

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
РАДИОВОЛН ИМ. Н.В. ПУШКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

**Абунин Артём Анатольевич**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ  
И ИХ СВЯЗЬ С СОЛНЕЧНЫМИ, МЕЖПЛАНЕТНЫМИ И  
ГЕОМАГНИТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ**

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Белов А.В.

Москва – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Обзор современного состояния исследований Форбуш-эффектов.	
Средства и методы изучения вариаций галактических космических лучей .....	11
1.1. Современное состояние вопроса.....	11
1.2. Мировая сеть станций космических лучей .....	17
1.2.1. Сеть нейтронных мониторов.....	18
1.2.2. Мюонные телескопы.....	21
1.3. Метод глобальной съемки .....	22
1.3.1. Практическое использование метода глобальной съемки.....	28
1.4. Преимущества метода глобальной съемки перед использованием данных отдельных станций космических лучей .....	38
1.5. База данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений .....	45
1.6. Краткие выводы к главе 1 .....	48
Глава 2. Форбуш-эффекты и их связь с межпланетными и геомагнитными возмущениями .....	49
2.1. Основные характеристики Форбуш-эффектов.....	50
2.2. Классификация Форбуш-эффектов.....	55
2.3. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началами.....	60
2.3.1. Зависимость величины $A_F$ от внутренних параметров Форбуш-эффекта.....	68
2.3.2. Зависимость амплитуды Форбуш-эффекта от параметров возмущения межпланетной среды.....	70
2.3.3. Связь Форбуш-эффектов с геомагнитной активностью .....	72
2.4. Связь параметров Форбуш-эффектов с гелиодолготой нерекуррентных солнечных источников .....	74
2.5. Связь параметров корональных выбросов и амплитуды Форбуш-эффектов .....	77
2.5.1. Размер, масса и скорость корональных выбросов .....	79

2.5.2. Связь скорости межпланетных возмущений и величины Форбуш-эффекта.....	82
2.5.3. Связь величины Форбуш-эффекта с угловыми размерами коронального выброса .....	85
2.6. Краткие выводы к главе 2 .....	88
Глава 3. Изучение событий 19-го цикла солнечной активности по данным нейтронных мониторов.....	90
3.1. Используемые данные.....	90
3.2. Отличия 19-го цикла от последующих циклов солнечной активности ...	92
3.3. Форбуш-эффекты и геомагнитные бури 19-го цикла .....	93
3.4. Возможные объяснения дефицита Форбуш-эффектов в 19-м цикле солнечной активности .....	98
3.5. Краткие выводы к главе 3 .....	100
Глава 4. Основы ультрафиолетовой/магнитной диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и Форбуш-понижений .....	101
4.1. Методика и используемые данные .....	106
4.1.1. Рассматриваемые события .....	106
4.1.2. Анализируемые параметры .....	108
4.1.3. Таблица событий .....	113
4.2. Величина Форбуш-понижения как индикатор информативности эруптивного параметра $\Phi$ .....	116
4.3. Зависимость интенсивности геомагнитных бурь от эруптивного магнитного потока .....	119
4.4. Временные характеристики возмущений межпланетной среды .....	123
4.5. Апробация разработанной методики ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций .....	129
4.6. Основные результаты и выводы главы 4 .....	131
Заключение .....	134
Литература .....	136

## **Введение**

Форбуш-эффекты – это изменения плотности и анизотропии космических лучей в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра. Впервые они были отмечены как эффекты понижения интенсивности космических лучей, совпадающие с геомагнитными бурями, в 1937 году американским физиком Форбушем [89] и названы его именем. Существуют два основных типа возмущений солнечного ветра: спорадические и рекуррентные. К первым относятся корональные выбросы (CMEs – *coronal mass ejections*), которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака ICMEs; ко вторым – вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр. Оба этих типа могут вызвать отклик в вариациях космических лучей, однако механизм дополнительной модуляции при этом будет различным.

## **Актуальность**

Способность отражать крупномасштабные процессы, которые очень часто отдалены от места наблюдения, делает вариации галактических космических лучей уникальным инструментом для исследования солнечной активности и процессов, происходящих в гелиосфере. В частности, Форбуш-эффекты дают непосредственную информацию о возмущениях в межпланетной среде, поскольку их параметры тесно связаны с явлениями в солнечно-земной физике. Они выделяются среди других вариаций космических лучей величиной, частотой появления и многообразием. Причинами разнообразия является ряд факторов: влияние различных солнечных источников, а также их изменчивость и комбинация, слияние событий, взаимодействие распространяющегося возмущения с гелиосферным токовым слоем и т.д. Другими словами, в галактических космических лучах содержится информация об особенностях межпланетных возмущений. И одной из главных практических задач в солнечно-земной физике является умение правильно расшифровать эту информацию, что делает исследования Форбуш-эффектов актуальными и

практически важными для астрофизики космических лучей, физики солнечно-земных связей, геофизики и прогнозирования космической погоды.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является многостороннее изучение Форбуш-эффектов и выявление связей между различными параметрами этого эффекта и характеристиками солнечных, межпланетных и геомагнитных возмущений. В соответствии с целью работы решались следующие задачи:

1. Статистический сравнительный анализ Форбуш-эффектов с внезапным (совпадающим с внезапным началом геомагнитной бури – *SSC*) и постепенным (без *SSC*) началами.
2. Исследование зависимости величины Форбуш-эффекта от гелиодолготы солнечного источника.
3. Анализ событий 19-го цикла солнечной активности.
4. Изучение зависимости параметров Форбуш-понижений и геомагнитных бурь от суммарного магнитного потока диммингов и постэруптивных аркад продольного поля на уровне фотосферы.
5. Разработка основ методики ранней диагностики геоэффективности источников нерекуррентных Форбуш-понижений и геомагнитных бурь.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- Впервые, на основе статистического сравнительного анализа, выявлено, что возмущения, вызванные нерекуррентными солнечными источниками, эффективнее модулируют космические лучи и создают большие по амплитуде Форбуш-эффекты, чем возмущения, вызванные рекуррентными источниками при сходных параметрах солнечного ветра.
- Впервые найдена количественная зависимость амплитуды Форбуш-эффекта от гелиодолготы соответствующего источника. Показано, что эффекты от центральных солнечных источников межпланетных возмущений значительно глубже, чем от периферийных, а восточные источники, в целом, эффективнее

западных в понижении плотности космических лучей.

- Впервые выявлен дефицит очень больших (>15%) Форбуш-эффектов на фоне исключительно высокой солнечной и геомагнитной активности в 19-м солнечном цикле и предлагаются возможные объяснения этого дефицита.
- Впервые установлены зависимости интенсивности нерекуррентных Форбуш-понижений и геомагнитных бурь, а также времен запаздывания начала и пика этих возмущений относительно солнечных событий – от магнитного потока ультрафиолетовых диммингов и аркад в соответствующих источниках на Солнце.
- Разработаны основы принципиально новой методики ранней диагностики геоэффективности нерекуррентных источников Форбуш-понижений и геомагнитных бурь, где в качестве основного исходного параметра используется количественная характеристика соответствующей эрупции на Солнце, а не информация о скорости и форме СМЕ в картинной плоскости.

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

- I. Полученные зависимости параметров Форбуш-эффектов от характеристик солнечных, межпланетных и геомагнитных возмущений позволяют лучше понять физику процессов в гелиосфере, обусловленных солнечными источниками, служат для более детального изучения солнечно-земных связей, а также могут использоваться для построения моделей модуляции КЛ.
- II. Разработанные основы ультрафиолетовой / магнитной диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и Форбуш-понижений, дают новые возможности для улучшения прогнозов геоэффективности источников возмущений солнечного происхождения.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Усовершенствование и обновление базы данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде.

2. Установленные зависимости амплитуды Форбуш-эффекта от параметров межпланетных и геомагнитных возмущений в группах с внезапным (совпадающим с *SSC*) и постепенным (без *SSC*) началами.
3. Количественная зависимость величины Форбуш-эффекта от гелиодолготы соответствующего источника.
4. Выявленный в 19-м солнечном цикле дефицит очень больших Форбуш-эффектов на фоне исключительно высокой солнечной и геомагнитной активности, а также возможные объяснения этого дефицита.
5. Установленные зависимости величины нерекуррентных Форбуш-понижений и геомагнитных бурь, а также транзитных времен начала и пика возмущений от эруптивного магнитного потока.
6. Основы методики ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций.

### **Достоверность результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов в диссертации следует из статистического анализа большого количества событий. Созданная методика ранней диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и Форбуш-понижений, в качестве эксперимента, прошла апробацию в режиме реального времени в Центре прогнозов космической погоды ИЗМИРАН на десятках событий с положительным результатом.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Ее объем составляет 155 страниц. В диссертации содержится 59 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 205 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследования, аргументирована научная новизна, показана научно-практическая значимость и достоверность полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и их

апробация докладами на ряде конференций и публикациями, а также кратко излагается содержание работы.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния исследований Форбуш-эффектов. Освещаются основные инструменты и методы исследования вариаций галактических космических лучей.

Во **второй главе** рассматриваются Форбуш-эффекты и их связь с межпланетными и геомагнитными возмущениями. В разделе 2.1 даётся краткий обзор параметров, характеризующих явление. В разделе 2.2 представлена классификация эффектов. В разделе 2.3 проведен статистический сравнительный анализ большого количества событий с целью изучения связи различных характеристик Форбуш-эффектов между собой и с параметрами межпланетной среды. В разделе 2.4 анализируются события, обусловленные спорадическими солнечными источниками с различной гелиодолготой. Раздел 2.5 посвящен анализу связей между различными параметрами корональных выбросов (скоростей, угловых размеров, массы и т.д.) и величиной Форбуш-эффекта.

**Третья глава** посвящена изучению событий 19-го цикла солнечной активности, имеющего целый ряд отличий от других. Сопоставление событий в КЛ с солнечной и геомагнитной активностью показало, что количество и мощность магнитных бурь в 19-м цикле соответствует аномально высокому числу солнечных пятен. Однако в этом цикле существует определённый дефицит ФЭ с очень большими величинами ( $A_F > 15\%$ ). В главе анализируются возможные причины этого дефицита.

В **четвёртой главе** излагаются основы новой методики ранней диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и Форбуш-понижений. В качестве основного исходного параметра используется не информация о скорости и форме СМЕ в картинной плоскости,

а суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных аркад на уровне фотосферы.

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

### **Апробация работы**

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

- Десятая Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ), Приэльбрусье, учебно-научная база КБГУ, Россия, 18–25 октября 2009 г.;
- European Geosciences Union General Assembly (EGU 2010), Vienna, Austria, 2–7 May 2010;
- 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ), Москва, Россия, 5–9 июля 2010 г.;
- 22nd European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2010), Turku, Finland, 3–6 August, 2010;
- 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011), Beijing, China, 11–18 August, 2011;
- 7th Scientific Conference with international participation (SES 2011) «Space, Ecology, Safety», Sofia, Bulgaria, 29 November – 1 December, 2011;
- 7-я ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ, Москва, Россия, 6–10 февраля 2012 г.;
- IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ, Москва, Россия, 12–13 апреля 2012 г.;
- Научная конференция «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований», г. Троицк, ИЗМИРАН, Россия, 22–26 мая 2012 г.;
- 23rd European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2012), MSU, Moscow, Russia,

3–7 July, 2012;

- 32-я Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ), МГУ, Москва, Россия, 3–7 июля 2012 г.;
- XI Russian-Chinese conference on space weather Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 3–8 September 2012;
- Всероссийская конференция, посвященная 50-летию ИКФИА СО РАН «Космические лучи и гелиосфера», Якутск, Россия, 17–18 сентября 2012 г.;
- 8th Scientific Conference with international participation (SES 2012) «Space, Ecology, Safety», Sofia, Bulgaria, 4–6 December, 2012.

## **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, из которых 14 работ входят в список SCOPUS, 12 – в Web of Science, 7 – в реферируемых научных изданиях из списка ВАК.

## **Личный вклад автора**

Во всех исследованиях, изложенных в работе, автор принимал активное участие в постановке задач, решении методических вопросов, обработке и анализе данных, обсуждении, интерпретации полученных результатов и написании статей. Автор проделал большую работу по обработке и анализу экспериментальных данных мировой сети станций космических лучей. Абуниным А.А. лично разработаны основные пакеты программ необходимых для исследования.

Кроме научной работы, Абунин А.А. принимает деятельное участие в обеспечении работоспособности системы сбора и передачи данных на сервера с нейтронных мониторов ИЗМИРАН, а также в поддержке работы зеркала международной базы данных нейтронных мониторов (NMDB), установленного в ИЗМИРАН.

# **Глава 1. Обзор современного состояния исследований Форбуш-эффектов. Средства и методы изучения вариаций галактических космических лучей**

## **1.1. Современное состояние вопроса**

Модуляция галактических космических лучей (ГКЛ) происходит в результате их взаимодействия с неоднородностями магнитного поля в солнечном ветре. Таким образом, космические лучи (КЛ) несут в себе информацию о состоянии межпланетной среды, и если в ней имеются возмущения, то они будут отражены в вариациях КЛ. Влиянию межпланетных магнитных полей (ММП) подвержены частицы в широком энергетическом диапазоне: от десятков кэВ до сотен ГэВ. Эти частицы регистрируются спутниковой (низкие энергии) и наземной аппаратурой (с энергиями от единиц до сотен ГэВ), что делает КЛ серьезным инструментом для исследования магнитных неоднородностей в возмущениях солнечного ветра. На Земле такие возмущения могут проявляться в виде геомагнитных бурь (ГМБ) и Форбуш-эффектов (ФЭ) в КЛ, которые были открыты в 1937 году [89], а также были отмечены в работе Гесса и Деммельмаейра [105]. Результаты по исследованию Форбуш-понижений (ФП) освещались во многих публикациях, и этому вопросу уделено много внимания, к примеру, в книгах Дормана Л.И. [78,80], а также в работах других авторов (см., напр., [1,2,4,8,30,44,61,65,108,112,114,128,147,148,158-160]).

Хотя ФП были открыты в самом начале регулярных наблюдений КЛ и изучаются уже более 70 лет, до сих пор для них нет общепринятого определения. Более того, в ряде работ (см., напр., [52,53,162,191]) используется термин «Форбуш-эффект» в качестве описания данного явления. Как выяснилось, Форбуш-эффект – это гелиосферное явление, включающее в себя не только понижение, но и восстановление интенсивности КЛ, и небольшие изменения плотности и анизотропии КЛ перед началом спада, так называемые «предвестники» ФП [43,90,146,183], которые также характеризуют явление в

целом. На данный момент термины «Форбуш-эффект» и «Форбуш-понижение» являются эквивалентными и оба используются как российскими, так и зарубежными авторами.

Казалось, что запуск космических аппаратов и изучение ФП вне планетарной магнитосферы, создание новых инструментов исследования КЛ, разработка различных теорий и моделей позволят всесторонне изучить данные эффекты. Тем не менее, нет еще достаточно полных ответов на многие вопросы, касающиеся величины эффекта, их разнообразия, взаимосвязи с параметрами солнечного ветра, различными индексами, описывающими геомагнитную активность, и пр. (см., напр., [8,53,113,129]).

Долгое время под ФЭ понимали понижение интенсивности КЛ во время магнитных бурь ([78] и ссылки в нем). Однако ФП также наблюдались далеко от Земли и магнитосфер других планет [87,88], и даже на Земле они не всегда сопровождаются ГМБ. В работе Белова и др. [8] представлено, на данный момент, наиболее полное определение ФЭ: «Форбуш-эффекты – это изменения плотности и анизотропии космических лучей в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра. Эффект может наблюдаться как в галактических, так и в солнечных космических лучах».

Первоначально ФЭ были обнаружены при помощи ионизационных камер. Позже, на основе данных нейтронных мониторов (НМ), было показано, что за их происхождение отвечают возмущения межпланетной среды [172]. Существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные [2,53,65,128,159]. Первые обусловлены корональными выбросами (СМЕs – coronal mass ejections), которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака ICMEs (см., напр., [56,97]); вторые – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр, вращающихся вместе с Солнцем. Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик как в магнитосфере и ионосфере Земли, так и в вариациях КЛ. Однако механизм дополнительной модуляции ГКЛ в

данных типах возмущений солнечного ветра будет различен [48,128,150]. Различаются и характеристики ФЭ двух типов [1,2]. Но получение количественных данных о различиях этих характеристик затруднительно, поскольку далеко не всегда известно, что является источником конкретного события, и к какому типу оно относится. Более того, многие события имеют смешанную природу, и в их создании участвуют и ICMEs, и корональные дыры [16]. Влияние различных типов возмущений межпланетной среды на модуляцию КЛ исследовалось в ряде работ. В части из них исследовалось большое число событий [2,8,60,64,71,155]. В работах [35,36,108,175] использовался метод наложения эпох.

В ряде работ (см., напр., [65,157]) показано, что ICMEs вызывают большие и асимметричные эффекты, которые характеризуются резким и глубоким понижением интенсивности КЛ, в то время как корональные дыры являются причиной более мелких ФП с более симметричным и плавным профилем. В работах [35,175] отмечается, что более глубокий эффект наблюдается, когда ударная волна сформирована в переднем крае возмущения, распространяющегося в сторону Земли, производя тем самым двухступенчатое понижение (так называемый «классический Форбуш-эффект») [37,38,61,64, 65,160, 164,193]. Впервые такой профиль ФЭ был отмечен в работах [37,38] на основе пяти событий в период с 1966 по 1972 гг. Автор предположил, что двухступенчатый профиль получается в результате модуляции ГКЛ как ударной волной, так и оболочкой выброса. В этой модели ударная волна создает первую ступень понижения в эффекте, а вторая ступень возникает за тангенциальным разрывом в главной части возмущения. Следующим большим вкладом в изучение двухступенчатой структуры ФП является работа Сандерсона [164], в которой было проанализировано уже 19 событий, связанных с магнитными облаками. Выбирались события, которым на орбите Земли соответствовали ФП с амплитудами более 2%. В каждом случае были измерены временные интервалы между приходом ударной волны и минимумом

понижения интенсивности ГКЛ на первой ступени, а также между приходом магнитного облака и минимумом КЛ во второй ступени. Авторы пришли к выводу, что и оболочка магнитного облака, и ударная волна создают трудно проходимый барьер для космических лучей. Но следует отметить, что в данном исследовании авторы использовали данные только одного НМ.

Несколько лет спустя в работе Кэйн [62] был сделан вывод, что и турбулентная область в оболочке выброса, и расширяющееся магнитное облако могут вызвать понижение в галактических КЛ. Эти исследования были сделаны на основе данных приборов, находящихся на Земле и в космосе, а их цель заключалась в определении различий между эффектами от ударных волн и магнитных облаков. В дальнейшем это исследование продолжилось в последующих статьях (см., напр., [64]). В них авторы разделили все ФП на четыре класса, основываясь на характеристиках межпланетной среды, а не на данных о профиле ФП. К первому классу отнесены события, в которых присутствует и ударная волна, и ICME (см. рис. 1.1 врезка А). Ко второму классу относятся события только с наличием ударной волны (см. рис. 1.1, вставка В), к третьему – с ICME и слабой ударной волной и, наконец, к четвертому – смешанные события, где наблюдаются несколько источников межпланетного возмущения. Позже появились более полные обзоры, касающиеся двухступенчатой структуры ФП [65,193].

На основе последующей работы Кэйн [66] был создан «современный» каталог межпланетных корональных выбросов [159], который включает в себя уже более 300 ICMEs, достигших Земли в 23 цикле солнечной активности. В данном каталоге отмечены основные параметры выбросов, такие как: максимальная скорость, величина напряженности ММП, наличие магнитного облака в выбросе и т.д. В следующих работах этих же авторов сопоставлены параметры данных выбросов солнечной плазмы с соответствующими откликами в галактических космических лучах [160], а также с соответствующими индексами геомагнитной активности [161].

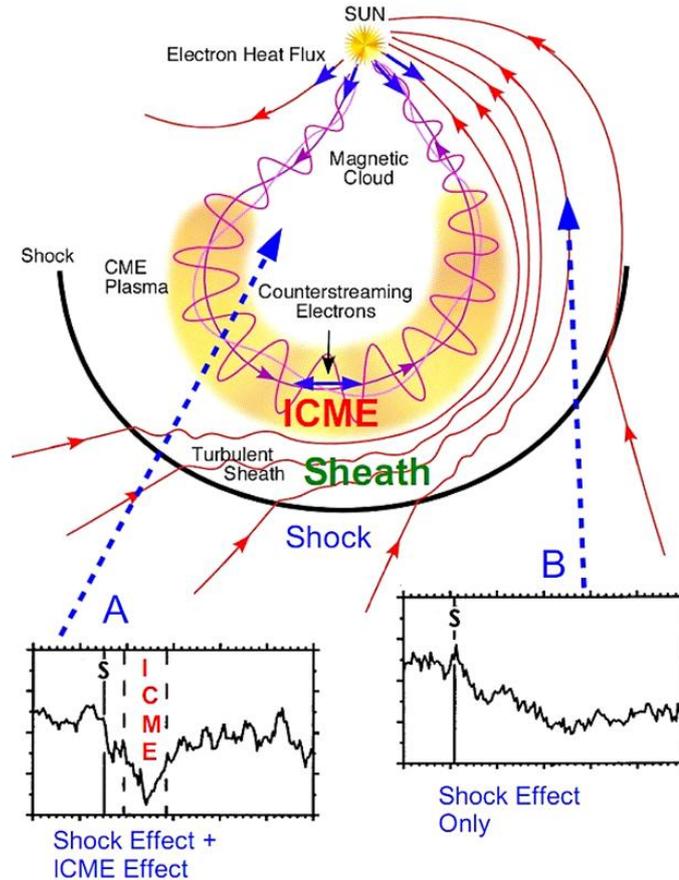


Рис. 1.1. Схематическое изображение ICME и ударной волны, и связанные с ними вариации галактических космических лучей.

В работе [199] в центре внимания также находится двухступенчатая структура ФЭ. Здесь авторы обсуждают не только характерный профиль ФП от коронального выброса, но и пытаются описать внутреннюю структуру и геометрию ICMEs.

Кроме величины, характеристикой ФЭ является также временной профиль понижения интенсивности КЛ. В ряде работ была описана его связь как со скоростью потока из корональных дыр [108], так и со скоростью распространения ICME [35,151].

Однако, множество работ по ФЭ до сих пор не обеспечивают четкого и глубокого понимания данного явления. Более того, результаты исследований часто являются противоречивыми. Одним из примеров таких противоречий является зависимость величины ФП от различных параметров

высокоскоростного потока из корональных дыр. В работе Ричардсона [155] отмечается, что скорость потока может быть взята в качестве наиболее важного параметра, который хорошо согласуется с диффузионно-конвективной моделью. В работе [60] на основе статистического анализа была обнаружена высокая корреляция между величиной ФЭ и напряженностью ММП, которая выступает в пользу диффузионно-дрейфовой модели, предложенной в работе [121]. Аналогичные разногласия могут быть обнаружены при исследовании связи амплитуды ФЭ и параметров ICME. Например, в работе [64] отмечается, что скорость коронального выброса является плохим параметром для оценки величины ФЭ, в то время как Чилингарян и др. [71] обнаружили сильную корреляцию между данными параметрами. Причиной такого разногласия, по-видимому, является то, что авторами рассматривались различные выборки событий.

Еще одним предметом обсуждений является наличие магнитных облаков в возмущениях межпланетной среды и их влияние на величину ФЭ. С одной стороны, основываясь на данных космических аппаратов *WIND* и *IMP-8*, в работе [153] авторы делают вывод, что магнитные облака не участвуют в формировании ФП. С другой стороны, ряд авторов (см., напр., [131,202]) пришли к выводу, что магнитные облака слабо, но влияют на интенсивность КЛ. И с третьей стороны, в работах [35,164] был сделан вывод, что магнитные облака могут дать большой вклад в величину ФП. Как оказалось позже, основные причины такого разногласия основывались на использовании данных одного НМ для определения поведения интенсивности КЛ в конкретных событиях. Такие данные не могут объективно показывать реальную картину возмущения.

