.Clay J., Bruins E.M. Magnetic storm and variation of cosmic rays // Physica. – 1938. – Volume 5. – I. 2. – P. 111-114.
- 95.Cliver E.W. and Cane H. The Angular Extents of Solar/Interplanetary Disturbances and Modulation of Galactic Cosmic Rays // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101. – P. 15533–15546.
- 96.Cranmer S. R. Coronal holes // Living Rev. Sol. Phys. – 2009. – V. 6 – Article ID 3. – 66 pp.
- 97.Compton A.H., Wollan E.O., Bennett R.D. A precision recording cosmic-ray meter // Rev. Sci. Instrum. – 1934. – V. 5. – N. 12. – P. 415–422..
- 98.Davies E., Scolini C., Winslow R., Jordan A., Möstl C. The effect of magnetic field line topology on ICME-related GCR modulation // Ap. J. – 2023. – V. 959. – N. 2. ID 133. – 14 pp.
- 99.Démoulin P., Nakwacki M. S., Dasso S., Mandrini C. H. Expected in Situ Velocities from a Hierarchical Model for Expanding Interplanetary Coronal Mass Ejections // Sol. Phys. – 2008. – V. 250. – P. 347–374.
100. Démoulin P., Dasso S. Causes and consequences of magnetic cloud expansion // Astronomy & Astrophysics. – 2009. – V. 498. – P. 551–566.
101. Dierckxsens M., Tziotziou K., Dalla S., Patsou I., Marsh M.S., Crosby N.B., Malandraki O., Tsiropoula G. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: statistical analysis of solar cycle 23 events // Solar Phys. – 2015. – V. 290. – P. 841–874.
102. Dorman L. I. Progress in elementary particle and cosmic ray physics. 7. Geophysical and astrophysical aspects of cosmic radiation. – New-York.: North-Holland Publishing, – 1963. – 344 pp.
103. Dorman L. I. Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data // Ann. Geophys. – 2005. – V. 23. – P. 2997–3002.

104. Dubey S. K., Kumar S., Agrawal R. Results of diurnal anisotropy in CR intensity on different geomagnetic conditions / Proc. 27th ICRC. Hamburg. Germany. – 2001. – P. 3963–3965.
105. Duggal S., Forbush S., Pomerantz M. Variations of the diurnal anisotropy with periods of one and two solar cycles / Proc. 11th ICRC, Budapest. – 1970. – V. 29. – P. 55–59.
106. Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Karlica M. Cosmic ray modulation by solar wind disturbances // Astronomy & Astrophysics. – 2011. – V. 531. – A91. – 12 pp.
107. Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances // Astronomy & Astrophysics. – 2012. – V. 538. – A28. – 15 pp.
108. Dumbović M., Heber B., Vršnak B., Temmer M., Kirin A. An analytical diffusion–expansion model for Forbush Decreases caused by flux ropes // Ap. J. – 2018. – V. 860. – N. 1. – ID 71. – 12 pp.
109. Dumbović M., Vršnak B., Guo J. et al. Evolution of Coronal Mass Ejections and the Corresponding Forbush Decreases: Modeling vs. Multi-Spacecraft Observations // Sol. Phys. – 2020. – V. 295. – ID 104. – 33 pp.
110. Dunzlaff P., Heber B., Kopp A., Rother O., Müller-Mellin R., Klassen A., Gómez-Herrero R., and Wimmer-Schweingruber R. Observations of recurrent cosmic ray decreases during solar cycles 22 and 23 // Ann. Geophys. – 2008. – V. 26. P. 3127–3138
111. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Analyzing the solar proton event of 22 October 1989, using the method of Spectrographic Global Survey // Sol. Phys. – 1998. – V. 178. – P. 405–422.
112. Ehmert A. Zum Verhalten der kosmischen Ultrastrahlung bei magnetischen Stürmen // Naturwissenschaften. – 1954. – V. 41. – P. 317–318.
113. Elliot H. The variations of cosmic ray intensity // Progress in Cosmic Ray Phys. – 1952. – V. 1. – P. 453–514.