Для многостороннего изучения ФЭ и их связи с солнечной и геомагнитной активностью в ИЗМИРАН создана база транзиентных явлений в КЛ и межпланетной среде, которая непрерывно пополняется данными о новых событиях (см. раздел 1.6). На основе этих данных в настоящей работе

исследуются зависимости величины ФП от различных характеристик – как внутренних (параметры самих ФЭ), так и внешних (параметры межпланетной среды).

## 1.2. Мировая сеть станций космических лучей

Мировая сеть станций КЛ включает в себя ряд различных детекторов: 45 нейтронных мониторов (в основном супермониторы *NM64*), две ионизационные камеры и 7 многонаправленных мюонных телескопов, которые фактически позволяют проводить измерения мюонной компоненты по 50 независимым направлениям. Распределение станций КЛ по земному шару представлено на рис. 1.2.

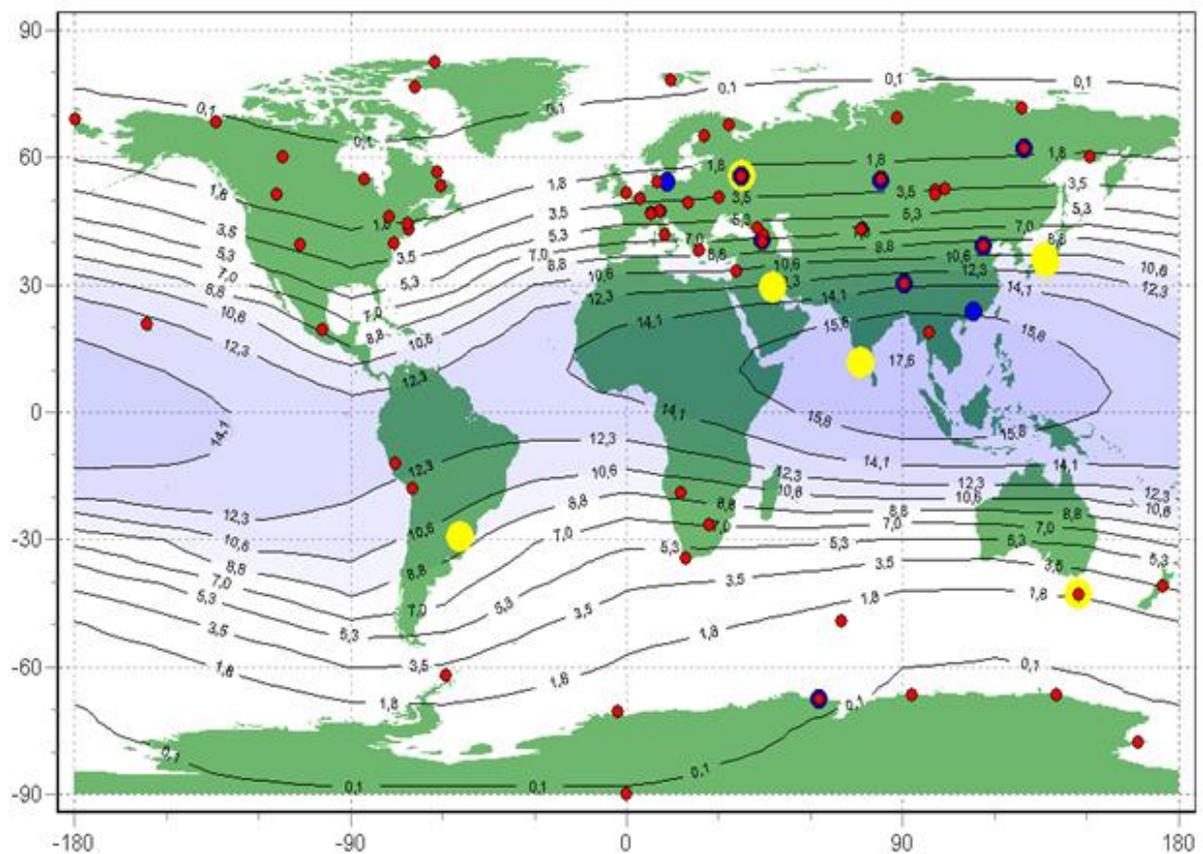


Рис. 1.2. Мировая сеть станций космических лучей: нейтронные мониторы (●), мюонные супертелескопы или годоскопы (●), мюонные телескопы (●).

По данным сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов современные методы позволяют определить, например, радиальный и поперечный градиенты КЛ. Это очень важные параметры, характеризующие модуляционные процессы в гелиосфере до жесткостей вплоть до 200 ГВ [54].

### 1.2.1. Сеть нейтронных мониторов

С начала проведения непрерывных измерений интенсивности КЛ на поверхности Земли и до сих пор нейтронные мониторы остаются единственным стабильным и стандартным инструментом, способным обеспечивать непрерывный мониторинг ГКЛ с минутным и часовым разрешением. После введения Симпсоном в 1948 г. прибора для регистрации нейтронной компоненты КЛ [171,174] началось размещение этих детекторов во многих пунктах земного шара, а в период МГГ (*IGY*, 1957 г.) уже около 60 станций было оснащено стандартными НМ модели *IGY*. В 1964 г. Кармайкл и др. [103] создали новый вариант нейтронного монитора на больших счетчиках *CHM-15*, что обеспечивало гораздо лучшую статистику измерений. С этого момента началось переоснащение старых станций и создание новых на основе супермониторов *NM64*. На рис. 1.3 представлена динамика числа НМ разных типов за полувековой период наблюдений КЛ (1950-2001 гг.).

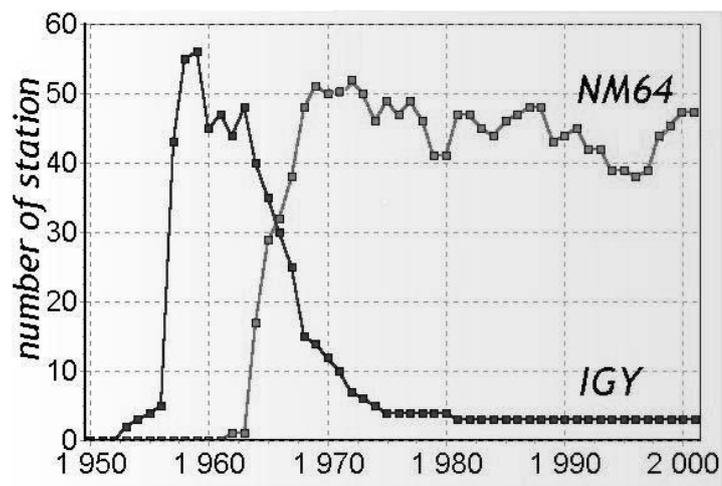


Рис. 1.3. Динамика числа нейтронных мониторов различных типов за период с 1950 по 2001 гг.

Несмотря на свою достаточно долгую историю, НМ остаются одним из основных инструментов для измерения КЛ с энергией от 400 МэВ до сотен ГэВ. Эта область энергий продолжает и дополняет измерения КЛ в космическом пространстве. Благодаря хорошей статистической точности НМ способны измерять даже слабую анизотропию и другие характеристики, связанные с солнечными или галактическими КЛ. На сегодняшний день вся наиболее надежная информация об анизотропии КЛ получена по измерениям наземных детекторов. Оценку вариаций потока космического излучения за пределами магнитосферы по данным наземных измерений скорости счета  $N(R_c, h, t)$  можно выполнить на основе известного выражения

$$N(R_c, h, t) = \int_{R_c}^{\infty} \sum_{i=p, \alpha, Z} S_i(R, h) \cdot J_i(R, t) dR \quad (1.2.1)$$

Здесь  $J_i(R, t)$  – дифференциальный спектр жесткости частиц типа  $i$  первичного космического излучения;  $S_i(R, h)$  – функция выхода НМ в пункте с жесткостью геомагнитного обреза  $R_c$ , расположенного на глубине  $h$  в атмосфере. Функция выхода НМ определяется как плотностью потока частиц, падающих на монитор, так и эффективностью, с которой этот поток регистрируется детектором и для функции выхода можно записать:

$$S_i(R, h) = S_{NM} \sum_{j=n, p, \pm\pi, \pm\mu} \dots \iint \varepsilon_j(E, \Omega) \cdot m_{ij}(R, h, E, \Omega) dE d\Omega. \quad (1.2.2)$$

Здесь  $S_{NM}$  – площадь НМ,  $\varepsilon_j(E, \Omega)$  – эффективность регистрации частиц с энергией  $E$ , падающих на НМ под углом  $\theta$  к вертикали и азимутальным углом  $\varphi$ . Функция  $m_{ij}(R, h, E, \Omega)$  – это интегральная кратность генерации, т.е. число частиц типа  $j$  на уровне наблюдения  $h$  (или дифференциальная плотность потока падающих вторичных частиц). Эффективность регистрации нейтронных детекторов различной геометрии вычислялась в ряде работ (см., напр., [21, 23, 31, 72, 106, 149]). В работе [170] приведен единственный экспериментальный результат, полученный в ходе облучения нейтронного монитора *NM64* потоком нейтронов от 100 до 400 МэВ на ускорителе.

Каждый отдельный НМ регистрирует КЛ из ограниченной области небесной сферы. Эта область определяется временем наблюдения, географическим местоположением и угловыми характеристиками, обусловленными магнитосферой Земли. Фактически, из-за суточного вращения Земли, условия наблюдения изменяются с периодом 24 часа и каждый детектор раз в сутки направлен на источник анизотропии КЛ при условии его стационарности, что создает наблюдаемую наземными детекторами суточную вариацию КЛ. Детекторы распределены по земному шару (мировая сеть станций КЛ) таким образом, что перекрывают небесную сферу и обеспечивают ее полное сканирование при приеме проходящих потоков КЛ.

Поскольку ларморовский радиус регистрируемых частиц намного больше радиуса Земли, то всю сеть наземных детекторов можно рассматривать как единый многонаправленный прибор. Полученная информация о КЛ способна давать «глобальную» (т.е. по всем направлениям) картину явлений, происходящих в межпланетной среде, в объеме, определяемом ларморовским радиусом регистрируемых частиц, с направлением на источник анизотропии, фиксируемым в каждый интервал регистрации. Следует отметить, что многоканальность такого прибора, где в качестве одного канала выступает один детектор, обеспечивает надежность и непрерывность измерений. Главным различием между такими детекторами является место их расположения. Для измерения анизотропии, связанной с транзиентными событиями в КЛ, такими как возрастания солнечных космических частиц и ФП, незаменимой является сеть высокоширотных НМ. Высокие широты уникальны в смысле однородного энергетического отклика и хорошо определенных направлений прихода солнечных частиц. "Угловое разрешение" некоторых высокоширотных мониторов, как правило, меньше  $50^\circ$ , что значительно превышает угловое разрешение современных детекторов частиц на борту спутников. У средне- и низкоширотных станций эта направленность гораздо хуже и достигает  $200^\circ$ – $300^\circ$  (для солнечных КЛ). Несмотря на то, что такие станции имеют другие

свойства, полностью мотивирующие их непрерывную работу, они не подходят для точных измерений анизотропии солнечных космических частиц. Чтобы использовать преимущество высокоширотных НМ для исследования солнечных событий, а также ФЭ, необходимо наземные детекторы на высоких широтах разместить таким образом, чтобы они надежно и равномерно перекрывали всю небесную сферу по асимптотическим направлениям. Выделенная таким образом часть сети названа «Космический корабль Земля» [55,142].

В настоящее время идет интенсивная работа по модернизации сети в соответствии с требованиями сегодняшнего дня. К таким требованиям можно отнести: 1-минутное разрешение, регистрацию скорости счета каждого канала НМ; публикацию данных наблюдений в реальном времени и доступ к базе данных на основе сетевой модели клиент/сервер по протоколу *HTTP*, т.е. включение ее в распределенную базу данных и т.д.

На данный момент сеть НМ насчитывает около 45 непрерывно действующих станций (из которых 13 принадлежат России), способных представлять данные в открытом доступе. Кроме того, с 2010 г начала работать в реальном времени база данных нейтронных мониторов с высоким разрешением – *NMDB*<sup>1</sup> ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)), собирающая данные с >20 НМ, число которых постепенно возрастает.

### 1.2.2. Мюонные телескопы

Сейчас можно утверждать, что исследования, экспериментально базирующиеся на данных сети мюонных телескопов, вступили в новую фазу [83,143]. Мюонные телескопы обладают двумя очевидными преимуществами перед НМ, если говорить о задачах космической погоды. Во-первых, они регистрируют частицы более высоких энергий с большими гирорадиусами и поэтому могут раньше НМ почувствовать приближающееся возмущение. Во-вторых, уже один мюонный телескоп может дать информацию об анизотропии

---

<sup>1</sup> Neutron Monitor Database

КЛ. Пока данные мюонных телескопов используются незаслуженно редко, но можно предсказать, что с ростом интереса к космической погоде возрастет интерес и к данным мюонных телескопов. Сейчас имеются планы для более эффективного их использования для диагностики и прогнозирования электромагнитного состояния межпланетной среды, совместно с данными НМ.

Наблюдения мюонной компоненты существенно дополняют данные нейтронной компоненты благодаря некоторым различиям в технике наблюдений. Первое различие – это разные энергетические диапазоны первичных энергий, к которым чувствительны мюонный телескоп и НМ. Энергетический диапазон НМ простирается от нижних энергий около 0.5 ГэВ, и до энергий примерно 100 ГэВ. Наземные мюонные телескопы чувствительны к первичным энергиям от 10 и до нескольких сотен ГэВ, а для подземных мюонных телескопов эта область может простираться и до 1000 ГэВ и более. Для частиц нижней части энергетического диапазона мюонного телескопа и частиц, регистрируемых НМ, модуляционные процессы подобны, но с увеличением энергии роль солнечных модуляционных процессов уменьшается, уступая место эффектам галактическим. Другая особенность связана с тем, что регистрация в режиме совпадения позволяет организовать сбор данных одновременно из многих выделенных направлений, и мы имеем фактически набор элементарных телескопов в одной установке. К трудностям же использования данных телескопов относится существенный температурный эффект, для учета которого необходимо знать распределение температуры в атмосфере. И это одна из причин, почему с появлением НМ мюонные наблюдения были незаслуженно вытеснены на второй план.

### **1.3. Метод глобальной съемки**

Мировая сеть станций КЛ регистрирует вариации вторичных частиц, образующихся в атмосфере Земли при взаимодействии с ней падающего первичного космического излучения. В общем виде вариации скорости счета НМ можно записать так:

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{BH} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{AT} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{MAG} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{AP} + \varepsilon, \quad (1.3.1)$$

где  $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{BH}$  – вариации внеземного происхождения, зависящие от солнечной активности и процессов, происходящих в межпланетной среде;  $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{AT}$  – атмосферные вариации, связанные с взаимодействием КЛ с веществом атмосферы над детектором;  $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{MAG}$  – вариации КЛ магнитосферного происхождения, обусловленные состоянием земной магнитосферы в период измерения;  $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{AP}$  – вариации аппаратного происхождения;  $\varepsilon$  – случайная часть вариации. Именно вариации внеземного происхождения представляют основной интерес при исследовании солнечно-земных связей, но для их надежного выделения из данных регистрации вторичной компоненты КЛ нужно уметь учитывать вариации атмосферного и магнитосферного происхождения.

Необходимость иметь глобальные параметры КЛ, независимые от положения точки наблюдения на Земле, привела к созданию особых методов, которые используют данные с как можно большего числа станций, распределенных по земному шару. Одна из самых первых и самых успешных реализаций такого метода была создана в Якутске [17-20,33] и получила название метода глобальной съемки – *GSM (Global Survey Method)*. Примерно в то же время свою методику предложили японские исследователи [144]. Немного позже, в 70-х годах, модификация этого метода была разработана в ИЗМИРАН [40,41] и применена для обработки нескольких событий в октябре 1969 г. Группа Иркутских исследователей разработала свою версию – глобально-спектрографический метод [24,81,82], который стал самым сложным и многоцелевым из существующих в мире методов обработки данных нейтронных мониторов, с последующим включением определения вариаций

планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания и вычисления второй гармоники анизотропии КЛ [9,22,156].

В сущности, во всех вариантах – это метод сферического анализа, где используется разложение вариации КЛ по сферическим гармоникам. Если бы сеть наблюдательных станций была расположена не на поверхности Земли, а за пределами атмосферы и магнитосферы, то задача сводилась бы просто к сферическому анализу.

Фактически, *GSM* является объединением трех методов: метода функций связи, траекторных расчетов частиц в магнитном поле и метода сферического анализа. Определение функций связи осуществляет переход от вариаций КЛ в точке наблюдения (скорости счета НМ) к ожидаемым вариациям на границе атмосферы, т.е. позволяет учесть взаимодействие первичных и вторичных частиц различных энергий с веществом атмосферы [10,12,13,15,72]. Второй составляющей является метод траекторных расчетов частиц в магнитном поле Земли. Земная магнитосфера отклоняет проходящие частицы различных энергий от первоначального направления их движения (асимптотического) в околоземном космическом пространстве и действует как своего рода спектрометр. Возмущения магнитного поля Земли могут приводить к существенному изменению траекторий заряженных частиц в магнитосфере, вплоть до того, что разрешенные в спокойной магнитосфере траектории частиц могут стать запрещенными [14]. Вследствие изменения магнитного поля Земли изменяются, во-первых, эффективные пороги обрезания; во-вторых, эффективные асимптотические направления для станций. Траекторные расчеты для частиц различных энергий, проходящих в различные точки земного шара, выполненные для всех станций мировой сети [137,138,167], позволяют учесть влияние магнитосферы на первичные КЛ через приемные коэффициенты, куда включен также учет влияния атмосферы. Метод расчета таких коэффициентов и сами коэффициенты приведены в работах [33,42,123,145,198]. Использование этих коэффициентов делает возможным переход от наблюдаемых вариаций

вторичной компоненты КЛ (скорость счета детектора) к вариациям внеземного происхождения, отражающим влияние структуры и динамики гелиосферы.

Третьей частью метода глобальной съемки является метод сферического анализа (см., напр., [6,17-19,29,144]), который позволяет выделить значимые для конкретной задачи сферические гармоники для дальнейшего анализа. Кроме того, этот метод позволяет выделить и исследовать изотропную и анизотропную вариации интенсивности КЛ за пределами магнитосферы в произвольные временные интервалы, благодаря чему становится возможным исследовать разнообразные возмущения солнечного ветра, характерные времена и масштабы которых иногда настолько малы, что метод солнечно-суточных вариаций мало помогает при их изучении [6].

Рассмотрим подробнее суть метода. Интенсивность КЛ, как и любая функция, может быть представлена разложением по сферическим гармоникам (см., напр., [198]).

$$J(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [a_n^m \cos m\varphi + b_n^m \sin m\varphi] P_n^m(\sin \theta) \quad (1.3.2)$$

где  $P_n^m$  – присоединенные функции Лежандра, а  $\theta$  и  $\varphi$  – широтный и азимутальный асимптотические углы в выбранной системе координат (в частности, это может быть географическая система),  $n$  – это номер гармоники, а  $m$  – номер составляющей для выбранной гармоники.

После введения в первичные данные поправок на локальные эффекты наземную вариацию скорости счета нейтронной компоненты (1.3.1) на  $i$ -ой станции можно записать в виде суммы нулевой, первой и второй гармоник:

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^i = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_0^i + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_1^i + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_2^i + \sigma_i, \quad (1.3.3)$$

Остаточная вариация  $\sigma_i$  включает в себя, кроме случайных статистических и аппаратных отклонений, различные погрешности, связанные с методикой обработки данных, недоучтенные метеорологические и магнитосферные вариации, а также отклонения, обусловленные

несовершенством используемой модели [6]. В свою очередь, вариация скорости счета для  $i$ -ой станции может быть записана через приемные коэффициенты как:

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^i = \sum_{n=0}^{\infty} V_k^i(\beta_k) a_k \quad (1.3.4)$$

Здесь  $a_k$  – это амплитуда соответствующей составляющей вариации КЛ при фиксированной жесткости  $R_0$ , а  $V_k^i$  – приемные коэффициенты  $k$ -ой составляющей на  $i$ -ой станции, которые можно описать следующим выражением:

$$V_k^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, \beta) W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}, \quad (1.3.5)$$

где  $\lambda$  и  $\psi$  – зенитный и азимутальный углы прихода частиц в локальной системе координат;  $W(R)$  – коэффициенты связи прибора;  $N(\lambda, \psi)$  – диаграмма направленности прибора (т.е. чувствительность прибора к частицам, падающим на него под различными углами). В зависимости от того, сколько гармоник нам необходимо, будет меняться число приемных коэффициентов для каждой станции. Например, для нулевой гармоники (изотропные вариации) необходим один приемный коэффициент ( $k = 0$ ), для первой (северо-южная и солнечно-суточная вариации) – три приемных коэффициента ( $k = 1-3$ ), а для второй гармоники – уже 5 приемных коэффициентов для каждой станции [6].  $n$  – это номер гармоники, а  $k$  – номер составляющей в гармоническом разложении. Различным  $k$  соответствуют различные подынтегральные угловые функции  $F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R))$ , определяющие долю частиц, приходящих в данную точку под определенным углом  $(\lambda, \psi)$  из возможных асимптотических направлений  $F_k(\theta_i, \varphi_i)$ .

$$F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R)) = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ \sin \theta & k = 1 \\ \cos \theta \cos \varphi & k = 2 \\ \cos \theta \sin \theta & k = 3 \\ \frac{3}{2} \sin^2 \theta - \frac{1}{2} & k = 4 \\ \sqrt{3} \cos \theta \sin \theta \sin \varphi & k = 5 \\ \sqrt{3} \cos \theta \sin \theta \cos \varphi & k = 6 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos^2 \theta \sin 2\varphi & k = 7 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos^2 \theta \cos 2\varphi & k = 8 \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (1.3.6)$$

Для расчета приемных коэффициентов необходимо также определить вид спектральной функции  $f_n(R, \beta)$ . Один из вариантов использования такой функции рассматривался в работе [42]. При выборе вида спектра искомая функция должна выполнять ряд условий. Во-первых, она должна зависеть только от одного параметра. Во-вторых, однопараметрическое семейство должно объединять максимально разнообразные по форме функции (как растущие, так и убывающие с ростом жесткости). В-третьих, спектральная функция должна быть ограниченной и гладкой, а также стремиться к нулю при увеличении жесткости. В-четвертых, при максимальных и минимальных параметрах вид функции должен быть одним и тем же. Удовлетворить всем этим требованиям удалось только с помощью довольно сложной функции следующего вида:

$$f_n(R, \beta) = \begin{cases} f_1(R, \beta) f_2(R, \beta) R^\beta & \beta > 0 \\ f_1(R, \beta) R^\beta & \beta \leq 0 \end{cases} \quad (1.3.7)$$

где функции  $f_1(R, \beta)$  и  $f_2(R, \beta)$  имеют вид:

$$f_1(R, \beta) = \exp \left[ -\frac{R}{R_1} - \left( \frac{\beta}{R} \right)^2 \right] \quad (1.3.8)$$

$$f_2(R, \beta) = \exp \left[ -\beta \ln R(1 - (2 - \beta)) \frac{100}{100 + R^\beta} \right] \quad (1.3.9)$$

С помощью этих функций различные формы спектра (возрастающие и спадающие в области эффективных жесткостей для нейтронного монитора) получаются варьированием единственного параметра  $\beta$  в пределах от  $-2$  до  $+2$ . Самым мягким из определенных таким образом спектров является спектр с  $\beta = \pm 2$ , а самым жестким – спектр с  $\beta = 0.8$ .

Чтобы получить оптимальный набор параметров  $a_k$  и  $\beta_k$ , определяющих вариации первичных КЛ, обычно используется метод наименьших квадратов, минимизирующий следующее выражение, взятое для каждой из  $n$  станций:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \left[ \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_i - \sum_{k=0}^{m-2} a_k V_k^i(\beta) \right]^2}{n - m} = \min, \quad (1.3.10)$$

где  $m$  – число неизвестных параметров модели ( $m=5$ , если ограничиться нулевой и первой гармониками), а  $n$  – число используемых станций.