114. Farrugia C.J. and Berdichevsky D.B. Evolutionary signatures in complex ejecta and their driven shocks // *Ann. Geophys.* – 2004. – V. 22. – N. 10. – P. 3679–3698.
115. Feng X., Yang L., Xiang C., Wu S. T., Zhou Y., Zhong D. Three-dimensional Solar WIND modeling from the Sun to Earth by a SIP-CESE MHD model with a six-component grid // *Astrophys. J.* – 2010. – V. 723. – N. 1. – P. 300–319.
116. Fenton A. G., Humble J. E., Thambyahpillai T. Long-term changes in the solar diurnal variation / *Proc. 18th ICRC, Bangalore, India.* – 1983. – V. 10. – P. 186–189.
117. Flueckiger E. O. Forbush decreases, geomagnetic and atmospheric effects of cosmogenic nuclides // *Goddard Space Flight Center Nineteenth International Cosmic Ray Conference. Conference Papers* – 1985. – V. 9. – P. 301–322.
118. Fokker A. D. Type IV solar radio emission // *Space Sci. Rev.* – 1963. – V. 2(1). – P. 70–90.
119. Forbush S.E., On the effects in the cosmic ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* – 1937. – V. 51. I. 12. – P. 1108–1109
120. Forbush S.E. On cosmic-ray effects associated with magnetic storms // *Terr. Mag.* – 1938. – V. 43. – N 3. – P. 203–218.
121. Forbush S.E. World-wide cosmic-ray variations, 1937-1952 // *J. Geophys. Res.* – 1954. – V. 59. – N 4. – P. 525–542.
122. Forbush S.E. Variation with a period of two solar cycles in the cosmic-ray diurnal anisotropy and the superposed variations correlated with magnetic activity // *J. Geophys. Res.* – 1969. – V. 74. – I. 14. – P. 3451–3468.
123. Forbush S.E. Cosmic ray diurnal anisotropy 1937–1972 // *J. Geophys. Res.* – 1973. – V. 78. – N. 34. – P. 7933–7941.
124. Freiherr von Forstner J. L. Dumbović M., Möstl Ch. et al. Radial evolution of the April 2020 stealth coronal mass ejection between 0.8 and 1 AU. Comparison of Forbush decreases at Solar Orbiter and near the Earth // *Astronomy & Astrophysics.* – 2021. – V. 656. – id A1. – 16 pp.
125. Freiherr von Forstner J. L., Guo J., Wimmer-Schweingruber R. F., Dumbović M., Janvier M., Démoulin P. et al. Comparing the properties of ICME-induced Forbush

- decreases at Earth and Mars // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2020. – V. 125. – e2019JA027662. – 21 pp.
126. Ghag K., Tari P., Raghav A. et al. The role of extreme geomagnetic storms in the Forbush decrease profile observed by neutron monitors // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2023. – V. 252. – Article ID 106146. – 11 pp.
 127. Gil A., Mursula K. Exceptionally strong variation of galactic cosmic ray intensity at solar rotation period after the maximum of solar cycle 24 / *Proc. 34th ICRC, Hague, Netherlands, 30 July – 6 August, 2015*. – V. 236. – ID 149. – 4 pp.
 128. Gold T. Energetic particle fluxes in the solar system and near the earth // *Astrophysical Journal, Supplement Series (US)*. – 1960. – T. 4. – №. 44.
 129. Gold T. Magnetic storms // *Space Sci. Rev.* – 1962. – V. 1(1). – P. 100–114.
 130. Gopalswamy N., Lara A., Lepping R. P., Kaiser M. L., Berdichevsky T.M., St. Cyr O. C. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – V. 27. – N. 2. – P. 145–148.
 131. 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. – N 1. – P. L91–L94.
 132. Gopalswamy N., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S., Yashiro S. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences // *J. Geophys. Res.* – 2009. – V.114. – P.A00–A22.
 133. Gopalswamy N., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiro S., Xie H., Thakur N., Kahler S.W. Large solar energetic particle events associated with filament eruptions outside of active regions // *Astrophys. J. Lett.* – 2015. V. 806. – ID 8. – 15 pp.
 134. Gosling J. T., Hildner E., MacQueen R. M., Munro R. H., Poland A. I., Ross C. L. The speeds of coronal mass ejection events // *Solar Phys.* – 1976. – V. 48. – P. 389–397.
 135. Gosling J.T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space. / Russell C.T., Priest E.R., Lee L.C. (eds) *Geophysical Monograph Series*. – V. 58. – American Geophysical Union, Washington D. C. – 1990. – P. 343–364.

136. Guo J., Lillis R., Wimmer-Schweingruber R.F., et al. Measurements of Forbush decreases at Mars: both by MSL on ground and by MAVEN in orbit 2018, *Astronomy & Astrophysics*. – 2018. – V. 611. Article number A79. – 14 pp.
137. Hajra R., Sunny J.V., Babu M., and Nair A.G. Interplanetary sheaths and corotating interaction regions: a comparative statistical study on their characteristics and geoeffectiveness // *Solar Phys.* – 2022. – V. 297. – article number 97. – 11 pp.
138. Hajra R., Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Lu Q., Du A. Interplanetary Causes and Impacts of the 2024 May Superstorm on the Geosphere: An Overview // *The Astrophysical Journal*. – 2024. – V. 974. – I. 2. – id 264. – 12 pp.
139. Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor // *Can. J. Phys.* – 1964. – V. 42. – P. 2443–2472
140. Heinemann S.G., Temmer M., Farrugia C.J. et al. CME–HSS interaction and characteristics tracked from Sun to Earth // *Solar Phys.* – 2019. – V. 294. – article number 121. – 22 pp.
141. Hess V.F., Demmelmair A. World-wide effect in cosmic ray intensity, as observed during a recent magnetic storm. *Nature*. – 1937. – V. 140. – N. 3538. – P. 316–317.
142. Howard T. A., Tappin S.J. Interplanetary coronal mass ejections observed in the heliosphere: 1. Review of theory // *Space Sci. Rev.* – 2009. – V. 147. – P. 31–54.
143. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G. High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation // *Nuovo Cimento C*. – 1979. – V. 2C. – P. 421–438.
144. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G. Interplanetary disturbances during Forbush decreases. // *Nuovo Cimento C*. – 1984. – V. 7. P. 467–488.
145. Janvier M., Démoulin P., Guo J., Dasso S., Regnault F., Tóthi-Moutésidou S., Gutierrez C., Perri B. The Two-step Forbush Decrease: A tale of two substructures modulating galactic cosmic rays within coronal mass ejections // *Ap. J.* – 2021. – V. 922. – ID 216. –15 pp.
146. Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., Galvin A.B., MacNeice P.J. Multi-spacecraft observations: stream interactions and associated structures // *Solar Phys.* – 2009. – V. 259. – P. 345–360.

147. Johnson T. H. On the variations of cosmic radiation during magnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. – 1938. – V. 43(1). – P. 1–6.
148. Jokipii J. R. Propagation of cosmic rays in the solar wind // Rev. Geophys. – 1971. – V. 9(1). – P. 27–87.
149. Jordan A. P., Spence H. E., Blake J. B., Shaul, D. N. A. Revisiting two-step Forbush decreases // J. Geophys. Res. – 2011. – V. 116. – A11103. – 13 pp.
150. Kaushik S. C., Shrivastava P. K., Rastogi V. K. Comparative study of first three harmonics of cosmic ray intensity during recent solar cycle / Proc. 27th ICRC, Hamburg, Germany. – 2001. – P. 3809.
151. Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // Living Rev. Sol. Phys. – 2017. – V. 14. – Article number 5. – 83 pp.
152. Klein L. W., Burlaga L. F. Interplanetary magnetic clouds At 1 AU // J. Geophys. Res. – 1982. – V. 87. – I. A2. – P. 613–624.
153. Kopp A., Wiengarten T., Fichtner H., Effenberger, Kühl P., Heber B., Raath J.-L., Potgieter M.S. Cosmic-ray transport in heliospheric magnetic structures. II. modeling particle transport through corotating interaction regions // Ap. J. – 2017. – V. 837. – N. 1. – Article number 37. – 9 pp.
154. Kota J. On the second spherical harmonics of the cosmic ray angular distribution // J. Phys. A: Mathematical and General. – 1975. – V. 8. – I. 8. – P. 1349–1360.
155. Krittinatham W., Ruffolo D. Drift orbits of energetic particles in an interplanetary magnetic flux rope // The Astrophysical Journal. – 2009. V. 704. P. 831–841.
156. 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.
157. Kubo Y., Shimazu H. Effect of Finite Larmor Radius on Cosmic-ray Penetration into an Interplanetary Magnetic Flux Rope // The Astrophysical Journal. – 2010. – V. 720. I. 1. P. 853–861.
158. Kudela K., Storini M., Hofer M.Y., Belov A. Cosmic rays in relation to space weather // Space Sci. Rev. – 2000. – V. 93. – P. 153–174.