### 1.3.1. Практическое использование метода глобальной съемки

Почти для всех модуляционных эффектов достаточно использовать три первые гармоники (нулевую, первую и вторую), а для широкого круга задач достаточно и первых двух. Можно записать вариацию  $\delta$  скорости счета наземного детектора как сумму вариаций, обусловленных изменениями плотности КЛ, северо-южной и солнечно-суточной составляющих первой гармоники анизотропии, а также изменениями второй зональной, асимметричной суточной и полусуточной составляющих второй гармоники:

$$\delta = \delta_0^0 + \delta_1^0 + \delta_1^1 + \delta_2^0 + \delta_2^1 + \delta_2^2 = c_0^0 a_0^0 + c_1^0 a_1^0 + c_1^1 a_1^1 \cos(\varphi + \varphi_1^1 - \chi_1^1) + c_2^0 a_2^0 + c_2^1 a_2^1 \cos(\varphi + \varphi_2^1 - \chi_2^1) + c_2^2 a_2^2 \cos(2\varphi + 2\varphi_2^2 - 2\chi_2^2), \quad (1.3.11)$$

где  $a_0^0$  – амплитуда изотропной вариации первичных КЛ,  $a_1^0$  и  $a_1^1$  – амплитуды северо-южной и солнечно-суточной составляющих анизотропии,  $a_2^0$ ,  $a_2^1$  и  $a_2^2$  – амплитуды второй зональной, асимметричной суточной и полусуточной

составляющих;  $\varphi + \varphi_m^k$  – эффективная долгота станции для регистрации различных составляющих анизотропии, складывающаяся из географической долготы и эффективного сдвига обусловленного магнитосферой;  $c_m^k$  ( $m=0,1,\dots,k$ , при  $k \leq m$ ) – это приемные коэффициенты [20,138,144] данного детектора  $i$  для соответствующих компонент вариации. Величины  $c_m^k$  определяются положением станции (широтой, жесткостью геомагнитного обрезания, массой столба воздуха над детектором), жесткостным спектром первичных КЛ и особенностями детектора. Анализ приемных коэффициентов помогает понять роль той или иной станции в регистрации различных составляющих вариаций и в определении характеристик этих составляющих. Обычно мы используем приемные коэффициенты, рассчитанные Ясое и др. [198] для минимума и максимума солнечной активности, а в тех случаях, когда эти данные отсутствуют, свои собственные расчеты и интерполяции.

Ограничиваясь нулевой и первой гармоникой (изотропная часть и три составляющие первой гармоники анизотропии), ожидаемые на Земле вариации КЛ можно записать как систему из уравнений для каждого пункта  $i$  на высоте  $h$  с жесткостью геомагнитного обрезания  $R_c$ , в момент времени  $t$ :

$$\frac{\delta J^i}{J^i} = aC_0^i(\gamma) + (C_x^i A_x + C_y^i A_y + C_z^i A_z) + \delta_{err}^i \quad (1.3.12)$$

Здесь  $aC_0^i(\gamma)$  – вклад нулевой гармоники в вариации КЛ (изотропная часть):  $aR^{-\gamma}$  – спектр вариаций КЛ, с помощью которого учитывается зависимость приемного коэффициента от  $\gamma$  (см. формулу 1.3.13),  $a$  – амплитуда нулевой гармоники вариаций КЛ,  $\gamma$  – показатель спектра вариаций (см. формулу 1.3.13);  $A_x, A_y, A_z$  – три компоненты первой гармоники анизотропии КЛ в декартовой системе координат,  $C_0^i(\gamma), C_x^i, C_y^i, C_z^i$  соответственно приемные коэффициенты для каждой компоненты [34].

Система уравнений (1.3.12) решается методом минимизации суммы квадратов невязок относительно неизвестных параметров, характеризующих

зависимость спектра вариаций интенсивности первичных КЛ  $a$  и  $\gamma$ , а также составляющих вектора анизотропии  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ . Эти параметры определяются в географической системе координат, связанной с нулевым меридианом. Для перехода в систему координат, связанную с Солнцем, необходимо выполнить поворот на угол  $\varphi_h = 2\pi/24(hour + 1/2)$  [163]. Приемные коэффициенты нулевой гармоники

$$C_0^i(\gamma) = \int_{R_c}^{R_u} R^{-\gamma} W^i(R_c, h, R) dR, \quad (1.3.13)$$

где  $W^i(R_c, h, R)$  функция связи первичных и вторичных вариаций для прибора типа  $i$ , расположенного на уровне  $h^i$  в пункте с жесткостью геомагнитного обрезания  $R_c$ , рассчитываются сравнительно просто.

Вычисление приемных коэффициентов первой и более высоких гармоник очень трудоемко, поскольку необходимо учесть не только взаимодействие КЛ с атмосферой Земли (привлекая функции связи  $W^i(R_c, h, R)$ ), но и влияние на космические лучи магнитосферы Земли, используя направления движения КЛ различных энергий за пределами магнитосферы (асимптотику). В работе [198] представлены таблицы приемных коэффициентов для большого набора станций, посчитанных для различных показателей спектра  $\gamma \in (-1.5, -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0)$  и значений верхнего порога энергии  $R_u$ , выше которой анизотропия исчезает (30, 50, 100, 200, 500, 1000 ГВ). Все эти коэффициенты занесены в базу рабочей программы *GSM* и используются при обращении к различным станциям во время счета. Часть приемных коэффициентов для станции Москва (55.47N, 37.32E,  $h = 200$  м,  $H_o = 1000$  мбар) при  $\gamma = -1.5$  и  $\gamma = 0.0$  приведена в таблице 1.1 в качестве примера. Приемные коэффициенты для всех станций сети можно получить по адресу <ftp://cr0.izmiran.ru/GSM/CCn>.

Здесь  $C_{00}$  – приемный коэффициент для изотропной составляющей КЛ,  $C_{10}$  – для северо-южной компоненты, а  $A_{11}$  и  $P_{11}$  амплитуда и фаза приемных коэффициентов солнечно-суточной составляющей первой гармоники вариации КЛ в полярной системе координат.

Часть приемных коэффициентов для станции Москва (при  $\gamma = -1.5$  и  $\gamma = 0.0$ ).

$\gamma$	$R_u$	$C_{00}$	$C_{10}$	$C_{20}$	$A_{11}$	$P_{11}$	$A_{21}$	$P_{21}$	$A_{22}$	$P_{22}$
-1.5	30	0.9140	-0.0093	-0.4181	0.6850	72.37	0.0864	-35.19	0.4320	136.35
-1.5	50	0.9270	-0.0015	-0.4167	0.6920	71.92	0.0898	-29.65	0.4350	135.72
-1.5	70	0.9300	0.0010	-0.4158	0.6940	71.80	0.0911	-28.37	0.4350	135.58
-1.5	80	0.9310	0.0015	-0.4155	0.6940	71.77	0.0914	-28.10	0.4350	135.56
-1.5	100	0.9320	0.0022	-0.4151	0.6950	71.74	0.0919	-27.80	0.4350	135.52
-1.5	150	0.9330	0.0029	-0.4148	0.6950	71.70	0.0923	-27.53	0.4350	135.49
-1.5	200	0.9330	0.0031	-0.4147	0.6950	71.69	0.0925	-27.45	0.4350	135.49
-1.5	300	0.9330	0.0033	-0.4146	0.6950	71.68	0.0926	-27.40	0.4350	135.48
-1.5	500	0.9330	0.0033	-0.4145	0.6950	71.68	0.0926	-27.38	0.4350	135.48
-1.5	1000	0.9330	0.0034	-0.4145	0.6950	71.68	0.0927	-27.37	0.4350	135.48
0.0	30	0.6300	0.0787	-0.2502	0.5490	55.90	0.1320	32.79	0.3960	108.51
0.0	50	0.7240	0.1370	-0.2383	0.6130	53.83	0.1990	33.71	0.4290	105.63
0.0	70	0.7730	0.1710	-0.2250	0.6400	52.67	0.2320	32.84	0.4390	104.19
0.0	80	0.7890	0.1830	-0.2193	0.6490	52.25	0.2440	32.39	0.4420	103.70
0.0	100	0.8150	0.2020	-0.2100	0.6610	51.59	0.2600	31.60	0.4450	102.96
0.0	150	0.8530	0.2310	-0.1953	0.6780	50.55	0.2850	30.21	0.4480	101.84
0.0	200	0.8760	0.2480	-0.1865	0.6870	49.92	0.2990	29.31	0.4490	101.20
0.0	300	0.9020	0.2670	-0.1761	0.6980	49.17	0.3140	28.21	0.4490	100.46
0.0	500	0.9270	0.2870	-0.1658	0.7070	48.43	0.3290	27.11	0.4490	99.75
0.0	1000	0.9510	0.3050	-0.1559	0.7160	47.70	0.3440	26.05	0.4490	99.07

Для перехода в декартовую систему координат необходимо провести следующие преобразования для каждой станции с учетом ее долготы  $\varphi_s$ :

$$\begin{cases} C_x^i = -A_{11} \cos(\varphi_s + \varphi_{11}) \\ C_y^i = -A_{11} \sin(\varphi_s + \varphi_{11}), \\ C_z^i = -C_{10} \end{cases} \quad (1.3.14)$$

где для первой гармоники  $A_{11}$  – амплитуда и  $\varphi_{11}$  ( $P_{11}$ ) – фаза, определяющая снос частиц в магнитосфере. Знак ‘-’ соответствует направлению вектора анизотропии по току КЛ. Приемный коэффициент нулевой гармоники  $C_{00}$  также приведен в таблицах. Однако, мы проводим независимые вычисления  $C_{00}$  согласно (1.3.13), используя функции связи между интенсивностью КЛ в пункте наблюдения и на границе атмосферы [10,72,79]:

$$W(R) = \alpha(k-1) \exp(-\alpha R^{-(k-1)}) R^{-k} \quad (1.3.15)$$

В работе [5] была получена аппроксимация высотного хода параметров  $\alpha$  и  $k$ , которую можно представить следующим выражением ( $h$  в барах):

- для минимума (1965 г.) солнечной активности:

$$\begin{aligned} \ln \alpha &= 1.84 + 0.094h - 0.09 \exp[-11h] \\ k &= 2.40 - 0.56h + 0.24 \exp[-8.8h] \end{aligned} \quad (1.3.16)$$

- для максимума (1969 г.) солнечной активности:

$$\begin{aligned} \ln \alpha &= 1.93 + 0.150h - 0.18 \exp[-10h] \\ k &= 2.32 - 0.49h + 0.18 \exp[-9.5h] \end{aligned} \quad (1.3.17)$$

Как показано в [5], вплоть до уровня 300 мбар зависимость от высоты интересующих нас параметров имеет практически линейный вид.

Вычисления функций связи и приемных коэффициентов для изотропной части КЛ проводятся при каждом счете в зависимости от числа станций и выбранного периода. При реализации метода глобальной съемки часто используются станции, для которых отсутствуют приемные коэффициенты в таблицах Ясое [198]. В таких случаях для их определения проводится интерполяция имеющихся приемных коэффициентов для сети нейтронных мониторов. Возможности такой интерполяции видны из рис. 1.4 и рис. 1.5 (а-в), где приводятся значения приемных коэффициентов для составляющих нулевой и первой гармоник для всех имеющихся станций мировой сети в диапазоне жесткостей обрезания от 0 до 16 ГВ при  $\gamma = 0.5$ .

На этих же рисунках видно поведение коэффициентов для различных гармоник в зависимости от жесткости обрезания  $R_c$  в точке наблюдения. Анализ таких зависимостей помогает понять роль той или иной станции в регистрации различных составляющих вариаций и в определении характеристик этих составляющих [142].

Так, поведение приемного коэффициента для изотропной составляющей ( $C_{00}$ ) отражает способность каждой станции регистрировать модуляцию КЛ. Наибольшей такой способностью обладают станции в диапазоне жесткостей  $R_c$  от 0.5 до 3.5 ГВ, а наибольшие изменения вариации наблюдаются на станциях с максимальными и минимальными коэффициентами  $C_{00}$  (приэкваториальные станции). Именно эти станции наиболее ценны для определения наклона и

формы жесткостного спектра вариации, причем станции с минимальной чувствительностью к модуляции не менее важны, чем станции с максимальной чувствительностью.

Наибольший отклик на солнечно-суточную вариацию ( $A_{11}$ ) имеют станции с широтой около  $50^\circ$  и жесткостью обрезания около 1 ГВ. Однако здесь нет явных лидеров и почти все станции мировой сети способны наблюдать солнечно-суточную вариацию и все вместе дают уникальную информацию об угловом распределении КЛ.

Причем, на высокоширотных станциях с максимальной чувствительностью к солнечно-суточной анизотропии эти изменения невелики, а на средне- и низкоширотных станциях, приемный конус которых «размазан» по долготе, они значительно больше [198]. Именно средне- и низкоширотные ( $R_c > 3.5$  ГВ) станции особенно важны для определения жесткостного спектра анизотропии. Иногда простого сопоставления суточных волн, наблюдаемых на двух таких станциях, достаточно для оценки характеристик спектра, в то время как все станции высокоширотного кольца для этого ничего дать не могут.

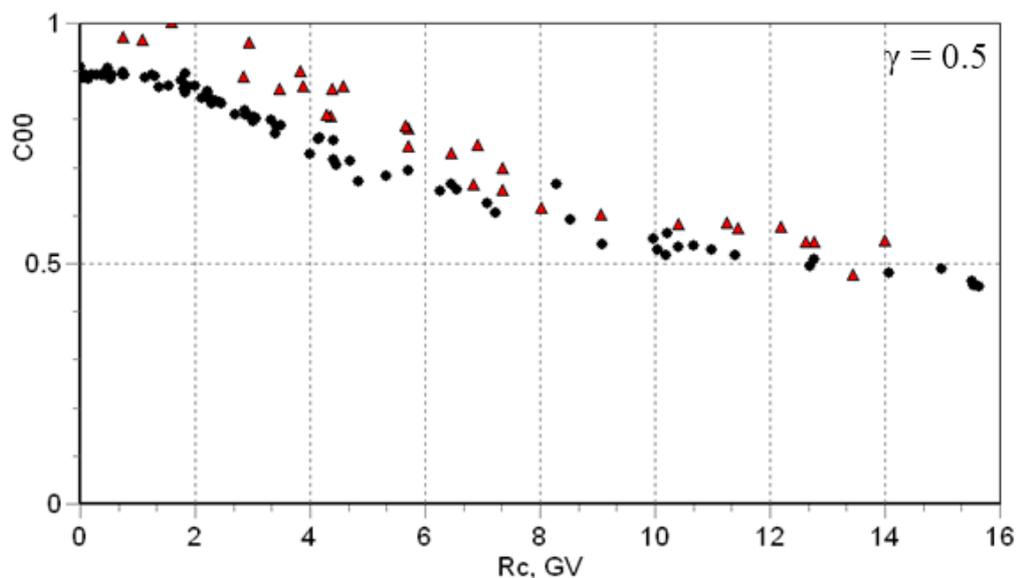


Рис. 1.4. Приемные коэффициенты нулевой гармоники ( $C_{00}$ ), вычисленные в соответствии с выражением (1.3.13) для  $\gamma = 0.5$ . Точками обозначены значения, полученные для станций на уровне моря, а треугольниками – на уровне гор.

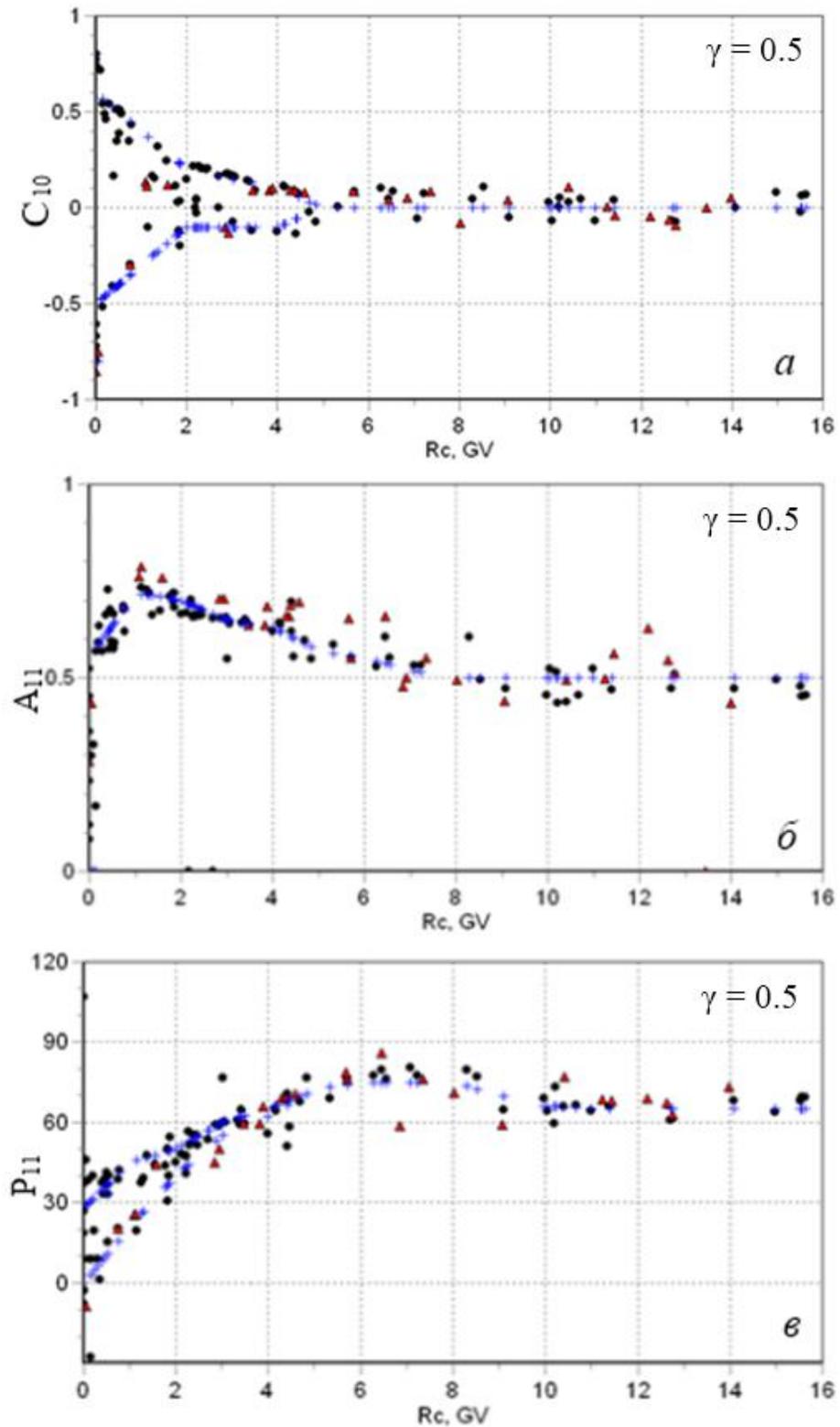


Рис. 1.5. Зависимость от жесткости обрезания станции приемных коэффициентов первой гармоники: (а)  $C_{10}$ , (б)  $A_{11}$ , (в)  $P_{11}$ . Точками обозначены значения, полученные для станций на уровне моря, а треугольниками – на уровне гор.

Большинство НМ мировой сети собирают частицы с приэкваториальной зоны и только несколько приполярных станций способны «видеть» частицы, приходящие с высоких асимптотических широт (поведение коэффициента  $C_{10}$ ). Только эти станции и годятся для наблюдения северо-южной анизотропии. В северном полушарии это ст. *Thule*, в южном полушарии – *McMurdo* и *Terre Adelje*. Особенно хороша пара станций *Thule* и *McMurdo*. Они максимально и симметрично реагируют на северо-южную анизотропию, одинаково – на изменения плотности КЛ и почти не реагируют на экваториальную анизотропию и геомагнитные вариации. Поэтому вполне разумно использовать полуразность вариаций на этих станциях для оценки амплитуды северо-южной анизотропии, а полусумму – вместо изотропной вариации, как это было сделано, например, в работе [152]. К сожалению, ограниченное число станций на больших широтах делает эти оценки не всегда надежными.

При реализации метода глобальной съемки и определении внеземных вариаций приемные коэффициенты для первой гармоники выбирались при  $\gamma = 0.0$  и верхней граничной жесткости  $R_u = 100$  ГВ, (т.е. при плоском спектре вариаций). Это упрощение вполне приемлемо, т.к. анизотропия КЛ в спокойные и квазиспокойные периоды не сильно зависит от жесткости частиц. Для изотропной части, в модели, показатель спектра входит как переменная величина (соответственно, приемные коэффициенты используются для его разных значений), которая оценивается в числе других параметров при решении системы уравнений (1.3.14).

В специальную директорию в корне рабочей программы «*./CC*» занесены все имеющиеся приемные коэффициенты для эпох максимума и минимума солнечной активности для всех работавших и работающих станций в файлах *NAME.MAX* и *NAME.MIN*. Используются 4-х символьные названия станций по формату, разработанному в свое время Шей с соавторами для стандартизации списка станций при исследовании GLE событий [168].

Расчет параметров ГКЛ методом *GSM* поэтапно происходит в следующем порядке:

1. Программой *SetRcCC* в директории «*./CC*» в таблицы приемных коэффициентов вносятся  $R_C$  станций, используемых в расчете.
2. Формируется директория *DATAУММ* с часовыми данными всех станций, которые предполагается использовать в проводимых расчетах, в виде файлов *УММNAME.w0c*. Данные исправлены на давление и проверены на дрейфы и случайные выбросы.
3. Программой «*Make work coupling coefficients*» (меню основной программы *GSM*) производится вычисление приемных коэффициентов нулевой гармоники для всех выбранных станций и формирование таблицы *CCwork* с включением списка используемых станций со всеми приемными коэффициентами (для нулевой и первой гармоник).

Дальнейшая работа идет в два этапа.

- I. **Определение экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ по данным высокоширотных станций.** Из общей сформированной таблицы отбираются только высокоширотные станции на уровне моря ( $R_C < 3$  ГВ,  $h > 800$  мбар). Затем решается система уравнений (1.3.12). Поскольку система нелинейная и плохо обусловлена, один из вариантов ее решения – это линеаризация и решение методом сингулярного разложения *SVD* [25]. При поиске минимума дисперсии для определения параметров ГКЛ применяется метод интерполяции (сплайн аппроксимация) приемных коэффициентов для промежуточных значений  $\gamma$  и  $R_u$ . Поскольку счет на первом этапе проводится по полной модели (1.3.12), в результате за каждый час получают искомые параметры ГКЛ:  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  – характеристики первой гармоники анизотропии КЛ;  $a_0$  и  $\gamma$  для изотропной компоненты КЛ. Для расчетов используются не абсолютные скорости счета нейтронных мониторов, а их вариации относительно базового периода ( $N_i/N_0$ ), выбор которого (как правило, сутки, одинаковые для всех станций)

играет важную роль. Скорость счета каждого конкретного прибора определяется целым рядом трудно учитываемых факторов, и однородность величин  $N_0$  также наверняка нарушается в возмущенные периоды из-за магнитосферных и внеземных вариаций. Это приводит к ложному суточному вращению фазы экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии, особенно, если обсчитываемый период находится далеко от базового. Во избежание этого эффекта приходится несколько раз менять базовый период (3-7 раз за месяц). Эта процедура не отражается на уровне  $A_x$  и  $A_y$  составляющих, но поведение  $a_0$  и  $A_z$  компонент становится многоступенчатым, что делает невозможным использование этих параметров для анализа. Их определение проводится на втором этапе работы программы *GSM*.

**II. Определение изотропной компоненты и северо-южной составляющей первой гармоники вариаций КЛ.** В общий список отбираются все станции, для которых были посчитаны приемные коэффициенты  $C_{00}$  ( $R_C < 17$  ГВ,  $h > 600$  мбар). На основе полученных на первом этапе данных  $A_x$  и  $A_y$  (солнечно-суточная составляющая первой гармоники анизотропии) и приемных коэффициентов, из данных каждой станции исключается экваториальная составляющая первой гармоники анизотропии КЛ по алгоритму:

$$D_i^* = D_i - (C_x^i \times A_x + C_y^i \times A_y) \quad (1.3.18)$$

Оставшиеся данные практически содержат отклик на изотропную часть первичных КЛ и северо-южную компоненту первой гармоники:

$$\frac{\delta J^i}{J^i} = a_0 C_0^i(\gamma) + C_z^i A_z + \delta_{err}^i \quad (1.3.19)$$

Далее решается система уравнений (1.3.19) относительно параметров  $a_0$ ,  $\gamma$  и  $A_z$  уже по данным максимально возможного числа станций. В результате получается ряд часовых значений параметров КЛ за пределами магнитосферы ( $a_0$ ,  $\gamma$ ,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ), который и используется для дальнейшего анализа событий.

Подключение большого количества станций значительно повышает точность полученных результатов.

В процессе работы с *GSM* накопился ряд предложений по усовершенствованию и более оптимальному использованию метода, которые приводятся ниже.

1. Уточнение модельной жесткостной зависимости изотропной части вариации КЛ.
2. Замена степенной спектральной функции на более сложную, что должно сказаться, в первую очередь, на исследовании больших ФП.
3. Введение второй гармоники анизотропии КЛ в модель вариации.
4. Учет магнитосферных вариаций.
5. Лучший выбор базовых периодов.
6. Определение жесткостной зависимости анизотропии КЛ и/или учет ее изменений (это существенно при больших величинах анизотропии).
7. Учет изменений функций связи ( $a$ , следовательно, и приемных коэффициентов) со временем.
8. Улучшение качества входных данных.
9. Уточнение барометрических коэффициентов и пересчет соответствующих поправок. Иногда важны и другие атмосферные эффекты.
10. Добавление к данным НМ данных других детекторов, прежде всего, мюонных. На первом этапе легче всего добавить разности вариаций однотипных телескопов.

#### **1.4. Преимущества метода глобальной съемки перед использованием данных отдельных станций космических лучей**

Как уже обсуждалось выше, данные одного НМ не могут дать представления обо всем угловом распределении КЛ. Чтобы получать достаточно полную информацию о распределении КЛ за пределами магнитосферы, нужно иметь много детекторов, достаточно равномерно

расположенных по земному шару. Если распределение КЛ изотропно, то, зная приемные коэффициенты в точке наблюдения, можно оценить изотропную составляющую интенсивности КЛ и по одной станции, хотя и с невысокой точностью. Но для определения анизотропии КЛ одним прибором уже не обойтись: так, для первой сферической гармоники необходимо, как минимум, четыре НМ, для второй – уже, как минимум, девять приборов [20].

До развития *GSM* во многих работах для изучения событий использовались скорости счета одного или нескольких НМ, которые, как правило, содержат и изотропную часть интенсивности, и анизотропию КЛ, характерные для малой части пространства, в пределах асимптотических конусов в разных точках наблюдения. Поэтому на разных станциях эффекты в КЛ (например, ФЭ) могут выглядеть по-разному хотя бы из-за наличия в данных суточной волны. Можно попытаться избавиться от суточной волны путем усреднения данных за сутки [32,130], но при этом происходит занижение величины реального эффекта, которое определяется, в основном, длительностью эффекта. Например, если ФП длится менее суток, то усреднение может уменьшить эффект в 2-3 раза. Ниже проводится сравнение результатов *GSM* с данными одной станции – г. Вашингтон (*MTWS*, *Mt. Washington*, координаты: 44.27, -71.30, высота: 1909 м,  $R_c = 1.24$  ГВ). Эта станция выбрана, поскольку именно на ее данных основан каталог ФП Локвуда [130] за самый ранний период наблюдений КЛ (начиная с апреля 1954 года). Напомним, что мировая сеть НМ включает в себя данные с июля 1957 года, а результаты *GSM* были получены для частиц с жесткостью ( $R_c$ ) 10 ГВ, как наиболее близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых НМ. На графиках представлены результаты *GSM* (зеленая кривая), а также данные станции *MTWS* – часовые и усредненные за сутки (красная и желтая кривые соответственно).

На рис. 1.6а приведено событие 18/09/1959, в котором ФЭ успел развиваться в пределах суток. В данных одной станции (на этом и других рисунках) отчетливо видна суточная волна, которая исчезает в поведении

плотности КЛ, полученной методом глобальной съемки. В результате, при обработке данных с помощью *GSM* величина ФП получилась  $\sim 8.8\%$ , в то время как при суточном усреднении данных станции *MTWS* всего около  $3.8\%$ . Таким образом, наблюдаемый эффект по отдельной станции был занижен более чем в 2 раза.

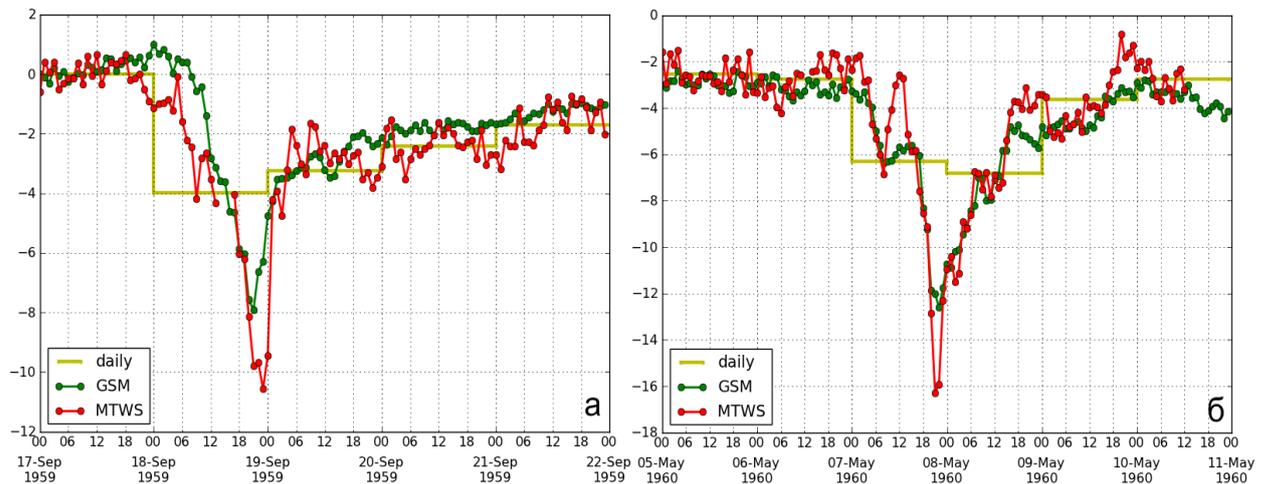


Рис. 1.6. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *MTWS* и полученные методом *GSM* за период: (а) 17-22/09/1959, (б) 5-11 /05/1960.

Подобная же ситуация наблюдается при исследовании события 06/05/1960 (см. рис. 1.6б). Величина ФП при обработке *GSM* оказалась  $\sim 10.1\%$ , а при суточном усреднении получилась около  $3.9\%$ . В этом случае, наблюдаемый эффект на отдельной станции был занижен уже более чем в 2.5 раза.

Таким образом, изучение коротких по продолжительности ФП становится затруднительным при использовании данных одного НМ, даже если эффект имеет большую величину. Но усреднение за сутки нельзя считать полностью отрицательным фактором. Если же использовать часовые данные отдельного НМ, то большие искажения в эффекты вносит суточная вариация ГКЛ.

Важно отметить, что степень занижения будет зависеть не только от продолжительности эффекта в КЛ, но и от места расположения детектора. Геомагнитная широта задает жесткость обрезания первичного потока КЛ в данной точке (см., напр., [67]). Чем меньше жесткость обрезания, тем больший

эффект будет наблюдаться на детекторе в месте наблюдения, и наоборот. Например, рассмотрим снова событие 6 мая 1960 года, но используя данные станции с любой другой пороговой жесткостью (рис. 1.7).

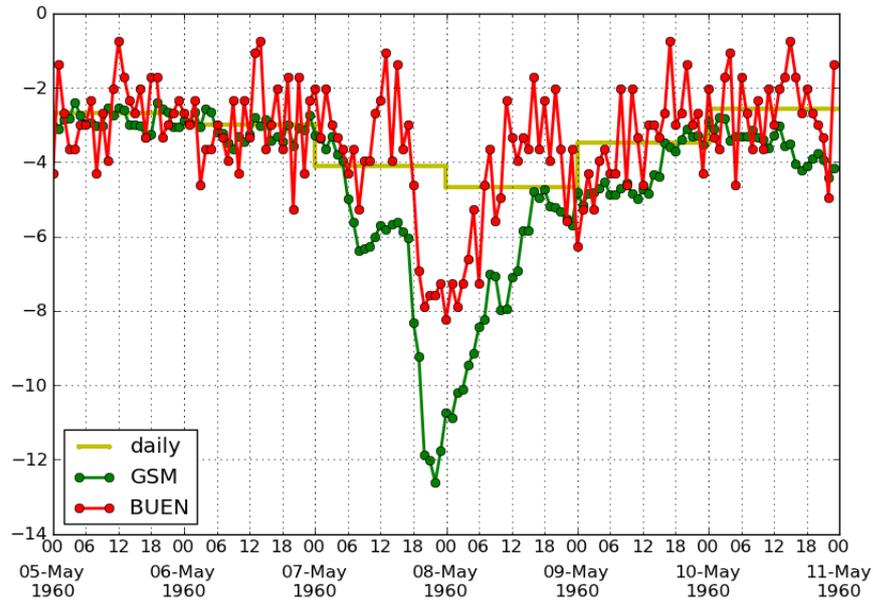


Рис. 1.7. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *BUEN* и полученные *GSM* за период с 5 по 11 мая 1960 г.

В качестве новой станции космических лучей был взят нейтронный монитор, расположенный в Буэнос Айресе (*BUEN*, *Buenos Aires*, координаты:  $-34.6$ ,  $-58.48$ , высота:  $0$  м,  $R_c = 10.63$  ГВ). Из рис. 1.7 видно, что усредненный эффект имеет величину чуть больше 1% ( $GSM = 10.1\%$ ,  $MTWS = 3.9\%$ ). Таким образом, в зависимости от жесткости обрезания, на каждой станции будет наблюдаться различный эффект.

Следует отметить, что если эффект в КЛ длится несколько суток, то усреднение дает гораздо меньше искажений. Примером такого события может быть событие, наблюдаемое 11 мая 1959 года (рис. 1.8). В данном событии, при обработке *GSM*, величина ФП равна  $14.6\%$ , а при суточном усреднении около  $12.8\%$ . Из рисунка видно, что ФЭ начался на границе суток, продолжался более трех дней и имел большую амплитуду.

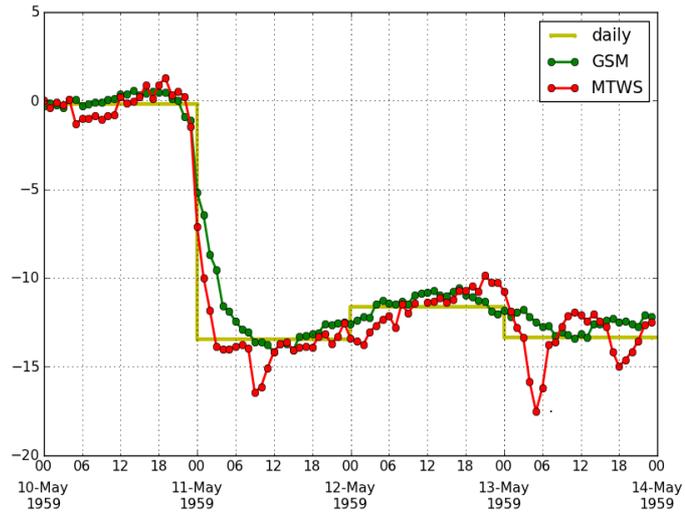


Рис. 1.8. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *MTWS* и полученные методом *GSM* за период с 10 по 14 мая 1959 г.

Еще один недостаток использования отдельных станций проявляется, когда анизотропия КЛ велика и быстро меняется. Иногда она существенно искажает эффект и в больших событиях, а в малые события вносит существенный вклад очень часто. Например, в событии 03/09/1959 (рис. 1.9) видно уменьшение величины ФП за счет вклада положительной анизотропии в эффект. Наблюдаемая величина ФЭ на станции *MTWS* равна 4.3%, в то время как при обработке *GSM* величина эффекта равна 6.2%.

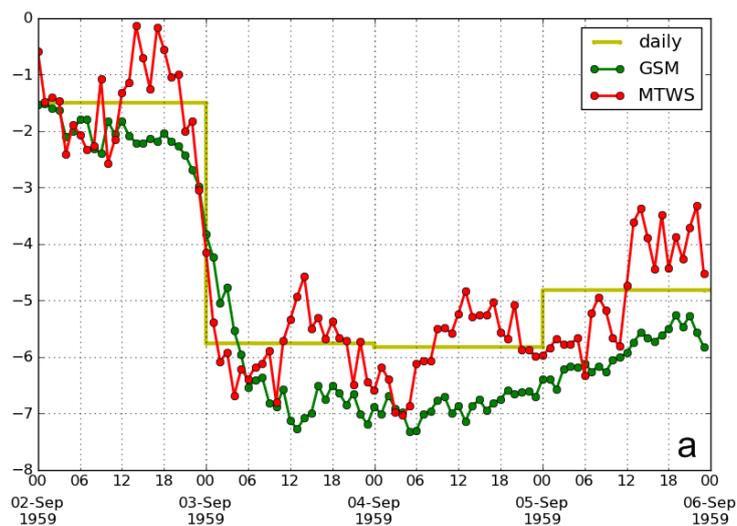


Рис. 1.9. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *MTWS* и полученные методом *GSM* за период со 2 по 6 сентября 1959 г.

Но не всегда анизотропия приводит к занижению эффектов в КЛ. Наблюдается также и завышение величины эффекта. На рис. 1.10 изображено событие 30/11/1961. В данном событии наблюдаемая величина ФП на станции *MTWS* равняется  $\sim 4.4\%$ , а при обработке *GSM*  $\sim 4.1\%$ .

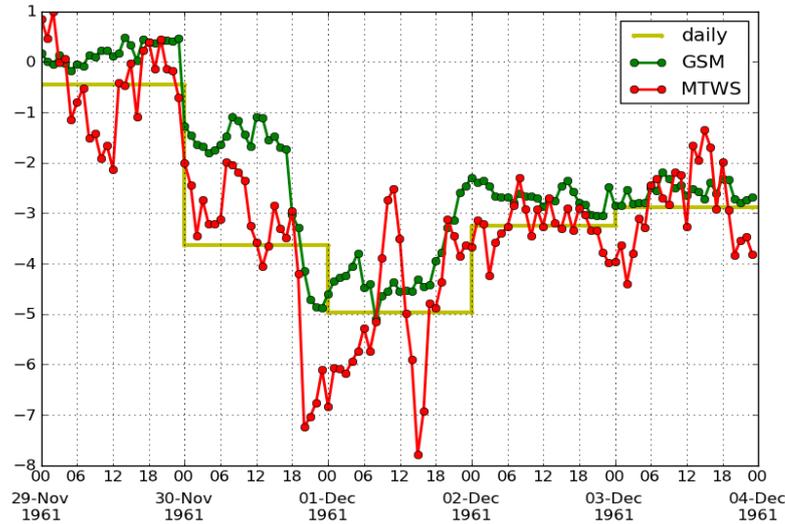


Рис. 1.10. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *MTWS* и обработанные методом *GSM* за период с 29 ноября по 4 декабря 1961 г.

Можно выделить еще целый ряд преимуществ *GSM* перед использованием отдельных станций КЛ. Одним из таких преимуществ является обеспечение непрерывности измерений. При использовании *GSM*, в случае выхода из строя одного НМ, мы потеряем только один канал (т.е. данные по одному направлению). При этом данные по остальным направлениям все равно будут собираться, причем качество данных практически не изменится. Но если исследовать эффекты, используя только один НМ, то при сбоях в его работе можно потерять все данные за промежуток времени сбоя.

На рис. 1.11 (*а*, *б*) представлены примеры сбоев в работе *MTWS* за различные промежутки времени. Из рисунка видно, что в первом случае (рис. 1.11*а*) были утеряны данные за 2 часа, а во втором (рис. 1.11*б*) – уже около 24 часов.

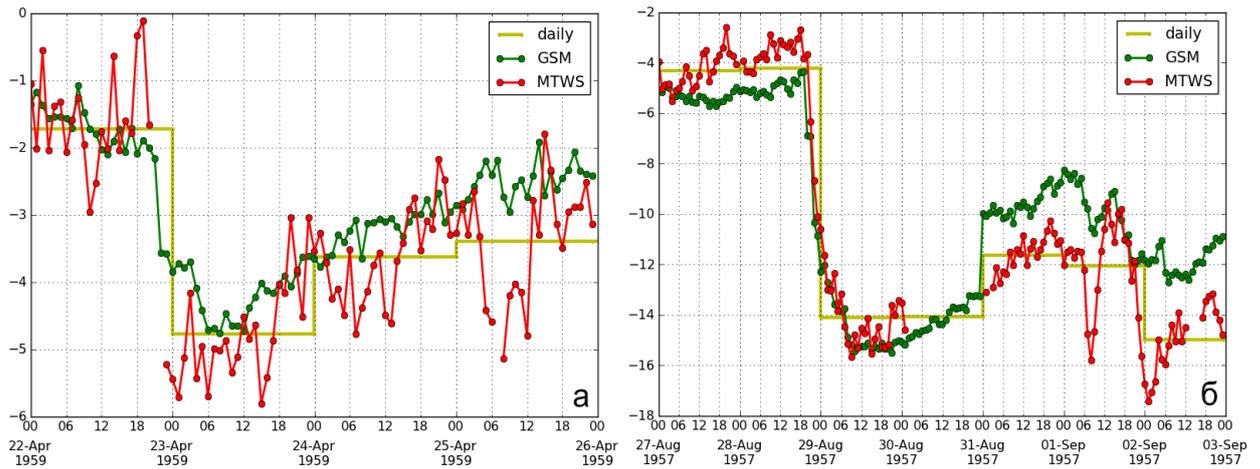


Рис. 1.11. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *MTWS* и обработанные методом *GSM* за период: (а) 22-26/04/1959, (б) 27/08-03/09/1959.

Следует отметить, что, в зависимости от степени сложности поломки, сбои в работе могут длиться как часы, дни, недели, так и месяцы, и даже годы. Более того, могут быть случаи, что восстановление работоспособности детектора не будет предоставляться возможным вообще. Практически во всех случаях невозможно восстановить потерянные данные за период времени сбоев.

Другим недостатком использования данных отдельных НМ является наличие различного рода «артефактов». Под артефактами понимается изменение скорости счета НМ, которое не связано с внезапными вариациями. Примером может служить выпавший снег и дальнейшее его скапливание на крыше здания, в котором находится монитор. В результате могут наблюдаться «ложные» вариации. Чтобы избежать наличия подобных артефактов, предпринимаются различные меры. Например, поддерживают постоянную температуру в помещении, где расположен детектор. Для предотвращения скопления снега на крышах зданий, где расположен прибор, крыши у зданий делают с большим наклоном или с подогревом.

## 1.5. База данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений

Вариации плотности и анизотропии КЛ, полученные методом глобальной съемки, объединены с солнечными, межпланетными и геомагнитными характеристиками в специально созданной сотрудниками ИЗМИРАН базе данных межпланетных возмущений и ФЭ – *DBFE*<sup>1</sup> [45,47]. Результаты *GSM* были получены для частиц с жесткостью 10 ГВ, как наиболее близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых нейтронными мониторами, а измерения солнечного ветра взяты из базы данных *OMNI*<sup>2</sup> (см., напр., [186]). Информация по солнечным вспышкам основана на рентгеновских измерениях серии спутников *GOES*<sup>3</sup> (<http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray>).

На рис. 1.12 показан вид главного окна представленной базы данных.

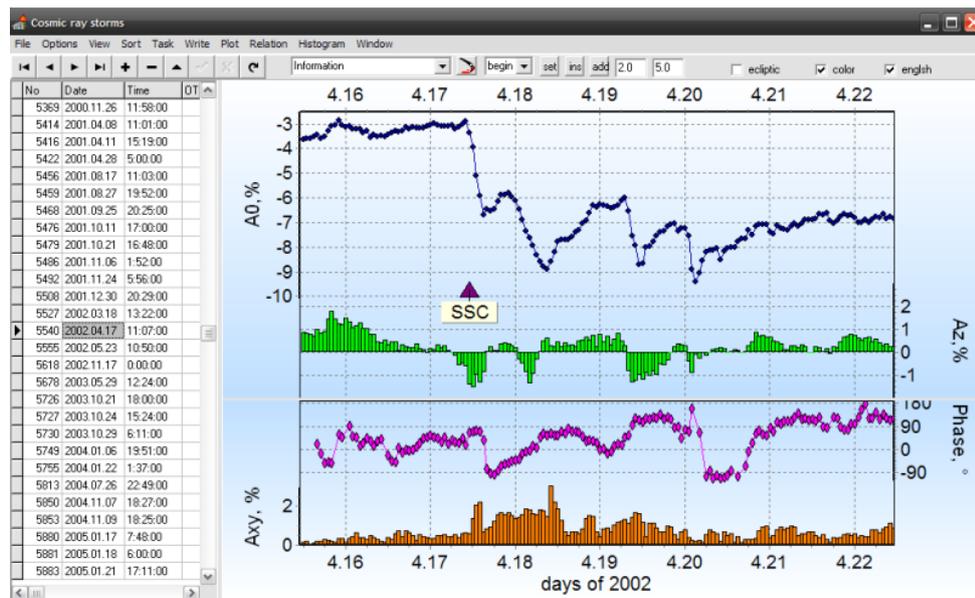


Рис. 1.12. Вид главного окна базы данных по Форбуш-эффектам и межпланетным возмущениям (*DBFE*).

Все представленные характеристики можно разделить на внешние (параметры возмущений и межпланетной среды) и внутренние (характеристики вариаций КЛ). К первой группе можно отнести, например, скорость

<sup>1</sup> Database of Forbush-effects

<sup>2</sup> URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>

<sup>3</sup> Geostationary Operational Environmental Satellites

распространения выброса, напряженность межпланетного магнитного поля, скорость солнечного ветра и т.д. Ко второй группе относятся – амплитуда ФЭ, максимальное часовое уменьшение плотности, величина анизотропии, длительность основной фазы ФЭ и пр.

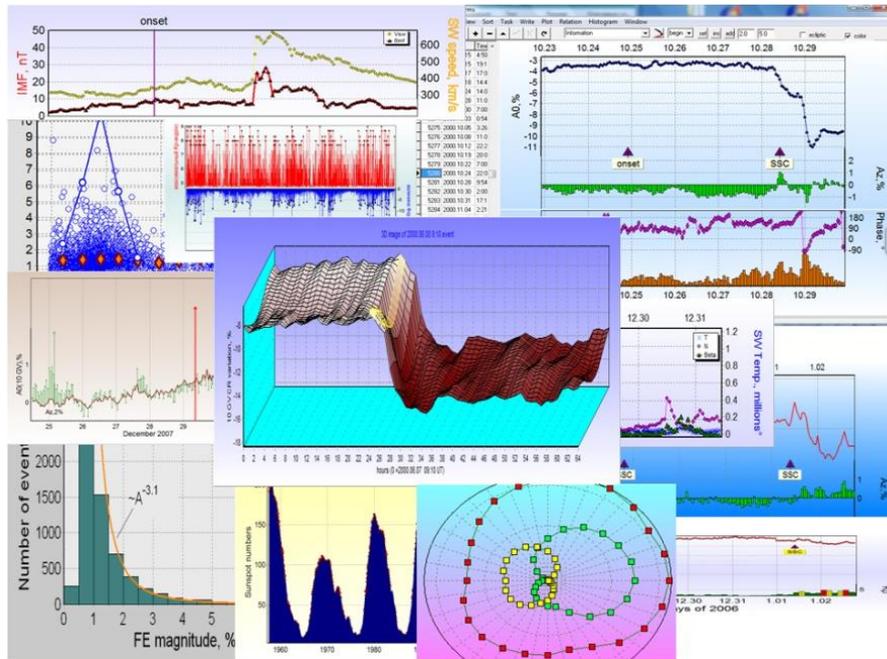


Рис. 1.13. Варианты представления графической информации с помощью базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений.