159. Kunow H., Witte M., Wibberenz G., Hempe H., Mueller-Mellin R., Green G., Iwers B., and Fuckner J. Cosmic ray measurements on board Helios 1 from December 1974 to September 1975: quiet time spectra, radial gradients, and solar events // *J. Geophys.* – 1977. – V. 42. – P. 615–631.
160. Lagoida I.A., Voronov S.A., Mikhailov V.V. et al. Study of Forbush Decrease Recovery Times by the Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics (PAMELA) Experiment // *Sol Phys.* – 2023. – V. 298. – Article ID 9. – 12 pp.
161. Lara A., Gopalswamy N., Caballero-López R.A., Yashiro S., Xie H., Valdés-Galicia J.F. Coronal mass ejections and galactic cosmic-ray modulation // *Astrophys. J.* – 2005. – V. 625. – P. 441–450
162. Laster H., Lenchek A. M., & Singer, S. F. Forbush decreases produced by diffusive deceleration mechanism in interplanetary space // *J. Geophys. Res.* – 1962. V. 67. – P. B583–B587.
163. Li W., Thorne R.M., Bortnik J., Baker D.N., Reeves G.D., Kanekal S.G., Spence H.E., Green J.C. Solar wind conditions leading to efficient radiation belt electron acceleration: a superposed epoch analysis // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – P. 6906–6915.
164. Lindsay G. M., Luhmann J. G., Russell C. T., Gosling J. T. Relationships between coronal mass ejection speeds from coronagraph images and interplanetary characteristics of associated interplanetary coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* – 1999. – V. 104. – N. A6. – P. 12515–12523.
165. Liu Y.D., Luhmann J.G., Möstl C., Martinez-Oliveros J.C., Bale S.D., Lin R.P., Harrison R.A., Temmer M., Webb D.F., Odstreil D. Interactions between coronal mass ejections viewed in coordinated imaging and in situ observations // *Astrophys. J. Lett.* – 2012. – V. 746. – Article ID L15. – 7 pp.
166. Liu Y.D., Yang Z., Wang R., Luhmann J. G., Richardson J. D., Lugaz N. Sun-to-Earth characteristics of two coronal mass ejections interacting near 1 AU: formation of a complex ejecta and generation of a two-step geomagnetic storm 2014 // *Astrophys. J. Lett.* – 2014. – V. 793. – Article ID L41. 6 pp.

167. Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci Rev.* – 1971. – V. 12. – P. 658–715.
168. Lockwood J. A., Webber W. R., Jokipii J. R. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation: 1. Observations at earth at different energies // *Journal of Geophysical Research.* –1986. – V. 91. – I. A3. – P. 2851-2857.
169. Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V. 96. – N. A7. – P. 11587–11604.
170. Luo X., Potgieter M. S., Zhang M., Feng X. A numerical study of Forbush Decreases with a 3D cosmic-ray modulation model based on an SDE approach // *Ap. J.* – 2017. – V. 839. – ID 53. – 10 pp.
171. Luo X., Zhang M., Feng X., Potgieter M.S., Shen F., Bazilevskaya G. A numerical study of the effects of corotating interaction regions on cosmic-ray transport // *Ap. J.* – 2020. – V. 899. N. 2 – ID 90. – 12pp.
172. Lugaz N., Manchester W.B. IV, and Gombosi T.I. Numerical simulation of the interaction of two coronal mass ejections from Sun to Earth // *Astrophys. J.* – 2005. – V. 634. – N. 1. – P. 651–662.
173. Lugaz N., Farrugia C.J., Smith C.W., and Paulson K. Shocks inside CMEs: A survey of properties from 1997 to 2006 // *J. Geophys. Res.: Space.* – 2015. – V. 120. – N. 4. – P. 2409–2427.
174. 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.
175. 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.
176. Masías-Meza J. J., Dasso S., Démoulin P., Rodriguez L., Janvier M. Superposed epoch study of ICME sub-structures near Earth and their effects on Galactic cosmic rays // *Astronomy & Astrophysics.* – 2016. V. 592. – A118. – 13 pp.