Важно отметить, что *DBFE* не только содержит информацию о различных параметрах ФП и межпланетных возмущений, но и является удобным инструментом для ее обработки. Она позволяет делать различные выборки событий, а также определять корреляционные зависимости между wybranными параметрами, представляя запрашиваемую информацию в числовой и графической формах (см. рис. 1.13). Практически все результаты, приведенные в данной работе, были получены с помощью *DBFE*.

И хотя *DBFE* включает в себя около 6500 событий, охватывающих более чем полувековой период наблюдений КЛ (1957–2011 гг.), к сожалению, не все события, собранные в базе данных, одинаково пригодны для статистического анализа. К примеру, если два или более возмущения солнечного ветра следуют

друг за другом без достаточного перерыва, то первый ФЭ не успевает развиваться, а второй развивается под влиянием не одного, а уже двух возмущений. Чтобы избежать таких взаимовлияний, мы выбирали только те события, начало которых было отдалено от соседних ФЭ от 24 до 60 часов. А поскольку влияние относительно небольших ФП, как правило, незначительно, то мы оставляли в выборке события, которым предшествовали ФЭ с амплитудой, не превышающей 1.5%.

Но такой сложный продукт, как база данных, требует постоянного обновления и технической поддержки, поэтому автором был выполнен ряд процедур, которые позволили не только количественно расширить, но и качественно усовершенствовать представленную базу данных.

Во-первых, в базу данных были включены новые ФЭ за период с 2008 по 2012 гг. Всего было добавлено более 230 событий с амплитудами до 3.1%. Присутствие ФЭ только с небольшой величиной объясняется тем, что этот период соответствует минимуму солнечной активности.

Во-вторых, были добавлены новые параметры, характеризующие межпланетные возмущения, в частности, параметр, количественно характеризующий мощность солнечной эрупции – суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных аркад продольного поля на уровне фотосферы (см. главу 4).

В-третьих, проверялась и уточнялась информация по более ранним событиям в базе данных. В частности, проверка проводилась с помощью каталога *CDAW* [203,204] по данным электронного каталога корональных выбросов *SOHO/LASCO*<sup>1</sup> (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME-list/>) [196], а также на основе всех доступных солнечных и солнечно-земных данных, полученных из наземных и космических наблюдений.

В-четвёртых, был обнаружен и исправлен ряд внутренних ошибок в подпрограммах базы данных.

---

<sup>1</sup> Solar and Heliospheric Observatory/ Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment

## **1.6. Краткие выводы к главе 1**

Данные наземных наблюдений КЛ в сочетании с разработанными методами их обработки позволяют получать информацию для фундаментальных научных исследований в астрофизике, геофизике и гелиофизике, и могут использоваться в качестве опорных при измерениях КЛ на космических аппаратах. Метод глобальной съёмки позволяет устранить ряд проблем, касающихся качества и непрерывности получаемых данных.

Накопленная за десятки лет и организованная в базы данных информация о Форбуш-эффектах и сопутствующих явлениях позволяет ставить и решать различные задачи, в частности, изучать связь Форбуш-эффектов с солнечными источниками, с характеристиками возмущений солнечного ветра, с индексами геомагнитной активности.

## Глава 2. Форбуш-эффекты и их связь с межпланетными и геомагнитными возмущениями

Способность отражать крупномасштабные процессы, которые очень часто отдалены от места наблюдения, делает вариации космических лучей (КЛ) уникальным инструментом для исследования солнечной активности и процессов, происходящих в гелиосфере. В частности, Форбуш-эффекты<sup>1</sup> (ФЭ) дают, пожалуй, самую непосредственную информацию о возмущениях в межпланетной среде, обусловленных корональными выбросами (CMEs/ICMEs) и высокоскоростными потоками солнечной плазмы из корональных дыр. На рис. 2.1 представлен типичный ФЭ. Как правило, каждый такой эффект состоит из двух частей: фазы спада (главная, или основная фаза) и фазы восстановления галактических КЛ до прежнего уровня. Отметим, что в ряде случаев, перед фазой спада наблюдается кратковременное возрастание или понижение плотности КЛ – это так называемые «предвестники» данного явления (см., напр., [43,46,90,146,183]).

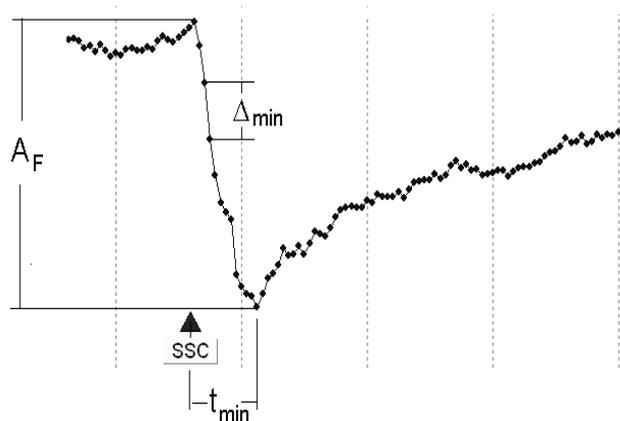


Рис. 2.1. Типичное поведение плотности галактических космических лучей в Форбуш-эффекте.

На рис. 2.1 отмечены некоторые из характеристик ФЭ:  $A_F$  – амплитуда или максимальная вариация плотности КЛ для 10 ГВ;  $\Delta_{min}$  – максимальное

<sup>1</sup> В данном разделе термины «Форбуш-эффект» (ФЭ) и «Форбуш-понижение» (ФП) рассматриваются как эквивалентные и взаимозаменяемые (подробнее см. раздел 1.1).

часовое уменьшение плотности КЛ в данном событии (максимальный часовой декремент);  $t_{min}$  – длительность основной фазы эффекта, т.е. интервал времени между началом события (в данном случае, совпавшего с внезапным началом геомагнитной бури (ГМБ), т.е. *SSC*) и моментом максимального понижения плотности КЛ. Существует еще целый ряд параметров, характеризующих ФП, которые будут описаны ниже.

Анализ событий основан на базе данных ФЭ и межпланетных возмущений (*DBFE*), созданной сотрудниками ИЗМИРАН [45,47] (см. раздел 1.5). С учетом условий отбора событий мы получили выборку, которая содержит 3455 событий. Именно эти события будут анализироваться в данном разделе.

## 2.1. Основные характеристики Форбуш-эффектов

Безусловно, одним из основных параметров, характеризующих ФЭ, является его амплитуда ( $A_F^1$ ), или максимальное понижение плотности КЛ в событии (ФП). В таблице 2.1 представлены десять самых больших ФП за все время наблюдения КЛ (без учета условий отбора). Из таблицы видно, что самые гигантские эффекты наблюдались 29 октября 2003 г., 4 августа 1972 г. и 24 марта 1991 г. с амплитудами 28%, 24.9% и 21.3% соответственно. Отметим также, что за всю историю наблюдения КЛ было зафиксировано всего 6 событий, в которых  $A_F$  была больше 20%. Но далеко не все эффекты имеют такую амплитуду. Если принимать во внимание условия отбора событий, описанные в разделе 1.5, то окажется, что все рассматриваемые ФЭ будут иметь гораздо меньшую величину. Например, самый большой эффект из выборки будет иметь величину 13.5%, а ФЭ с амплитудой более 10% окажется всего 5 (из 3455 событий). На рис. 2.2 представлено распределение ФЭ по амплитуде для всех рассматриваемых событий. Видно, что максимум гистограммы сильно

<sup>1</sup> В данном разделе под параметрами  $A_p$ ,  $Kp$ ,  $V_{SW}$ ,  $B_t$ ,  $A_{xy}$ ,  $A_z$ ,  $A_F$  подразумеваются максимальные значения этих характеристик в событии, а под параметрами  $Dst$ ,  $\Delta_{min}$ ,  $B_z$  – их минимальные значения в возмущении.

сдвинут влево и основная часть всех ФЭ лежит в интервале амплитуд от 0 до 2%.

Таблица 2.1.

Самые крупные Форбуш-эффекты за все время наблюдения космических лучей.

Дата событий	$A_F$	$Kp$	$Dst$	$A_{xy}$	$t_{min}$	$\Delta_{min}$	$t(\Delta_{min})$
29/10/2003	28.0	9 <sub>0</sub>	-363	10.42	11	-7.35	5
04/08/1972	24.9	9 <sub>0</sub>	-125	8.17	5	-7.04	4
24/03/1991	21.3	9 <sub>-</sub>	-298	8.43	13	-3.32	6
12/06/1991	20.5	8 <sub>-</sub>	-103	5.61	22	-3.75	12
20/10/1989	20.4	8 <sub>+</sub>	-268	5.01	25	-2.28	23
14/02/1978	20.2	7 <sub>+</sub>	-108	9.67	18	-5.15	15
13/07/1982	19.8	9 <sub>0</sub>	-325	4.71	9	-4.02	7
28/10/1991	17.4	8 <sub>+</sub>	-254	4.46	4	-6.29	0
13/03/1989	16.6	9 <sub>0</sub>	-589	3.74	46	-4.10	17
12/11/1960	16.1	9 <sub>0</sub>	-339	3.32	34	-2.23	16

При более детальном анализе можно получить, что в интервале 0–2% лежит 2954 ФЭ, что составляет ~86% от всех рассматриваемых событий. На интервал 2–4% приходится 359 событий (т.е. ~10%) и всего 96 ФЭ (т.е. ~3%) имеют амплитуду > 4%.

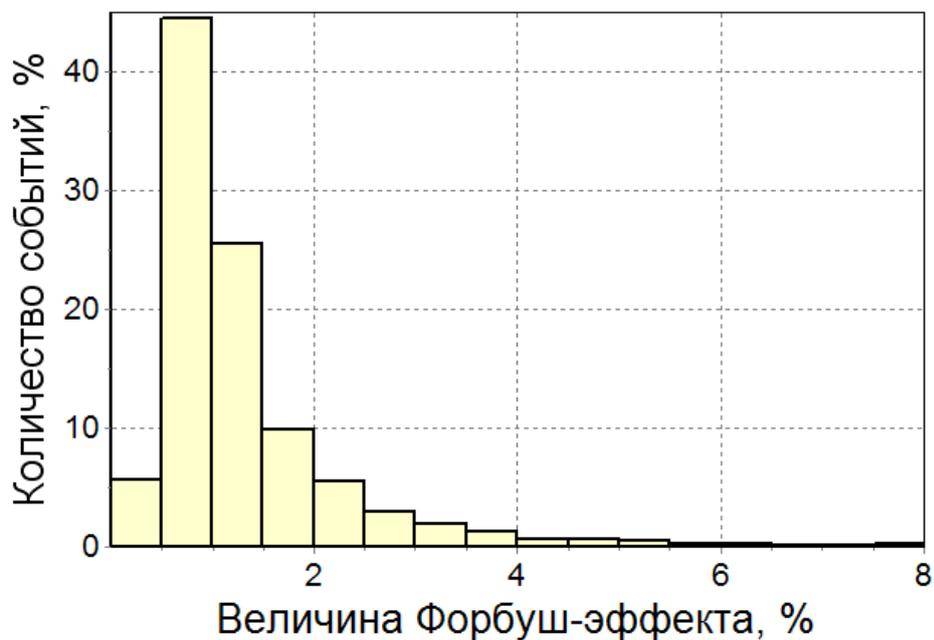


Рис. 2.2. Распределение Форбуш-эффектов по амплитуде (всего 3455 событий за период с 1957 по 2011 гг.).

Сама же величина ФЭ зависит от ряда факторов, например, от: скорости распространения возмущения в межпланетном пространстве; величины ММП, (причём на неё не влияет ориентация  $B_z$  компоненты поля в возмущении), от размеров возмущения и т.д.

Другим параметром, характеризующим ФЭ, является анизотропия КЛ, наблюдаемая во время спада и восстановления. Именно во время ФЭ наблюдается самая большая анизотропия галактических КЛ. Анизотропия является векторной величиной и может быть представлена в географической системе координат компонентами:  $A_{xy}$  – проекция векторной анизотропии на плоскость земного экватора,  $A_z$  – северо-южная компонента, направленная вдоль земной оси. На рис. 2.3 представлено поведение плотности и анизотропии КЛ во время ФП в ноябре 1978 года: сплошная кривая соответствует профилю изотропной части вариации (плотности) КЛ с жесткостью 10 ГВ; векторная диаграмма представляет часовые значения вектора экваториальной составляющей анизотропии КЛ; вертикальные вектора показывают изменение северо-южной компоненты анизотропии КЛ; тонкие линии соединяют одинаковые моменты времени на векторной диаграмме и кривой плотности КЛ через каждые 6 часов.

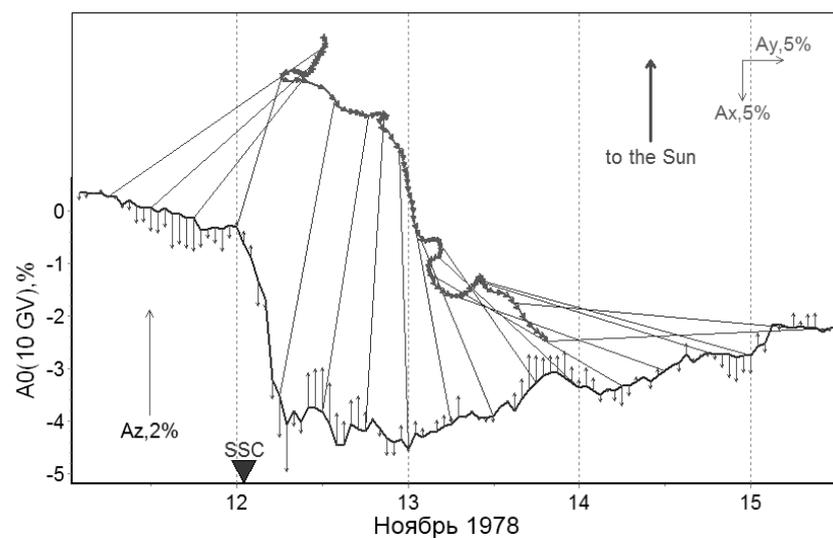


Рис. 2.3. Поведение плотности и анизотропии космических лучей во время Форбуш-эффекта в ноябре 1978 г.

При исследовании анизотропии мы используем, главным образом, составляющую  $A_{xy}$  первой гармоники. Именно эта составляющая создает солнечно-суточную анизотропию и суточные волны в поведении КЛ.

Основываясь на данных о временном профиле развития эффектов, можно выделить ряд параметров, характеризующих ФП. Одной из таких характеристик является длительность фазы спада ФП  $t_{min}$  – это интервал между началом события (которое, как правило, совпадает с  $SSC$ ) и временем достижения минимума в плотности КЛ. На рис. 2.4 представлено распределение числа ФЭ по величине  $t_{min}$ . Как видно из рисунка, максимум распределения приходится на интервал от 5 до 15 часов, но в целом, присутствует относительно равномерное распределение событий по временным интервалам развития главной фазы ФП.

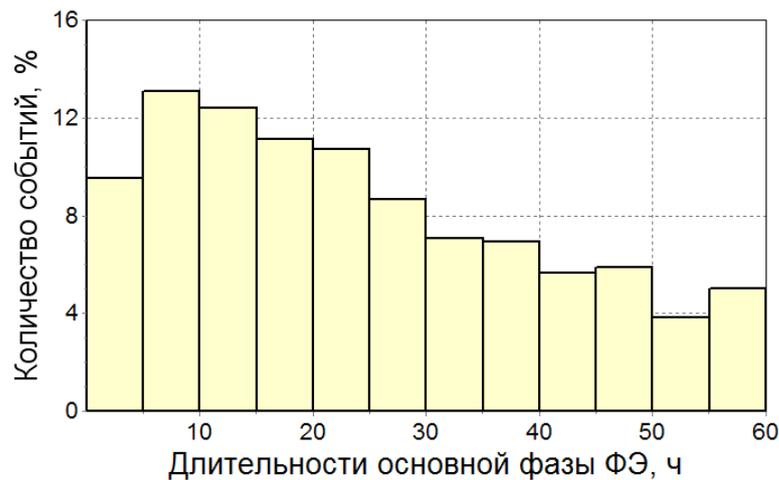


Рис. 2.4. Распределение Форбуш-эффектов по длительности фазы спада ( $t_{min}$ ).

Помимо длительности спада, в основной фазе можно выделить максимальный часовой декремент КЛ ( $\Delta_{min}$ ), который показывает, какое максимальное часовое уменьшение плотности КЛ наблюдалось в данном событии. На рис. 2.5 представлена зависимость амплитуды  $A_F$  от временного параметра  $\Delta_{min}$ . Поскольку  $\Delta_{min}$  является частью ФП, то не удивительно, что между рассматриваемыми характеристиками наблюдается хорошая корреляция. В данном случае коэффициент корреляции равен  $r \approx -0.77$ . Отметим, что

параметр  $\Delta_{min}$  можно использовать в прогностических целях, в частности, уже на фазе спада ФП, можно оценить его амплитуду  $A_F$ , анализируя максимальный часовой декремент плотности. Например, если в развивающемся событии наблюдается  $\Delta_{min} = 1.5\%$ , то, вероятнее всего, наблюдаемый эффект будет иметь величину около 5%, при условии, что максимальный часовой декремент останется неизменным.

Еще одним параметром, который можно выделить на фазе спада, является время достижения максимального часового уменьшения плотности КЛ ( $t(\Delta_{min})$ ). Другими словами,  $t(\Delta_{min})$  – это интервал времени между началом спада и временем достижения  $\Delta_{min}$  в рассматриваемом событии.

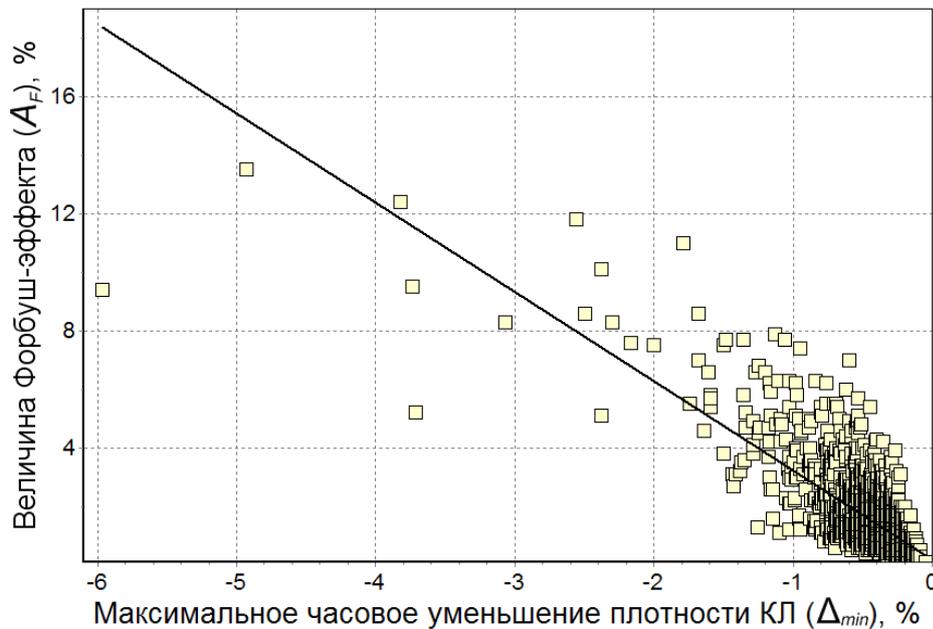


Рис. 2.5. Зависимость величины Форбуш-эффекта от максимального часового уменьшения плотности галактических космических лучей ( $\Delta_{min}$ ).

Длительность фазы восстановления также может рассматриваться в качестве характеристики ФЭ. В отдельных изолированных событиях время восстановления галактических КЛ занимает в среднем около 5 дней, но может принимать значения в диапазоне от 3 до 10 дней [129]. В работах [37,63,109] отмечалось, что время восстановления зависит от гелиодолготы солнечного источника.

## 2.2. Классификация Форбуш-эффектов

Форбуш-эффекты достаточно разнообразны по своему проявлению (см. рис. 2.6). Причинами такого многообразия является ряд факторов: влияние различных солнечных источников (а также их изменчивость и комбинация), слияние событий, взаимодействие распространяющегося возмущения с гелиосферным токовым слоем и т.д. Сами же параметры, характеризующие ФЭ, зависят от величины межпланетного магнитного поля (ММП), разности скорости распространения возмущения и фоновой скорости солнечного ветра, а также от размеров межпланетного возмущения. Несмотря на многообразие, все ФЭ можно разделить на группы, основываясь на: амплитуде ФП ( $A_F$ ), продолжительности главной фазы ( $t_{min}$ ), степени восстановления (с быстрым восстановлением, без восстановления), а также характере развития (ступенчатые, непрерывные) и т.д.

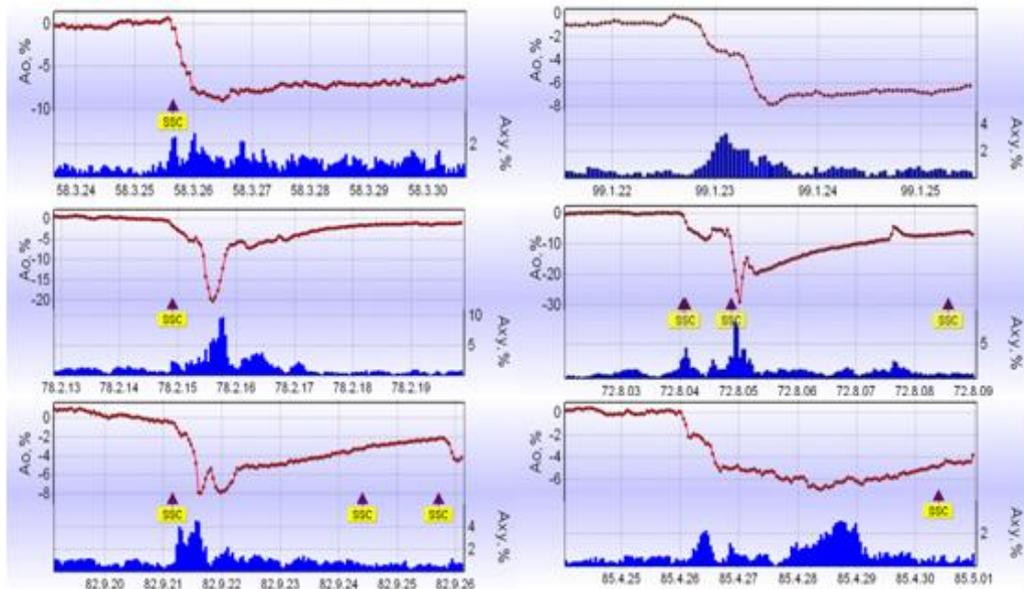


Рис. 2.6. Примеры различных временных профилей Форбуш-эффектов вместе с поведением экваториальной составляющей анизотропии КЛ.

Поскольку основной характеристикой ФП является его амплитуда ( $A_F$ ), то логичнее всего начать с деления всех эффектов основываясь именно на этом параметре. На рис. 2.2 представлено распределение ФЭ по величинам.

Отметим, что основная часть событий ( $\sim 86\%$ ) имеет амплитуду  $A_F \leq 2\%$ , около 10% событий имеют амплитуду  $2\% < A_F \leq 4\%$  и, наконец, с величиной  $4\% < A_F \leq 6\%$  мы имеем всего 2% событий из всей выборки. Если рассматривать ФП с амплитудой  $A_F > 6\%$ , то получится всего 31 (из 3455) событие. Нельзя однозначно сказать, какие события следует относить к большим по величине эффектам, а какие – к малым. В зависимости от конкретной выборки, значения, которые соответствуют малым и большим ФП, будут меняться. Поэтому, логичнее всего, деление ФЭ по амплитуде следует сделать, основываясь на параметрах, характеризующих состояние космической погоды, которые уже четко и однозначно определены. Например, в работе [8] в качестве такого параметра был взят максимальный  $Kp$  индекс в данном возмущении (см. таблицу 2.2). В таблице для рассматриваемых 1428 событий приведены средние величины ФП, соответствующие максимальным значениям  $Kp$  индекса в возмущении.