177. Marquardt J., Heber B. Galactic cosmic ray hydrogen spectra and radial gradients in the inner heliosphere measured by the HELIOS Experiment 6// *Astron. Astrophys.* – 2019. – V. 625. – A153. – 7 pp.
178. Mathews T., Venkatesan D., Wiison B. G. Pronounced diurnal variation in cosmic-ray intensity // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1969. – V. 74. – N. 5. – P.1218–1229.
179. Mavromichalaki H., Papailiou M.Ch., Livada M., Gerontidou M., Paschalis 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. – ID 1033. – 17 pp.
180. McCracken K. G., Rao U. R., Bukata R. P. Recurrent Forbush Decreases associated with M-region magnetic storms // *Phys. Rev. Lett.* – 1966. – V. 17. – P. 928–932.
181. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin 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.
182. 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.
183. Mishra R.K., Mishra R.A. Interplanetary transients and cosmic-ray anisotropy // *Solar Phys.* – 2007. – V. 240. – P. 359–372.
184. Moon Y.J., Choe G.S., Wang H., Park Y.D. Sympathetic Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.* – 2003. – V. 588. – N 2. – P. 1176–1182.
185. Mori S., Yasue S., Ichinose M., Munakata Y. Cosmic ray daily variation at solar activity minimum / *Proc 15th ICRC, Budapesht.* – 1977. – V. 4. – P. 65–69.

186. Morrison P. Solar Origin of Cosmic-Ray Time Variations // *Phys. Rev.* – 1956. – V. 101. P. 1397–1404.
187. Müller-Mellin R., Witte M., Hempe H., Kunow H., Wibberenz G., Green G. Cosmic ray radial gradients: Helios 1 results between 1.0 and 0.3 AU / *Proc. 15th ICRC, Bulgaria, Plovdiv.* – 1977. – V. 11. – P. 214–218.
188. Munakata K., Nagashima K. The First three harmonics of solar daily variation caused by the diffusive propagation of galactic cosmic rays through the heliosphere / *Proc. 19th ICRC, La Jolla, USA.* – 1985. – V. 5. – P. 98.
189. Munakata K., Yasue S., Kato C. et al. On the cross-field diffusion of galactic cosmic rays into an ICME // *Advances in geosciences V. 2: Solar Terrestrial* / Singapore: World Scientific. – 2006. – P.115.
190. Munakata K., Kozai M., Kato C., Kota J. Long-term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays observed with the Nagoya multi-directional muon detector // *Astrophys. J.* – 2014. – V. 791. – id 22. – 16pp.
191. Munakata K., Kozai M., Kato C., et al. Large amplitude bidirectional anisotropy of cosmic-ray intensity observed with world-wide networks of ground-based neutron monitors and muon detectors in November, 2021 // *Astrophys. J.* – 2022. – V. 938. – id 30. – 11pp.
192. Nagashima K. Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space // *Rep. Ionosphere Space Res.* – 1971. – V. 25. – P. 189–211.
193. Odstrcil D. Modeling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* – 2003. – V. 32. – N.4. – P. 497–506.
194. Oh S.Y., Yi Y., Bieber J.W. Modulation cycles of galactic cosmic ray diurnal anisotropy variation // *Solar Phys.* – 2010. – V. 262. – P. 199–212.
195. Okike O. Amplitude of the usual cosmic ray diurnal and enhanced anisotropies: Implications for the observed magnitude, timing, and ranking of Forbush Decreases // *Astrophys. J.* – 2021. – V. 915. – I. 1. – id.60. – 23 pp.
196. Opitz A., Karrer R., Wurz P. et al. Temporal evolution of the solar wind bulk velocity at solar minimum by correlating the STEREO A and B PLASTIC measurements // *Solar Phys.* – 2009. – V. 256. – P. 365–377.

197. Paouris E., Mavromichalaki H. Effective Acceleration Model for the arrival time of interplanetary shocks driven by coronal mass ejections // *Solar Phys.* – 2017. – V. 292. – Article number 180. – 11 pp.
198. Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Precursor effects in different cases of Forbush decreases // *Solar Phys.* – 2012. – V. 276. – P. 337–350.
199. Papaioannou A., Belov A., Abunina M. et al. A Catalogue of Forbush Decreases Recorded on the Surface of Mars from 2012 Until 2016: Comparison with Terrestrial FDs // *Sol. Phys.* – 2019. – V. 294. – Article ID 66. – 39 pp.
200. Parker E. N. Cosmic-Ray Modulation by Solar Wind // *Phys. Rev.* – 1958. – V. 110, P. 1445–1449.
201. Parker E.N. The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planetary and Space Science.* – 1965. – V. 13. – I. 1. P. 9-49.
202. Parker E. N. *Interplanetary Dynamical Processes* / New York: Interscience Publishing. – 1963.
203. Patel D., Sarabhai V., Subramanian G. Anisotropies of galactic cosmic rays in the solar system // *Planet. Space Sci.* – 1968. – V. 16. – P. 1131–1146.
204. Paularena K. I., C. Wang R. von Steiger, and Heber B. An ICME observed by Voyager 2 at 58 AU and by Ulysses at 5 AU // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – V. 28. – P. 2755-2758.
205. Penna R.F., Quillen, A.C. Decay of interplanetary coronal mass ejections and Forbush decrease recovery times // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110. – A09S05. – 10 pp.
206. Petukhova A. S., Petukhov I. S., Petukhov S. I. Forbush decrease in the intensity of cosmic rays in a toroidal model of a magnetic cloud // *JETP letters.* – 2015. – V. 102. – N. 11. – P. 697–700.
207. Petukhova A. S., Petukhov I. S., Petukhov S. I. Theory of the formation of Forbush decrease in a magnetic cloud: dependence of Forbush decrease characteristics on magnetic cloud parameters // *Ap. J.* – 2019. – V. 880. – N. 1. – P. 17–24.

208. Pizzo V. A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind, 1. Theoretical foundations // *J. Geophys. Res.* – 1978. – V. 83. – I. A12. – P. 5563– 5572.
209. Potgieter M. S. Solar Modulation of Cosmic Rays // *Living Rev. Solar Phys.* – 2013. – V. 10. – Article number 3. – 66 pp.
210. Quenby J. J. The theory of cosmic ray modulation / *Handbook of Physics XLVI/2.* – 1967. 310 pp.
211. Quenby J. J., Mulligan T., Blak, J. B., Mazur J. E., Shaul D. Local and nonlocal geometry of interplanetary coronal mass ejections: Galactic cosmic ray (GCR) short-period variations and magnetic field modeling // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* – 2008. – V. 113. – CiteID A10102. – 12 pp.
212. Rankin J. S., McComas D. J., Leskeet R. A. et al. Anomalous cosmic-ray oxygen observations into 0.1 AU // *Astrophys. J.* – 2022. – V. 925. – 9 pp.
213. Reames D.V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // *Space Sci. Rev.* – 1999. – V. 90. – P. 413–491
214. Reeves G. D., Morley S. K., Friedel R. H. W., Henderson M. G., Cayton T. E., Cunningham G., Blake J. B., Christensen R. A., Thomsen D. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116. – N A02213. – 18 pp.
215. 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. – 1996. – *J. Geophys. Res.* – V. 101. – P. 13483 – 13496.
216. Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~ 1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – P. 12579–12592.
217. Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Sci. Rev.* – 2004. – V. 111. – P. 267–376.

218. Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and summary of properties // *Solar Phys.* – 2010. – V. 264. – P. 189–237.
219. Richardson I.G., Cane H.V. Galactic cosmic ray intensity response to interplanetary coronal mass ejections/magnetic clouds in 1995-2009 // *Solar Phys.* – 2011. – V. 270. – P. 609–627.
220. Richardson, I. G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. – 2018. – *Liv. Rev. Sol. Phys.* – V. 15. – article number 1. – 95 pp.
221. Rodkin D.G., Shugay Y.S., Slemzin I.S., Veselovsky V. A. Interaction of high-speed and transient fluxes of solar wind at the maximum of solar cycle 24 // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* – V. 43. – I. 9. – P. 287–290.
222. Sabbah I. Solar magnetic polarity dependency of the cosmic ray diurnal variation // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* – 2013. – V. 118. P. 4739–4747.
223. Sanderson R.T., Beeck J., Marsden G.R., Tranquille C., Wenzel K., McKibben B.R., Smith J.E. A study of the relation between magnetic clouds and Forbush decreases // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide.* – 1990. – V. 6. – P. 251–254.
224. Sari J.W., Venkatesan D., Lanzerotti L. J., MacLennan C. G. Diurnal variation of cosmic ray intensity 1. Two approaches to the study // *J. Geophys. Res.* – 1978. – V. 83. – N. A11. – P. 5139 – 5150.
225. Shen F., Feng X., Wu S. T., Xiang C. Three-dimensional MHD simulation of CMEs in three-dimensional background solar wind with the self-consistent structure on the source surface as input: Numerical simulation of the January 1997 Sun-Earth connection event // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – A06109. – 13 pp.
226. Shen F., Wang Y., Shen C., and Feng X. On the collision nature of two coronal mass ejections: A review // *Solar Phys.* – 2017. – V. 292. – article number 104. – 20 pp.
227. 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.* – 2022. – V. 511. – N 4. – P. 5897-5908.

228. Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. An empirical model for estimating ICMEs speeds and delays // Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of VIII International Conference.: сб. науч. тр. / – Kaliningrad, 2023. – С. 20-24.
229. Shugay Y., Kalegaev V., Kaportseva K., Slemzin V., Rodkin D., Ereemeev V. Modeling of solar wind disturbances associated with coronal mass ejections and verification of the forecast results // Universe. – 2022. – V. 8. – I. 11. – Article ID 565. – 12 pp.
230. Simpson J. A., Babcock H. W., and Babcock H. D. Association of a "Unipolar" Magnetic Region on the Sun with Changes of Primary Cosmic-Ray Intensity // Phys. Rev. – 1955. – V. 98. P. 1402 – 1407.
231. Simpson J.A., Fonger W., Treiman S.B. Cosmic radiation intensity – time variations and their origin. I. Neutron intensity variation method and meteorological factors // Phys. Rev. – 1953. – V. 90. – P. 934–950
232. Simpson J.A. Cosmic-radiation neutron intensity monitor // Annals of the IGY. – 1957. – V. 4. – P. 351–373
233. Singer S.F. Cosmic ray time variations produced by deceleration in interplanetary space // Nuovo Cim. – 1958. – V. 8. – P. 334–341.
234. Singh M., Badruddin. Study of the cosmic ray diurnal anisotropy during different solar and magnetic conditions // Solar Phys. – 2006. – V. 233. – P. 291–317.
235. Singh Y. P., Badruddin Corotating high-speed solar-wind streams and recurrent cosmic ray modulation // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2007. – V. 112. – I. A5. – CiteID A05101. – 10 pp.
236. Sohn, J., Oh, S., Yi, Y. et al. Forbush decrease in lunar space environment observed by CRaTER on the LRO // Astrophys Space Sci. – 2019. – V. 364. 364 – I. 8. – Article ID 125. – 8 pp.
237. Srivastava N., Mishra W., Chakrabarty D. Interplanetary and geomagnetic consequences of interacting CMEs of 13 – 14 June 2012 // Solar Phys. – 2018. – V. 293. – Article ID 5. – 16 pp.
238. Swinson D.B. Sidereal cosmic-ray diurnal variations // J. Geophys. Res. – 1969. – V. 74. – N. 24. – P. 5591–5598.

239. Temmer M., Veronig A.M., Peinhart V., and Vršnak, B. Asymmetry in the CME–CME interaction process for the events from 2011 February 14–15 // *Astrophys. J.* – 2014. – V. 785. – N. 2. – ID 85. – 7 pp.
240. Thalmann J.K., Su Y., Temmer M., Veronig A.M. The confined X-class flares of solar active region 2192 // *Astrophys. J. Lett.* – 2015. – V. 801. – N 2. – ID L23. – 6 pp.
241. Thernisien A. Implementation of the Graduated Cylindrical Shell Model for the three-dimensional reconstruction of coronal mass ejections // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2011. – V. 194. – N. 2. – Article number 33. – 15 pp.
242. Thompson J.L. A critical analysis for sidereal time variations of cosmic rays on the pacific // *Phys. Rev.* 1939. – V. 55. – P. 11–15.
243. Tiwari A.K., Singh A., Agrawal S.P. Study of the diurnal variation of cosmic rays during different phases of solar activity // *Solar Phys.*– 2012. – V. 279. – P. 253–267.
244. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Akasofu S.I., Smith E.J. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979) // *J. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – P. 8519–8531.
245. Tousey R. The solar corona / *Proceedings of Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences of the 15th Plenary Meeting of COSPAR 1972, Madrid, Spain.* – Akademie-Verlag. Berlin. – 1973. – P. 713–730
246. Trumpy B. Time variations of cosmic ray intensity associated with geomagnetic and solar activity // *Physica.* – 1953. – V. 19. – P. 645-667.
247. Vourlidas A., Howard R.A., Esfandiari E., Patsourakos S., Yashiro S., Michalek G. Comprehensive analysis of coronal mass ejection mass and energy properties over a full solar cycle // *Astrophys. J.* – 2010. – V. 722. – P. 1522–1538.
248. Vršnak B., Sudar D., Ruždjak D., Žic T. Projection effects in coronal mass ejections. // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V. 469. – P. 339–346.
249. Vršnak B., Dumbović M., Heber B. and Kirin A. Analytic modeling of recurrent Forbush decreases caused by corotating interaction regions // *Astronomy & Astrophysics.* – 2022. – V. 658. – Article Number A186. – 15 pp.
250. Wang Y., Wang S., and Ye P. Multiple magnetic clouds in interplanetary space // *Solar Phys.* – 2002. – V. 211. – P. 333–344.