Таблица 2.2.

Средние величины Форбуш-эффектов, соответствующие различным значениям максимального  $Kp$  индекса в возмущении.

$Kp$	$\leq 1_+$	$2_- \div 2_+$	$3_- \div 3_+$	$4_- \div 4_+$	$5_- \div 5_+$	$6_- \div 6_+$	$7_- \div 7_+$	$8_- \div 8_+$	$\geq 9_-$
$A_F, \%$	$0.7 \pm 0.2$	$0.9 \pm 0.1$	$1.0 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.1$	$1.8 \pm 0.1$	$2.5 \pm 0.3$	$4.7 \pm 0.5$	$10.2 \pm 2.3$
Кол-во событий	12	118	297	361	316	194	79	44	8

Из таблицы видно, что спокойному и слабовозмущенному геомагнитному фону соответствуют очень маленькие по амплитуде ФЭ ( $A_F \leq 1\%$ ). Даже во время малых ГМБ ( $Kp = 5$ ) амплитуда среднего ФП принимает значение около 1.5%. И только во время очень больших и экстремальных ГМБ ( $Kp \geq 8$ ) типичная величина ФП становится достаточно большой ( $A_F \geq 5\%$ ).

В качестве другого основания для деления всех ФЭ на группы может использоваться различие в продолжительности развития события. Среди всех ФЭ можно выделить события, которые развиваются очень быстро и те, которым

необходимо больше времени. Отметим, что сам термин «развитие» ФЭ может подразумевать различные фазы эффекта. В одном случае под «развитием» ФЭ предполагается интервал времени между началом спада и минимумом в вариациях галактических КЛ ( $\Delta t_{min}$ ). В другом случае, под «развитием» ФЭ можно понимать интервал времени между началом спада и моментом восстановления КЛ до прежнего уровня. Но в большинстве случаев, из-за частого наложения событий, мы не можем наблюдать полное восстановление КЛ до первоначального уровня. Поэтому в качестве параметра, характеризующего развитие ФЭ, удобнее всего использовать величину  $\Delta t_{min}$ .

Деление ФЭ можно также провести, основываясь на данных о фазе восстановления эффектов. Можно выделить эффекты с быстрым или медленным, а также происходящим в несколько этапов восстановлением. Время восстановления зависит, прежде всего, от размеров возмущения, его скорости распространения в межпланетном пространстве, а также места попадания Земли в это возмущение. На рис. 2.7 представлены ФЭ с различными вариантами фаз восстановления. На первой панели (рис. 2.7а) восстановление КЛ до прежнего уровня длится более 14 дней. Одной из причин такого долгого восстановления может быть наложение эффектов. Из рисунка видно, что 25/03/1958 наблюдался большой по амплитуде ФЭ ( $A_F > 8\%$ ), а затем, на его фазу восстановления наложились еще два ФП с величинами 1.2% и 0.8%. Но не всегда события с долгим восстановлением создаются из-за наложения событий. Большие времена для фазы восстановления КЛ до прежнего уровня типичны для волоконных событий, в которых отмечается сравнительно низкая скорость распространения (около 400-500 км/с) и большие размеры возмущения.

На второй панели (рис. 2.7б) представлен типичный ФЭ, которому соответствует восстановление КЛ в 3-4 дня. В событии 08/06/1989 (рис. 2.7в) восстановление ГКЛ до прежнего уровня проходит примерно за сутки. Но можно выделить такие события, в которых восстановление имеет составной вид. Например, на рис. 2.7г представлено ФП, где в течение первых 8 часов

наблюдается резкое восстановление КЛ, а затем скорость восстановления замедляется.

В зависимости от типа источника возмущения межпланетной среды все ФЭ можно разделить на спорадические (от CMEs/ICMEs) и рекуррентные (от корональных дыр). Отметим, что механизм дополнительной модуляции КЛ в данных типах возмущений солнечного ветра различен [48,128,150]. Эффекты от ICMEs имеют, как правило, более резкое понижение ГКЛ. Кроме того, профиль ФП в таком случае, чаще всего, имеет двухступенчатую структуру (см. раздел 1.1).

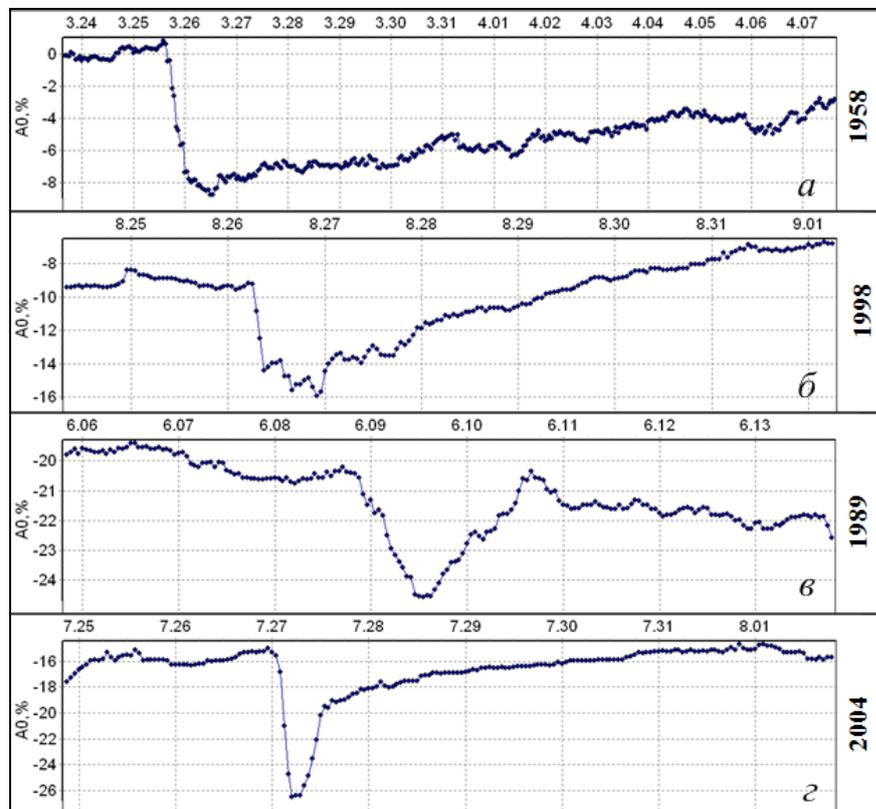


Рис. 2.7. Форбуш-эффекты с различными вариантами фазы восстановления.

Для детального анализа различных зависимостей характеристик все ФЭ, обусловленные спорадическими солнечными источниками (CMEs), делились на пять групп [4] согласно гелиодолготам источников возмущения межпланетной среды на видимом солнечном диске.

Сравнение ФЭ из разных групп выявляет существенную зависимость различных параметров эффекта от гелиодолготы источника. Например, направление анизотропии КЛ во время ФЭ более изменчиво для восточных и центральных источников и более устойчиво для западных. Эффекты, ассоциированные с восточными CMEs/ICMEs, развиваются наиболее медленно (см. раздел 2.5).

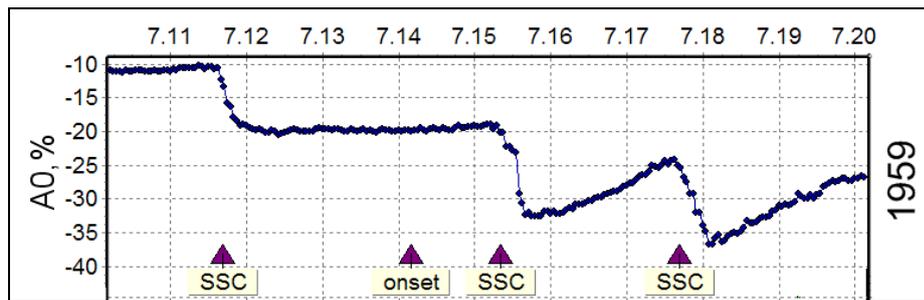


Рис. 2.8. Вариации космических лучей в июле 1959 года.

Долготная зависимость профилей ФП очень ярко проявляется, например, в событиях в июле 1959 г. (см. рис. 2.8). Разберем более детально этот пример. В течение одной недели (11, 15 и 17 июля 1959 года Землю достигли три ударные волны, после которых возникли сильные геомагнитные бури и большие ФП с величинами 10.1, 14.8 и 14.4 %. Каждое из этих трех событий было связано с мощной солнечной вспышкой в одной и той же активной области, зарегистрированной 10, 14 и 16 июля с координатами  $N21E64$ ,  $N27E07$ ,  $N17W30$  соответственно [11]. Хотя у первого ФЭ, начавшегося 11 июля, был длительный профиль, восстановления потока КЛ до прежнего уровня не произошло, поскольку начался следующий ФЭ. Все это сопровождалось короткой и умеренной ГМБ ( $Kp = 7_-$ ,  $Dst = -36$  нТл). Вторым ФЭ (15 июля) был самым большим из наблюдаемых эффектов. Он характеризовался быстрым двухступенчатым понижением и относительно быстрым восстановлением интенсивности КЛ. В этом случае ГМБ была не только самой большой из этих трех, но и одной из самых больших в истории наблюдений по  $Dst$  индексу, минимальное значение которого составило  $-429$  нТл. Третий ФЭ (17 июля) по

характеру спада был подобен первому, и имел самое быстрое восстановление, что характерно для западных событий. Это понижение в КЛ сопровождалось очень большой магнитной бурей (*severe*,  $Kp = 9_-$ ,  $Dst = -183$  нТл).

### 2.3. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началами

Как отмечалось выше, существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: рекуррентные (в основном, высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр) и спорадические (CMEs/ICMEs) (см. раздел 1.1). Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик в вариациях КЛ, однако механизм дополнительной модуляции будет различен. Кроме того, различаются и характеристики ФЭ. Но получение количественных данных о различиях этих характеристик затруднительно, поскольку далеко не всегда известно, что является источником конкретного возмущения, а многие события имеют смешанную природу, т.е. в их создании участвуют и CMEs/ICMEs, и корональные дыры (см., напр., [16]).

Поскольку прямой путь в статистическом сравнительном анализе ФП двух типов затруднен, приходится искать косвенные подходы. Например, делить события по особенностям их начала, объединяя в одну группу события, начавшиеся с прихода к Земле межпланетной ударной волны, а в другую – события без ударной волны, как было впервые предложено еще Китамурой [120]. Разумеется, мы не предполагаем, что такое деление полностью соответствует делению по солнечным источникам. Ударные волны у Земли иногда наблюдаются и на фронтах высокоскоростных потоков из корональных дыр. С другой стороны, множество межпланетных возмущений, созданных ICMEs, приходят к Земле без ударной волны. Тем не менее, можно утверждать, что ударные волны более характерны для событий, обусловленных корональными выбросами, и не типичны для событий, связанных с корональными дырами.

В представленном разделе проведен статистический анализ большого количества данных с целью изучения связи различных характеристик ФЭ

между собой и с параметрами межпланетной среды [2]. Анализ проводился для двух различных групп, объединяющих события, которые начались с приходом к Земле межпланетной ударной волны и события с постепенным началом, не сопровождавшиеся ни внезапным началом ГМБ (*SSC*), ни ударной волной.

С учетом условий отбора, описанных в разделе 2.1, всего было отобрано 3455 событий, которые были поделены на две группы: группу *S* (с межпланетными ударными волнами) и группу *NS* (без ударных волн). Внезапное начало магнитных бурь (*SSC*) использовалось как наиболее удобный индикатор межпланетных ударных волн ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUDDEN\\_COMMENCEMENTS/STORM2.SSC](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/STORM2.SSC)). В *S*-группу не включались слабовыраженные и ненадежно выделенные из внезапных начал, т.е. те, которые ни одной магнитной обсерваторией не были отнесены к классу А [135]. В ряде случаев в группу *S* включались события, в которых *SSC* отсутствовали, но были сообщения об ударных волнах, наблюдавшихся на спутниках *ACE*<sup>1</sup> ([www.swpc.noaa.gov/ace](http://www.swpc.noaa.gov/ace)), *Wind* (<http://wind.nasa.gov>) и *SOHO*<sup>2</sup> (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>). В результате в группу *S* вошло 640 событий, а в *NS*-группу – 2815.

Используя *DBFE* можно получить информацию о различных параметрах в выделенных группах. В таблице 2.3 представлены минимальные, средние и максимальные значения параметров, характеризующих ФЭ и межпланетные возмущения для *S*- и *NS*-групп:  $A_F$  – амплитуда ФП;  $A_{xy}$ ,  $A_z$  – максимальные величины составляющих анизотропии в плоскости земного экватора и вдоль оси вращения Земли,  $\Delta_{min}$  – максимальное часовое понижение плотности КЛ;  $K_p$ ,  $A_p$  – максимальные значения индексов геомагнитной активности в данном возмущении;  $Dst$  – минимальное значение индекса геомагнитной активности;  $B_t$  и  $V_{SW}$  – максимальные величины напряженности ММП и скорости солнечного ветра соответственно;  $V_m B_m$  – параметр, характеризующий возмущенность солнечного ветра;  $t(V_{SW})$ ,  $t(B_t)$ ,  $t(A_{xy})$ ,  $t(\Delta_{min})$  – интервалы времени между

<sup>1</sup> Advanced Composition Explorer

<sup>2</sup> Solar and Heliospheric Observatory

началом возмущения и максимальным значением скорости солнечного ветра, напряженности ММП, анизотропии  $A_{xy}$  и часового падения плотности КЛ  $\Delta_{min}$  соответственно;  $R_B$  – максимальная жесткость частиц, которые способны отразить магнитное поле межпланетного возмущения (см. объяснение далее);  $t_{min}$  – продолжительность основной фазы (фазы спада);  $A_F/B_t$  – отношение величины ФП к максимальному значению напряженности ММП. Отметим, что параметр  $V_m B_m$  нормирован следующим образом:

$$V_m B_m = \frac{V_{sw}}{V_0} \times \frac{B_t}{B_0}, \quad (2.4.1)$$

где  $V_0$  и  $B_0$  – параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются  $V_0 = 400$  км/с,  $B_0 = 5$  нТл).

Из таблицы видно, что значения большинства параметров в рассматриваемых группах существенно различаются. Например, средняя величина ФЭ в  $S$ -группе практически в два раза больше, чем в группе  $NS$  ( $2.27 \pm 0.08\%$  и  $1.12 \pm 0.01\%$  соответственно). Этот факт подтверждает также распределение числа ФЭ по их величине в выделенных группах (см. рис. 2.9).

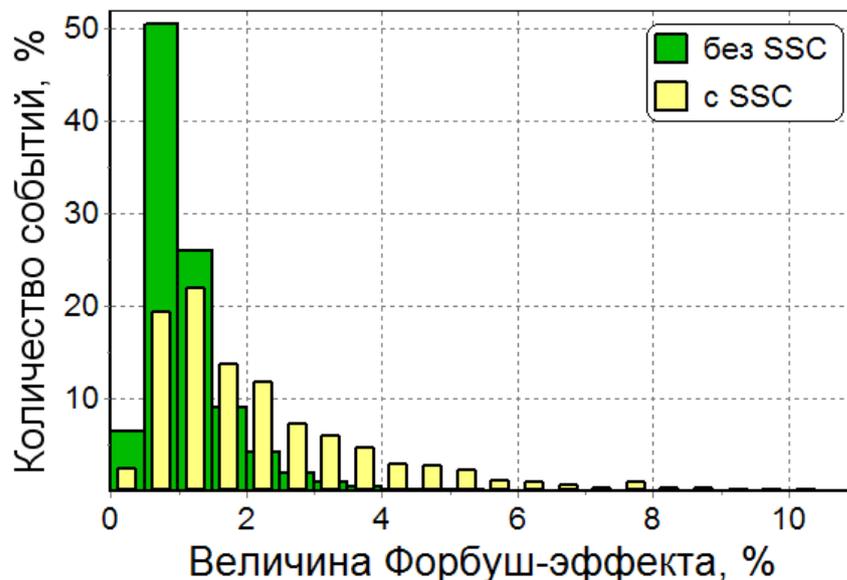


Рис. 2.9. Распределения величин Форбуш-эффектов в группах событий с SSC и без SSC.

Таблица 2.3.

Минимальные, средние и максимальные величины параметров, характеризующих Форбуш-эффекты для S- и NS- групп.

Параметры возмущения	Группа NS					Группа S				
	Средние значения	Макс-ые значения	Мин-ые значения	Кол-во событий	Кол-во событий	Средние значения	Макс-ые значения	Мин-ые значения	Кол-во событий	
$A_F, \%$	2.23±0.07	13.5	0.1	640	640	1.04±0.01	11.0	0.2	2815	
$A_{XV}, \%$	1.64±0.03	4.5	0.4	640	640	1.20±0.01	4.7	0.04	2815	
$A_{S_2}, \%$	1.82±0.03	6.6	0.4	640	640	1.35±0.01	5.6	0.4	2812	
$\Delta_{min}, \%$	-0.56±0.02	-0.1	-6.0	640	640	-0.31±0.00	-0.1	-1.8	2813	
$Kp$	5.12±0.06	9.0	0.0	640	640	3.84±0.02	8.7	0.0	2815	
$A_p, 2H\Gamma$	66.51±2.24	400.0	0.0	639	639	30.61±0.47	300.0	0.0	2813	
$Dst, H\Gamma$	-58.5±2.1	13.0	-472.0	619	619	-30.7±0.5	16.0	-327.0	2731	
$B_p, H\Gamma$	15.81±0.33	55.8	4.8	432	432	10.07±0.08	33.2	3.2	1990	
$V_{SW}, \text{KM/C}$	528.7±5.9	1027.0	316.0	409	409	489.1±2.5	890.0	250.0	1984	
$V_H$ <small>www.riken.go.jp</small>	4.34±0.14	26.0	1.1	378	378	2.51±0.03	10.2	0.5	1857	
$t(V_{SW}), \text{ч}$	19.04±0.92	71.0	-13.0	410	410	19.61±0.52	95.0	-13.0	1985	
$t(B_p), \text{ч}$	9.67±0.55	69.0	-13.0	432	432	17.93±0.42	95.0	-13.0	1990	
$t(A_{XV}), \text{ч}$	13.74±0.69	71.0	-13.0	640	640	20.01±0.42	71.0	-13.0	2815	
$R_B, \Gamma B$	32.04±2.83	339.3	0.0	258	258	6.70±0.43	172.5	0.0	1472	
$t_{min}, \text{ч}$	16.57±0.66	126.0	-13.0	640	640	17.83±0.43	116.0	-14.0	2647	
$t(\Delta_{min}), \text{ч}$	9.71±0.49	47.0	-17.0	640	640	16.36±0.35	108.0	-31.0	2647	
$A_F/B_p, \%/H\Gamma$	0.148±0.005	0.75	0.02	406	406	0.103±0.001	0.6	0.01	1777	

Из рисунка видно, что максимум числа событий группы *NS* является более узким и смещен относительно максимума *S*-группы влево, в область меньших амплитуд ФЭ. При более детальном анализе можно получить, что в группах *NS* и *S* на ФП с  $A_F < 1\%$  приходится 1603 (около половины) и 138 (~1/5 часть) событий соответственно. Событий с амплитудой  $0 \div 2\%$  в *NS*-группе окажется 2589 (~92%), а в *S*-группе – 365 (~ 57%). Если обратиться к правой части распределения (в область с большими величинами ФП), то видно большое количественное преобладание событий из *S*-группы в данной области. ФП с амплитудой  $A_F > 6\%$  в *NS*-группе составляют ~1/700 часть, а в *S*-группе 1/23 часть событий данной группы, т.е. большие по величине события принадлежат, в основном, *S*-группе. Максимальные значения ФП для *S*- и *NS*-групп 13.5% и 11.0% соответственно. При этом следует учесть, что многие события, превышающие по величине данные значения, в основном из *S*-группы, по вышеописанным причинам были отсеяны (см. раздел 2.1), и преобладание *S*-группы среди больших ФП на деле еще очевиднее. Более того, при более подробном рассмотрении отдельных событий оказывается, что все большие ФЭ полностью или частично связаны с ICMEs.

Может показаться, что отличия *S*- и *NS*-групп только в мощности солнечных и межпланетных событий, и они являются разными выборками одного и того же распределения. Понятно, что более мощные возмущения солнечного ветра, будь то ICMEs или высокоскоростные потоки из корональных дыр, чаще создают ударные волны и сильнее влияют на КЛ. Однако между группами существуют не только количественные, но и качественные различия, так что эти группы представляют разные распределения, а не являются двумя разными выборками одного.

Различия в величинах ФП двух групп становятся понятны, если сравнить параметры соответствующих межпланетных возмущений  $B_t$ ,  $V_{SW}$ ,  $V_m B_m$  и  $R_B$ . Все они больше в *S*-группе, это касается и средних, и максимальных величин. К примеру, усредненный параметр  $V_m B_m$  различается в ~1.7 раза ( $4.34 \pm 0.14$  и

2.51±0.03). Но самые большие различия получаются для параметра  $R_B$  – оценки максимальной жесткости частиц, которые способны отразить усиление магнитного поля в данном межпланетном возмущении [11,44]. Мы рассчитали эту величину для каждого события, в котором были достаточно полные измерения солнечного ветра, следующим образом:

$$R_B = \sum_{t=t_0}^{t_{min}} (B(t) - B_0)V(t) \quad (2.4.2)$$

где  $B(t)$  и  $V(t)$  – напряженность ММП и скорость солнечного ветра,  $B_0$  – постоянное значение напряженности, при котором поле можно считать невозмущенным (здесь выбрано  $B_0=7$  нТл), а суммирование ведется по часам от начала ФП ( $t_0$ ) до часа минимума плотности КЛ ( $t_{min}$ ). Средние величины  $R_B$  для двух групп различаются почти в 5 раз (32.0±2.8 и 6.7±0.4 для  $S$ - и  $NS$ -группы соответственно). Естественно, что более выраженные межпланетные возмущения группы  $S$  создают большие ФЭ. Это же справедливо и для сопутствующих возмущений магнитного поля Земли. Например, средние значения  $A_p$  индексов для  $S$ - и  $NS$ -групп равны 72.3 (2нТл) (умеренная ГМБ) и 34.4 (2нТл) (малая ГМБ) соответственно.

Анализируя только средние значения параметров для выделяемых групп трудно судить, в чем их различие, является ли оно только количественным или говорит о разнице в механизмах дополнительной модуляции КЛ. Ответ на эти вопросы скорее дадут сопоставления различных параметров. На рис. 2.10 представлена зависимость между максимумом ММП ( $B_t$ ) и максимумом скорости  $V_{sw}$  солнечного ветра для каждого из отобранных событий. Из общих соображений понятно, что они должны коррелировать между собой. Как в случае корональных дыр, так и в случае CMEs/ICMEs – чем больше скорость возмущенного солнечного ветра, тем сильнее он сжимает межпланетное вещество и межпланетное магнитное поле. К тому же, для относительно больших ICMEs корреляцию между скоростью выброса солнечного вещества и напряженностью выброшенного магнитного поля можно предполагать уже в солнечном источнике CMEs.

С другой стороны, очевидно, что скорость не является единственным параметром, определяющим возмущение солнечного ветра, в частности, эффективность его взаимодействия с окружающей средой. На это взаимодействие существенно влияет скорость фонового солнечного ветра, гелиосферный токовый слой, ранее созданные межпланетные возмущения и т.п. Важно, что во многих выбросах максимум напряженности ММП часто наблюдается в магнитном облаке [58] без прямой связи со скоростью ветра, например, большие значения  $B_t$  можно видеть в медленных волоконных выбросах. С учетом сказанного, нас не должно удивлять, что корреляция между  $V_{SW}$  и  $B_t$  для  $S$ - и  $NS$ -групп существует, но коэффициенты корреляции невелики (0.46 и 0.32 соответственно).