251. Wang Y., Liu L., Shen C., Liu R., Ye P., Wang S. Waiting times of quasi-homologous Coronal Mass Ejections from super active regions // *Astrophys. J. Lett.* – 2013. – V. 763. – N 2. – ID L43. – 5 pp.
252. Wawrzynczak A., Alania M.V. Modeling of the recurrent Forbush effect of the galactic cosmic ray intensity and comparison with the experimental data // *Adv. Space Res.* – 2008. – V. 41 (2). – P. 325-334
253. Wawrzynczak A., Alania M. V. Modeling and data analysis of a Forbush decrease // *Advances in Space Research.* – 2010. – V. 45. – I. 5. – 2010. – P. 622-631.
254. Webber W.R., Cummings A.C., McDonald F.B., Stone E.C., Heikkila B., Lal N. Passage of a large interplanetary shock from the inner heliosphere to the heliospheric termination shock and beyond: Its effects on cosmic rays at Voyagers 1 and 2 // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. – L20107. – 10 pp.
255. Winslow R. M., Schwadron N. A., Lugaz N. et al. Opening a Window on ICME-driven GCR Modulation in the Inner Solar System // *The Astrophysical Journal.* – 2018. – V. 856. – ID 139. – 9pp.
256. Witasse O., Sánchez-Cano B., Mays M. L. et al. Interplanetary coronal mass ejection observed at STEREO-A, Mars, comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Saturn, and New Horizons en route to Pluto: Comparison of its Forbush decreases at 1.4, 3.1, and 9.9 AU // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* – 2017. – V. 122. – P. 7865–7890.
257. Wibberenz G., Le Roux J.A., Potgieter M.S., Bieber J.W. Transient effects and disturbed conditions // *Space Sci. Rev.* – 1998. – V. 83. – P. 309–348.
258. Wood B. E., Wu C. -C., Rouillard A. P., Howard R. A., Socker D. G. A Coronal Hole's effects on coronal mass ejection shock morphology in the inner heliosphere // *Astrophys. J.* – 2012. – V. 755. – I. 1. – Article ID 43. – 10 pp.
259. Wu C. C., Liou K., Socker D. G., Howard R., Jackson B. V., Yu H. S., Hutting L., Plunkett S. P. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)” // *Earth Planet Sp.* – 2016. – V. 68. – Article ID 151. – 12 pp.

260. Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., Cyr O.S., Plunkett S.P., Rich N.B., Howard R.A. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft // J. Geophys. Res. (Space Physics). – 2004. – V. 109. – A07105. – 16 pp.
261. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., and Yermolaev M.Y. Peculiarities of the heliospheric state and the solar-wind/magnetosphere coupling in the era of weakened solar activity // Universe. – 2022. – V. 8. – N. 10. – ID 495. – 6 pp.
262. Zhang J., Richardson I. G., Webb D. F. et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100nT$) during 1996–2005 // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112. – N A10102. – 19 pp.
263. Zhang J., Temmer M., Gopalswamy N. et al. Earth-affecting solar transients: a review of progresses in solar cycle 24 // Prog. Earth Planet Sci. – 2021. – V. 8. – ID 56. – 102 pp.
264. Zurbuchen T.H., Richardson I.G. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections // Space Sci. Rev. – 2006. – V. 123. – P. 31–43.
265. Britannica [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.britannica.com/science/Forbush-effect>, свободный. – Загл. с экрана.
266. Oxford Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095827794>, свободный. – Загл. с экрана.
267. СЗФ справочник МГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://alpha.sinp.msu.ru/spravka/forbush.htm>, свободный. – Загл. с экрана.