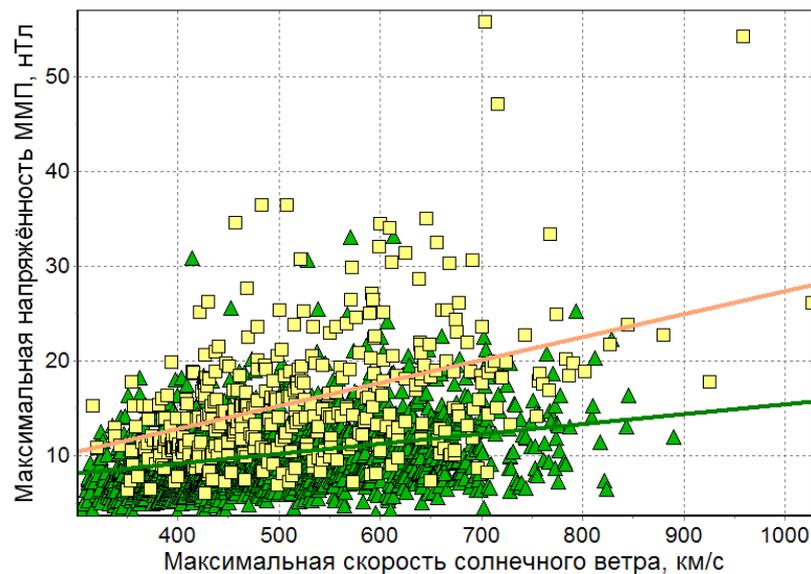


Рис. 2.10. Связь межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра для каждого Форбуш-эффекта из групп  $S$  (квадраты) и  $NS$  (треугольники).

На первый взгляд из рис. 2.10 видно, что события  $S$ -группы имеют приблизительно такой же диапазон скоростей, что события группы  $NS$ . Но это не совсем так, поскольку по разным причинам (неполные данные по солнечному ветру, условия отбора, описанные в разделе 2.1) часть событий с большими скоростями не попали в выборку. К примеру, все события, связанные с корональными выбросами, в которых  $V_{SW} > 1000$  км/с, и сопровождающиеся

*SSC*, не попали в данную выборку, хотя должны принадлежать группе *S*. Следует отметить, что величина скорости *CMEs* может достигать у Солнца нескольких тысяч километров в секунду, в то время как скорость потоков плазмы из корональных дыр существенно меньше. Даже в самых больших полярных корональных дырах по данным миссии *Ulysses* [86,136] скорость потока не превышает 900 км/с. Из рис. 2.10 также видно, что межпланетные возмущения группы *S* сильнее, чем в группе *NS*. Самые слабые (т.е. самые медленные и обладающие самым слабым ММП) возмущения относятся к *NS*-группе, а самые сильные (быстрые и с большими значениями  $B_t$ ), напротив, к *S*-группе. При одинаковых скоростях величина ММП достаточно сильно отличается, и регрессионная прямая для *S*-группы проходит намного выше, чем для *NS*-группы. Это означает, что в группе *S* при тех же скоростях происходят более сильные возмущения в межпланетном пространстве (большее усиление магнитного поля), чем в группе без ударных волн. Тем самым создаются условия для более глубокой модуляции галактических КЛ.

Облако точек *S*-группы не только расположено выше *NS*-облака, но и по-другому развернуто, т.е. регрессионные прямые отличаются не только положением, но и наклоном. Сравним количественно параметры регрессий  $B_t = a + bV_{SW}$ . Для *S*-группы  $b = b_S = 0.027 \pm 0.003$ , а для *NS*-группы  $b = b_{NS} = 0.011 \pm 0.001$ . Видно, что между коэффициентами  $b$  имеется достаточно большое, статистически значимое различие. При увеличении максимальной скорости на 100 км/с максимальная напряженность ММП, в среднем, возрастает на 2.7 нТл в *S*-группе и только на 1.1 нТл в *NS*-группе. Таким образом, при росте скорости различие в величинах  $B_t$  возрастает. В пользу того, что межпланетные возмущения двух групп устроены по-разному, говорят и различия во временах максимумов скорости солнечного ветра  $t(V_{SW})$  и напряженности ММП  $t(B_t)$  (см. таблицу 2.3). Для *NS*-группы максимумы наступают позже (рис. 2.12), особенно велика разница для  $t(B_t)$ . Максимум скорости отстает от максимума ММП на  $14 \pm 1$  часов в *S*-группе, и только на  $8 \pm 1$

часов в *NS*-группе. Мы видим, что между группами существуют не только количественные, но и качественные различия; следовательно, это, скорее, два разных распределения, чем две части одного и того же. Можно ожидать, что и механизм дополнительной модуляции КЛ в этих группах будет различным. Подтверждение этому можно найти в таблице 2.3, в различиях средних величин отношения  $A_F/B_f$  ( $0.159 \pm 0.007$  и  $0.109 \pm 0.001$ ), которые говорят о том, что усиление напряженности ММП до одних и тех же величин, приводит к существенно большей модуляции в *S*-группе.

### 2.3.1. Зависимость величины $A_F$ от внутренних параметров Форбуш-эффекта

Одним из внутренних параметров, помимо величины ФП, является параметр  $\Delta_{min}$  (рис. 2.11), показывающий, на сколько процентов в час максимально падает плотность КЛ в данном событии.

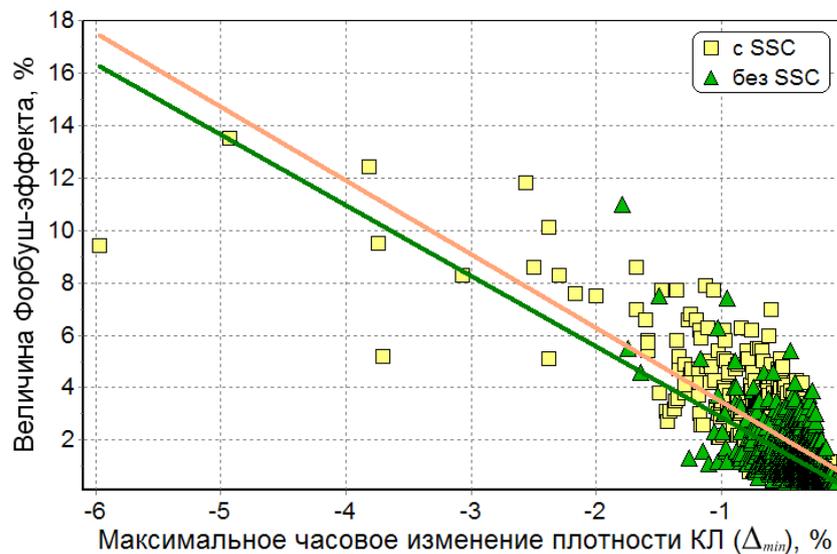


Рис. 2.11. Зависимость величины Форбуш-эффекта от максимального часового уменьшения плотности ( $\Delta_{min}$ ).

Характеристика  $\Delta_{min}$  является частью ФП, и не удивительно, что между  $\Delta_{min}$  и  $A_F$  в группе *S* наблюдается хорошая корреляция (коэффициент корреляции  $r \approx -0.79$ ). В группе *NS* она хуже ( $r \approx -0.57$ ), но и здесь достаточно очевидна. Это, в частности, дает возможность оценивать

максимальную величину ФЭ уже на фазе спада интенсивности КЛ, при этом оценки будут различными для двух групп. Например, если  $\Delta_{min}$  составляет 2%, то для событий в  $S$ -группе (в соответствии с данными линейной регрессии на рис. 2.11) можно ожидать величину  $A_F \approx 7.3\%$ , а в группе  $NS$  –  $A_F \approx 6.1\%$ .

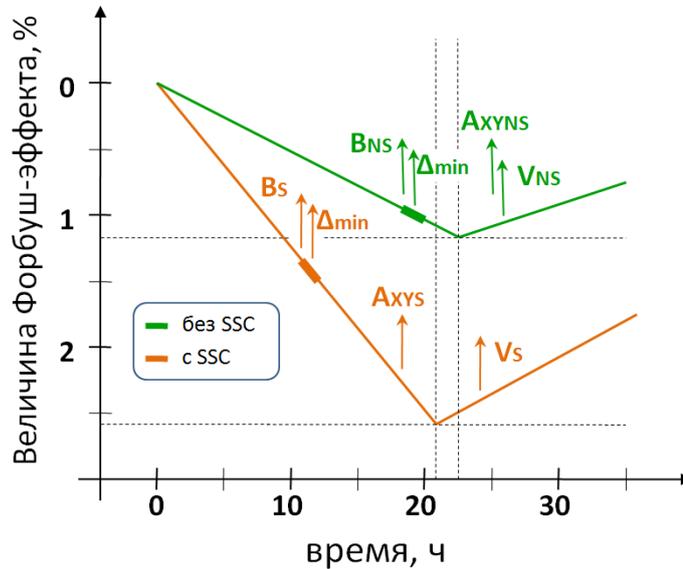


Рис. 2.12. Схематическое изображение средних Форбуш-эффектов в группах  $S$  и  $NS$  (по данным таблицы 2.3).

Заметны также различия во временном развитии эффектов различных групп (см. рис. 2.12 и таблицу 2.3). Понижение КЛ в  $S$ -группе развивается быстрее, и его минимум (более глубокий) достигается несколько раньше ( $t_{min}$ ), чем в  $NS$ -группе. Гораздо больше различаются времена  $t(\Delta_{min})$ . Минимум ФП в  $S$ -группе наступает в среднем через  $8.9 \pm 0.9$  часов после  $t(\Delta_{min})$ , а в  $NS$ -группе различие времен существенно меньше –  $3.7 \pm 0.7$  часов. Кроме различий следует отметить и важное сходство двух групп: в обеих группах наибольший спад плотности ( $t(\Delta_{min})$ ) наблюдается сразу же после максимума напряженности ММП ( $t(B_t)$ ).

Часть внутренних параметров ФЭ описывает анизотропию КЛ. На рис. 2.13 представлена зависимость вариации плотности  $A_F$  от величины экваториальной составляющей  $A_{xy}$  анизотропии галактических КЛ.

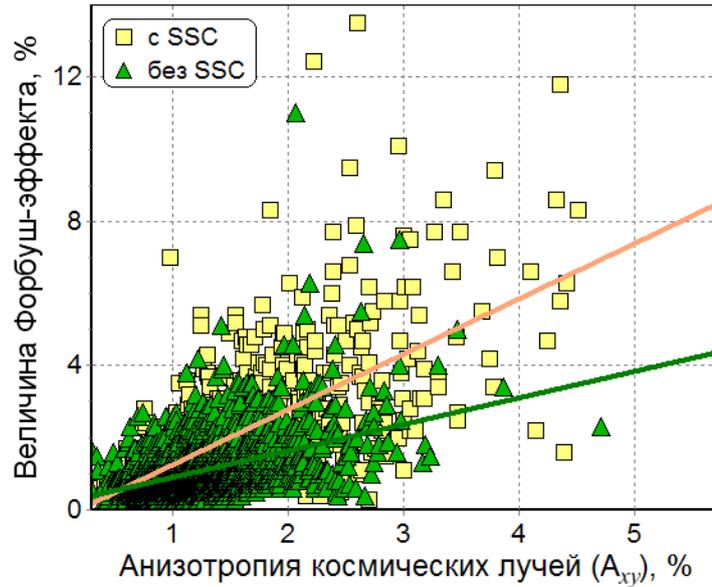


Рис. 2.13. Зависимость амплитуды Форбуш-эффекта от величины анизотропии галактических космических лучей для групп *S* и *NS*.

Из рисунка видно, что наклон регрессионных прямых для двух групп достаточно сильно различается. Различаются и времена достижения максимальных величин  $A_{xy}$  в двух группах (см. таблицу 2.3 и рис. 2.13). В *S*-группе  $t(A_{xy})=18.9\pm 0.8$  часов, а в *NS*-группе  $t(A_{xy})=25.5\pm 0.5$  часов; максимальная анизотропия в одной группе наблюдается до минимума ФП, а в другой – после. Можно найти и другие отличия в проявлениях анизотропии, но здесь это не обсуждается.

### 2.3.2. Зависимость амплитуды Форбуш-эффекта от параметров возмущения межпланетной среды

В данном параграфе рассматривается зависимость величины ФЭ от внешних параметров. Хорошо известна связь величины ФП ( $A_F$ ) с напряженностью ММП в возмущениях солнечного ветра [38,39,62,110]. Существует и их связь со скоростью солнечного ветра [7,46]. Но в работе [49] было показано, что сильнее всего величина ФП зависит от произведения скорости солнечного ветра на напряженность ММП ( $V_m B_m$ ), максимальных для данного возмущения. На рис. 2.14 представлено поведение амплитуды  $A_F$  в зависимости от величины этого параметра. Видна существенная разница между

группами: события в группе  $S$  являются более возмущенными, поскольку в этих событиях, как правило, больше и скорость, и межпланетное магнитное поле.

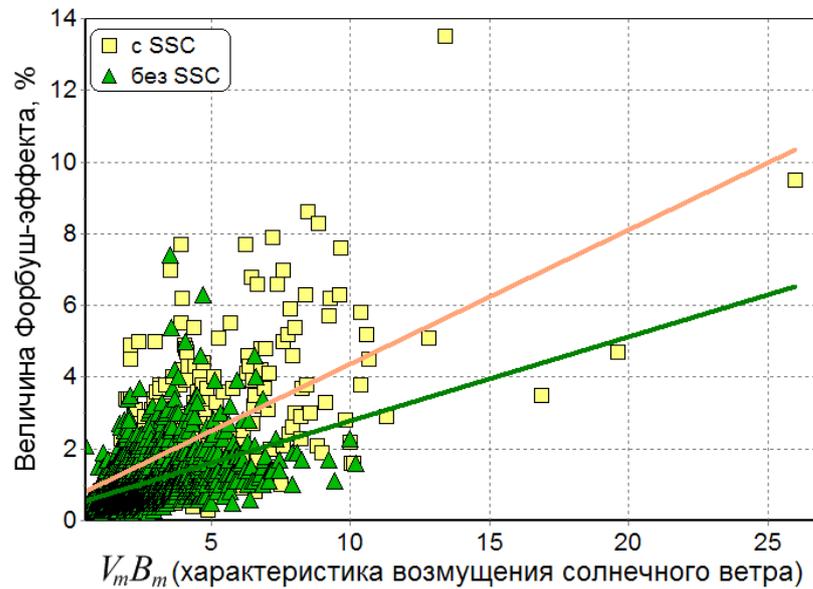


Рис. 2.14. Зависимость величины Форбуш-эффекта от параметра  $V_m B_m$  (характеристики возмущенности солнечного ветра).

Если определять долю событий в  $S$ - и  $NS$ - группах при параметре  $V_m B_m > 8$ , то будет выделено 35 событий ( $\sim 1/15$ ) для  $S$ -группы и 14 событий ( $\sim 1/174$ ) для группы  $NS$ . При  $V_m B_m > 15$  события группы  $NS$  вовсе отсутствуют, а в  $S$  есть 7 таких событий ( $\sim 1/77$ ). Мы вновь видим, что  $S$ -группе соответствуют более сильные межпланетные возмущения. Не менее важно, что различна связь между  $A_F$  и  $V_m B_m$  (коэффициент линейной регрессии  $b_S = 0.46 \pm 0.03$  в группе  $S$ , а в  $NS$ -группе  $b_N = 0.21 \pm 0.01$ ). Мы видим, что при одинаковом возмущении межпланетной среды, события в  $S$ -группе, сопровождаются большим по величине ФЭ, чем события в  $NS$ -группе. Например, если параметр возмущения солнечного ветра  $V_m B_m$  равен 10, то для событий группы  $S$  средняя величина ФЭ будет  $\sim 4.9\%$ , а для событий  $NS$ -группы  $\sim 2.6\%$ , что почти вдвое меньше. Такое различие в эффективности заставляет думать, что при совпадении в величине  $V_m B_m$  межпланетные возмущения разных групп различны в чем-то другом, например, в размерах или структуре, и это дает возможность предполагать, что в разных группах преобладают разные источники возмущений солнечного

ветра. Подобные же различия между группами выявлялись, когда вместо  $V_m B_m$  мы брали другие характеристики возмущения солнечного ветра, например  $B_t$  или  $R_B$  (см. выше).

Таким образом, межпланетные возмущения имеют не только разную структуру, но и модулируют КЛ различным образом. Мы вправе предполагать, что в двух группах преобладают различные механизмы модуляции КЛ, и связываем  $S$ -группу преимущественно с CMEs/ICMEs, а  $NS$ -группу – с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Разумеется, речь идет только о некотором преобладании, и оба механизма действуют в обеих группах. Следует отметить, что сделанные выводы, строго говоря, справедливы только для специальных выборок, из которых мы исключили перекрывающиеся и близкие по времени события. Скорее всего, событий, обусловленных ICMEs, было исключено больше, и это могло в какой-то степени повлиять на результаты.

### **2.3.3. Связь Форбуш-эффектов с геомагнитной активностью**

Как хорошо известно, ФЭ и геомагнитные возмущения вызываются одними и теми же возмущениями межпланетной среды. В отклике магнитосферы и КЛ на возмущения солнечного ветра есть общие черты, но есть и существенные различия. С увеличением напряженности ММП и скорости солнечного ветра увеличивается как геомагнитная активность, так и модуляция КЛ. Однако рост плотности солнечного ветра, влияющий на магнитосферу, сам по себе никак не влияет на КЛ. Знак  $B_z$  составляющей ММП имеет ключевое значение для развития магнитной бури, но второстепенен для вариаций КЛ и почти не влияет на их плотность. Самое существенное различие в том, что ФЭ определяется условиями в протяженной гелиосферной области, тогда как геомагнитная активность зависит от локальной ситуации вблизи Земли. Возмущение солнечного ветра, способное вызвать магнитную бурю, не может не повлиять на КЛ. Можно считать, что каждой магнитной буре соответствует ФП. Однако иногда этот эффект (по наблюдениям на Земле) очень мал и почти

не проявляется в изменениях плотности КЛ, тогда как ФЭ без магнитной бури – частое явление.

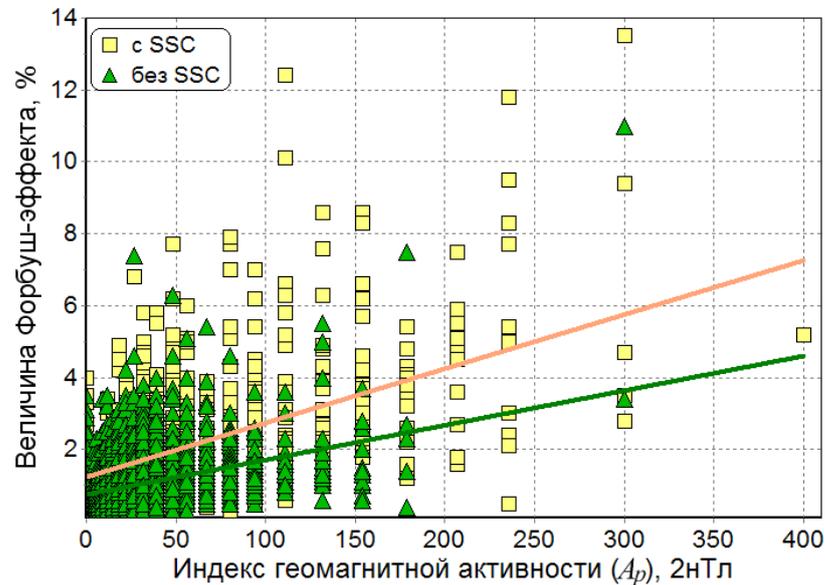


Рис. 2.15. Зависимость величины Форбуш-эффектов от  $A_p$  индекса геомагнитной активности

На рис. 2.15 показана зависимость величины ФП от  $A_p$  индекса для выделенных групп. Все события были разделены по уровням геомагнитной активности в зависимости от максимального  $K_p$  индекса. События с  $K_p < 2_0$  отнесены к спокойному уровню, а с  $2_0 \leq K_p \leq 3_+$  – к слабовозмущенному,  $K_p = 4_- \div 4_+$  относятся к возмущенному уровню, а более высокие  $K_p$  – к ГМБ разной мощности ([http://www.swpc.noaa.gov/NOAA\\_scales/index.html#GeomagneticStorms](http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/index.html#GeomagneticStorms)).

Можно видеть, что большие ГМБ представлены и в  $S_-$ , и в  $NS$ -группах, но при одной и той же геомагнитной активности величины ФЭ в группе  $S$  значительно больше, чем в группе  $NS$ . Можно было бы сказать, что межпланетные возмущения группы  $S$  более эффективно модулируют КЛ и менее эффективно возмущают магнитосферу Земли. Однако, мы знаем, что самые сильные ГМБ – это обычно бури с внезапным началом. В нашей выборке есть только две исключительно большие бури ( $K_p = 9_0$ ), и они находятся в  $S_-$  группе.

Очевидно преобладание *S*-группы и для других классов больших бурь. Поэтому, по-видимому, точнее будет следующая формулировка – межпланетные возмущения в *NS*-группе достаточно эффективны в создании геомагнитной активности и менее эффективны в модуляции КЛ. Иногда после постепенного начала может развиваться интенсивная ГМБ, но очень большой ФЭ в этих случаях менее вероятен.

#### **2.4. Связь параметров Форбуш-эффектов с гелиодолготой рекуррентных солнечных источников**

Непосредственной причиной больших и гигантских ФЭ является распространяющееся возмущение солнечного ветра, вызванное корональными выбросами [63,108,154]. Начало таких ФЭ обычно совпадает с приходом межпланетной ударной волны и *SSC*. Связь между различными параметрами ФЭ и характеристиками CMEs/ICMEs (в частности, гелиодолгота источника) рассматривалась во многих работах (см., напр., [4,37,49,65,104, 111,112,122,176]). Первое детальное изучение было проведено в работах [111,112]. Но с тех пор накоплено огромное количество новых данных о событиях, произошедших на Солнце и возмущениях в межпланетной среде, что дает новые возможности для исследований. Статистический анализ таких событий требует большого объема данных, поскольку, как отмечалось в публикации [65], ситуация на орбите Земли может быть очень сложной из-за нескольких транзиентных событий, происходящих близко во времени и пространстве (см. также [59,94]). При взаимодействии же рекуррентных и спорадических структур бывает трудно разделить ФЭ, обусловленные различными типами возмущений [53,73,75,91].

Здесь мы исследовали только рекуррентные ФЭ, т.е. события, связанные с CMEs/ICMEs. Для анализа отбирались следующие эффекты: идентифицированные с солнечным источником; разделенные между собой временным интервалом, по меньшей мере, в 48 часов, чтобы избежать наложения серийных событий, или (когда разделение меньше) с амплитудой

предыдущего ФП менее 1.5%. В базе данных *DBFE* набралось 334 таких события за период 1976-2010 гг. Все они были разделены на пять групп по гелиодолготным диапазонам их солнечных источников: *E91-E46*, *E45-E16*, *E15-W15*, *W16-W45*, *W46-W91*. Для каждой группы определялся ряд параметров, часть которых, использовавшаяся для анализа, представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Усредненные параметры для всех Форбуш-эффектов с идентифицированными солнечными источниками в различных гелиодолготных секторах за период 1976-2010 гг.

	<i>E91-E46</i>	<i>E45-E16</i>	<i>E15-W15</i>	<i>W16-W45</i>	<i>W46-W91</i>
$A_F$	2.47±0.28	2.90±0.23	3.00±0.30	2.95±0.39	2.26±0.26
$A_{xy}$	1.58±0.08	1.75±0.07	1.81±0.09	2.15±0.17	2.01±0.16
$A_z$	1.72±0.11	1.94±0.08	1.98±0.09	2.04±0.11	1.92±0.16
$\Delta_{min}$	-0.56±0.07	-0.57±0.04	-0.66±0.06	-0.81±0.12	-0.60±0.10
$Kp$	5.00±0.21	5.24±0.17	5.73±0.15	5.79±0.19	5.41±0.21
$Ap$	59.13±6.02	67.21±6.52	88.43±6.35	92.12±8.56	75.70±9.80
$Dst$	-58.0±5.8	-72.0±6.9	-85.5±5.9	-87.9±8.5	-67.2±6.8
$B_t$	15.03±0.89	17.68±1.13	17.91±0.75	17.47±1.39	18.21±1.33
$V_{SW}$	521.7±19.2	569.4±14.8	541.1±13.6	564.0±18.0	597.3±21.2
$V_m B_m$	4.04±0.31	5.13±0.45	5.07±0.31	5.13±0.56	5.52±0.55
$t_{min}$	24.75±2.64	22.12±1.71	18.06±1.53	13.48±1.94	16.02±2.55
$t(\Delta_{min})$	12.68±2.22	11.99±1.51	11.16±1.22	9.16±1.67	11.57±1.93
$A_F/B_t$	0.166±0.021	0.163±0.012	0.156±0.013	0.149±0.013	0.132±0.014

Среди отобранных 334 событий: 99 эффектов оказались из центрального сектора видимого солнечного диска (*E15-W15*); 81 – из ближнего восточного (*E45-E16*); 67 – из ближнего западного (*W16-W45*); 40 и 47 событий – из удаленного восточного (*E91-E46*) и удаленного западного (*W46-W91*) секторов соответственно (рис. 2.16). Верхняя кривая построена по средним значениям амплитуды в каждом секторе.

Следует учесть, что из центральной зоны видимого диска Солнца к Земле приходят практически все возмущения, а из других зон – только их часть, причем, отфильтровываются самые слабые из выбросов. От дальних долгот

приходят только самые большие и мощные ICMEs. В ближних восточном и западном секторах величины наблюдаемых ФП также несколько завышенные.

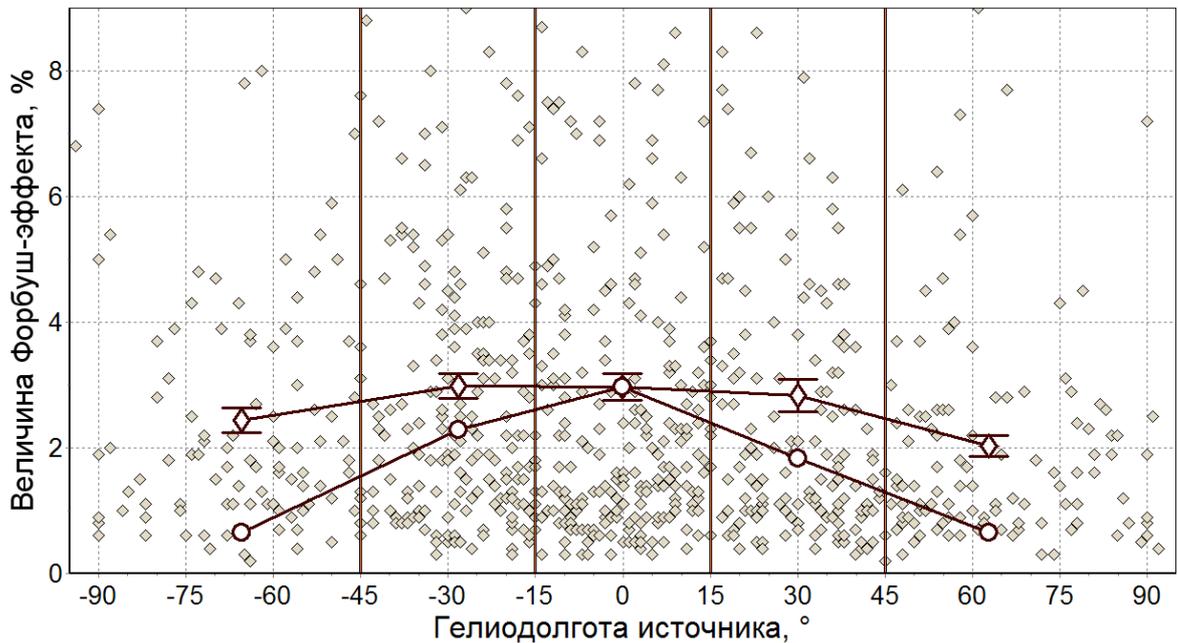


Рис. 2.16. Зависимость величины Форбуш-эффекта и  $A_p$  индекса геомагнитной активности от гелиодолготы солнечного источника. Треугольниками в верхней части рисунков показаны самые большие ФЭ с амплитудой  $A_F > 8\%$  и величиной  $A_p > 150$  (2 нТл).

Для восточного сектора естественно предположить, что выбросов на каждый градус долготы было столько же, сколько из центральной зоны, но большая их часть прошла восточнее Земли и не оказала влияния на КЛ, приходящие на Землю. Поэтому они не попали в нашу базу данных. По грубой оценке только 1/3 часть из всех восточных выбросов оказывает влияние на околоземный солнечный ветер и КЛ около Земли. Учитывая только эти события, мы получаем существенно завышенные оценки эффективности выбросов от источников, удаленных по гелиодолготе. Для более точной оценки среднего эффекта от восточного выброса, следовало бы добавить к 40 наблюдавшимся ФП еще  $99 \times 1.5 - 40 = 109$  событий с нулевой величиной (делаем поправку еще и на то, что этот сектор в 1.5 раза больше по долготе). Для ближневосточного сектора мы, соответственно, добавляем  $99 - 81 = 18$  событий с

нулевой величиной. Средний эффект для восточного сектора тогда был бы  $40 \times 2.47 / (99 \times 1.5) = 0.67\%$ , для западного сектора (аналогично) –  $47 \times 2.26 / (99 \times 1.5) = 0.72\%$ , для ближнего восточного сектора –  $81 \times 2.90 / 99 = 2.37\%$ , для ближнего западного сектора –  $67 \times 2.95 / 99 = 1.99\%$ . В центральном секторе он останется без изменений 3.00%.

Таким образом, реальная разница в величине ФП между центральным и восточным секторами не десятки процентов, а в  $\sim 4.5$  раза, а для западных секторов – в 4.2 раза (см. рис. 2.16, нижняя кривая). По-видимому, статистика восточных выбросов, создающих ФЭ, определяется, в основном, распределением их долготного размера. Она говорит о том, что большинство выбросов по полуширине не превышают  $45^\circ$ .

Ситуация с западными выбросами несколько другая. Из-за геометрии межпланетного магнитного поля мы иногда можем видеть вариации КЛ от далекого западного источника, даже когда создающий их корональный выброс проходит далеко от Земли. Таким образом, область ФП оказывается (в своей восточной части) шире, чем область выброса или область, занятая межпланетным возмущением. Однако нельзя забывать, что из-за той же геометрии ММП величина ФП в этой восточной части меньше, чем в западной. Видимо, поэтому в западном секторе больше ФП, чем в восточном, но их средняя величина намного ниже.

## **2.5. Связь параметров корональных выбросов и амплитуды Форбуш-эффектов**

Хорошо известно, что большая часть ФЭ, в том числе все большие эффекты, создаются, в основном, корональными выбросами массы (CMEs/ ICMEs). Понятно, что между параметрами CME и характеристиками ФП должны существовать достаточно тесные связи, но эти связи пока мало изучены. Отчасти это объясняется тем, что регулярные наблюдения CMEs начались сравнительно недавно. Однако сейчас, когда наблюдения выбросов солнечной плазмы на *SOHO/LASCO* отсчитывают уже второй солнечный цикл,

такое объяснение выглядит устаревшим. В частности, подобные исследования начинают появляться в ряде работ (см., напр., [84,85,125,160]). В данном параграфе мы пытаемся объединить информацию о CMEs и ФЭ, накопленную в последние десятилетия, и сопоставить их характеристики.

Для изучения связи характеристик CMEs/ICMEs и параметров ФЭ мы объединили два источника: базу данных ФЭ и межпланетных возмущений *DBFE* (см. раздел 1.5) и каталог CMEs/ICMEs<sup>1</sup> (далее *CME-каталог*) [98]. К *CME-каталогу* добавлены более детальные данные о корональных выбросах типа «гало»<sup>2</sup> [93,95,100].

Отметим, что *CME-каталог* весьма полный, хорошо организован и удобен для исследований. Однако количественных данных о каждом выбросе в нем не много. К примеру, у CME нет точных координат, как у солнечных вспышек, поскольку эрупция CME – явление протяженное и его трудно привязать к определенной точке на солнечном диске. Как правило, известно преимущественное направление выброса, но это, скорее, качественная, чем количественная характеристика, позволяющая различать восточные, западные, северные и южные выбросы, да и то не всегда. Паллиативом, в разных событиях более или менее удачным, часто служат координаты ассоциированной солнечной вспышки [52,197].

У CMEs определяется (не всегда) угловой размер, но он дает далеко не полное представление о линейных размерах. Ясно, что в выборке с максимальными угловыми размерами (гало) объединены и действительно большие выбросы, и сравнительно маленькие, но центральные выбросы. Полную информацию о линейных размерах нельзя получить даже для лимбовых событий, поскольку угловой размер зависит от формы выброса.

В *CME-каталоге* приводятся данные о массе и кинетической энергии корональных выбросов, но они носят оценочный характер и вычисляются только для малой доли всех событий, куда входят только прилимбовые CMEs.

---

<sup>1</sup> URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)

<sup>2</sup> URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/halo/halo.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html)

Наиболее точно и детально определяется скорость коронального выброса и ее изменения на начальной фазе развития выброса. Однако и здесь трудно говорить о полной информации, поскольку скорость измеряется в картинной плоскости коронографов (напр., *SOHO/LASCO*), а практически важную скорость распространения к Земле можно только оценивать, и эти оценки модельно зависимы [99]. Очевидно, что данные об ускорении еще менее полные и точные.

Уже это короткое обсуждение, предполагает трудности в исследовании связи между характеристиками CMEs и параметрами ФЭ. По-видимому, нам будет недоставать надежной количественной информации о выбросах, причем для наиболее важных для нас событий (в частности, центральных) этот недостаток будет только усугубляться. Это затрудняет исследования, но, никоим образом, не отменяет их необходимости.

В данном параграфе используются данные по CMEs за 1996-2011 гг. (около 17500 событий) и по ФЭ за тот же период (1762 события). Следует отметить, что связь ФП с конкретными CMEs определенно установлена только для 505 событий, поэтому далее мы будем различать две группы событий, исходя из степени отождествления с источником. К первой будут относиться события, в которых ФЭ отождествлены с конкретными выбросами. Вторая группа будет включать в себя все остальные события.

### **2.5.1. Размер, масса и скорость корональных выбросов**

Отметим, что в данном разделе под размером коронального выброса подразумевается угловой размер CME ( $0-360^\circ$ ), под скоростью CME – проекция скорости выброса на картинную плоскость коронографов, а под транзитной скоростью коронального выброса – средняя скорость распространения ICME между Землей и Солнцем. На рис. 2.17 представлено распределение CMEs по скоростям для всех выбросов (□) и для выборки с ФЭ (■).

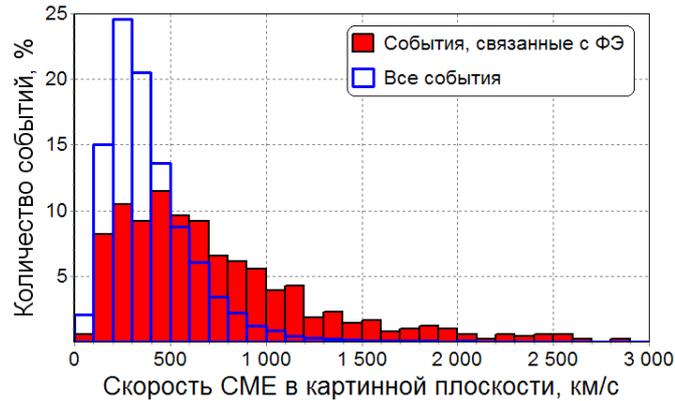


Рис. 2.17. Распределение по скоростям СМЕs для всех выбросов (□) и для выборки с ФЭ (■).

Из рисунка видно, что доля высокоскоростных СМЕs в выборке с ФЭ значительно выше, чем в группе, где присутствуют все события. Средняя скорость всех событий в первой выборке  $727 \pm 24$  км/с, а во второй –  $405 \pm 2$  км/с.

На рис. 2.18 представлено аналогичное распределение СМЕs, но уже с учетом размеров выброса. Можно видеть, что основная часть СМЕs – это узкие выбросы с размерами меньше  $90^\circ$ , а максимум гистограммы приходится на  $0 \div 15^\circ$ . Совсем другая картина наблюдается в выборке, связанной с ФЭ. Здесь очень велика доля полных ( $360^\circ$ ) и частичных гало ( $120^\circ - 360^\circ$ ) и очень мала доля более узких выбросов.

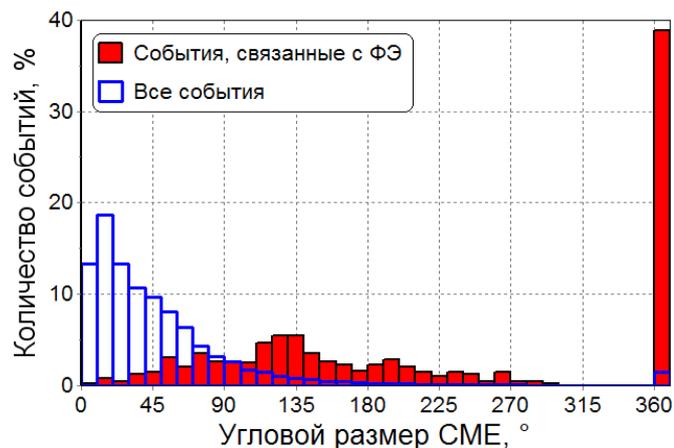


Рис. 2.18. Распределение событий по угловым размерам СМЕs для всех выбросов (□) и выбросов связанных с ФЭ (■) за период 1996-2011 гг. (17211 событие).

Ниже приведена связь скорости и углового размера СМЕs для рассматриваемых групп (см. рис. 2.19). Из рисунка видно, что большинство корональных выбросов являются узкими ( $<150^\circ$ ) и имеют относительно не высокую скорость ( $<500$  км/с), в то время как СМЕs связанные с ФЭ, как правило, значительно шире и быстрее.

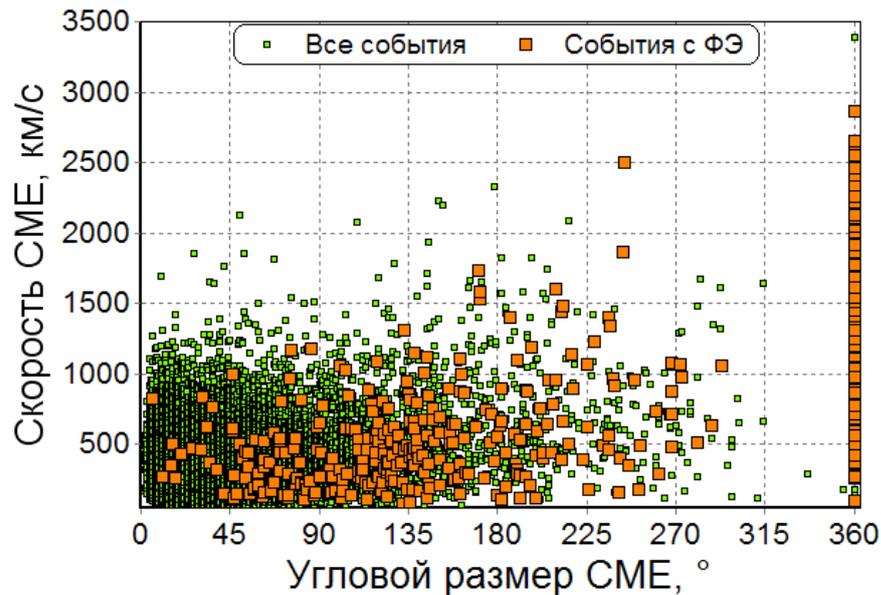


Рис. 2.19. Связь углового размера и скорости СМЕ для всех выбросов (●) и выбросов связанных с ФЭ (●).

На рис. 2.20 показана связь углового размера и массы коронального выброса для рассматриваемых групп событий. Из рисунка видно, что корональные выбросы как с относительно малой массой, так и «тяжелые» СМЕs не сопровождаются ФП. Причина заключается в том, что все расчеты массы сделаны только для прилибмовых выбросов, обычно не влияющих на КЛ у Земли. Масса не рассчитывается для частичных и полных гало, с которыми связана основная доля ФЭ. Поэтому на рис. 2.20 так мало событий, которые сопровождаются ФП. Статистическая связь между массой СМЕ и величиной ФЭ очевидно существует, но по имеющимся данным мы можем ее получить только для малой и не самой важной части событий. Более статистически обоснованы и более полезны связи величины ФЭ с размером и скоростью СМЕ.

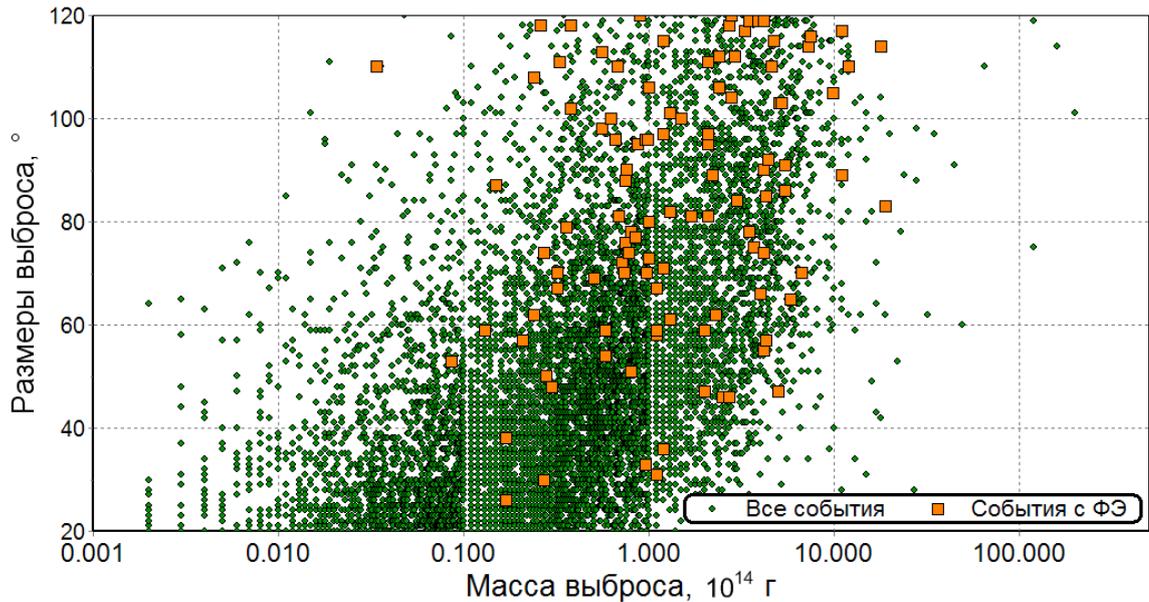


Рис. 2.20. Связь массы и углового размера СМЕ в рассматриваемых группах.

### 2.5.2. Связь скорости межпланетных возмущений и величины Форбуш-эффекта

Из рис. 2.17 и 2.19 видно, что средняя величина ФЭ возрастает с увеличением скорости СМЕ. Это подтверждает и рис. 2.21, на котором для всех ICMEs и выбросов, связанных с ФЭ, приведены усредненные скорости СМЕ и усредненные максимальные скорости солнечного ветра в соответствующем околоземном возмущении.

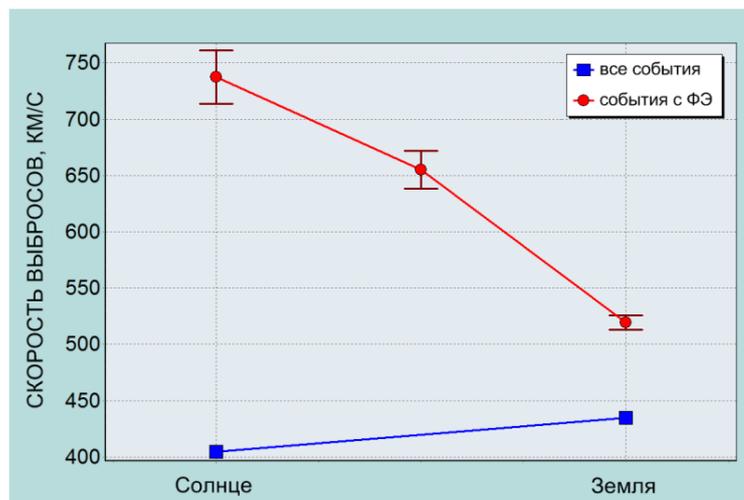


Рис. 2.21. Средние скорости СМЕ/ICME у Солнца и у Земли в различных выборках.

Поскольку привязка межпланетных возмущений к определенным СМЕs имеется только для выборки с ФЭ, для всех событий дана просто средняя скорость солнечного ветра для всего периода 1996-2011 гг. Кроме того для выбросов связанных с ФП была вычислена средняя транзитная скорость, которая также приведена на рисунке. Мы еще раз видим, что абсолютное большинство СМЕs/ICМЕs – это медленные выбросы, их начальная скорость, как правило, ниже средней скорости солнечного ветра и они даже несколько ускоряются по пути к Земле. У СМЕs, связанных с ФЭ, начальные скорости существенно (почти вдвое) выше, и эти выбросы, двигаясь к Земле, обычно замедляются. Тем не менее, средняя околоземная скорость ICМЕs в этой группе остается заметно выше средней скорости спокойного солнечного ветра.

Ниже показана связь скорости СМЕ у Солнца с транзитной скоростью выброса (см. рис. 2.22). Скорость СМЕ определяет первоначальную скорость, но, во-первых, не в направлении к Земле, а, во-вторых, только в начальный момент времени. Она не может контролировать распространение выброса в межпланетном пространстве. Поэтому мы видим корреляцию двух скоростей, но она далеко не идеальна ( $r \approx 0.68$ ).

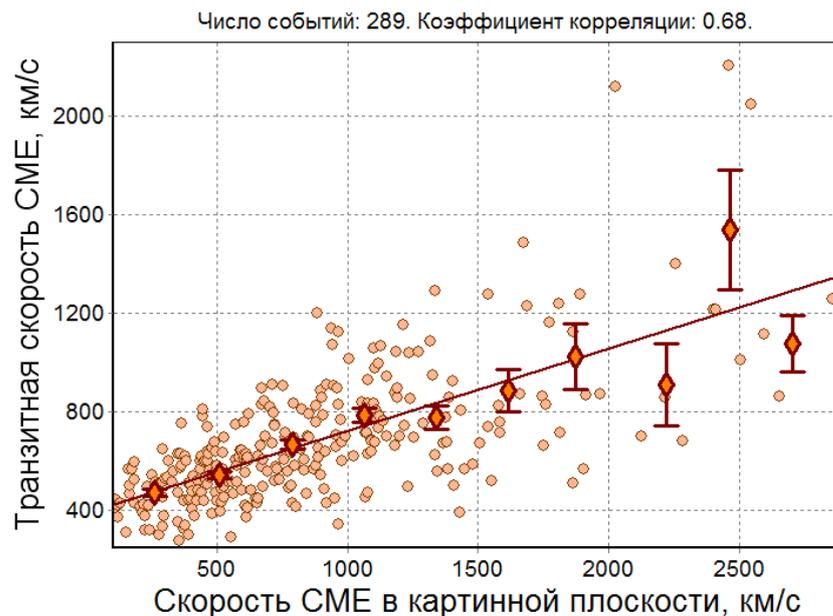


Рис. 2.22. Связь транзитной скорости выброса со скоростью СМЕ в картинной плоскости у Солнца выбросов с ФЭ.

Рис. 2.23–2.25 показывают зависимость величины ФЭ от скорости СМЕ, транзитной скорости ICME и максимальной скорости солнечного ветра в возмущении соответственно.

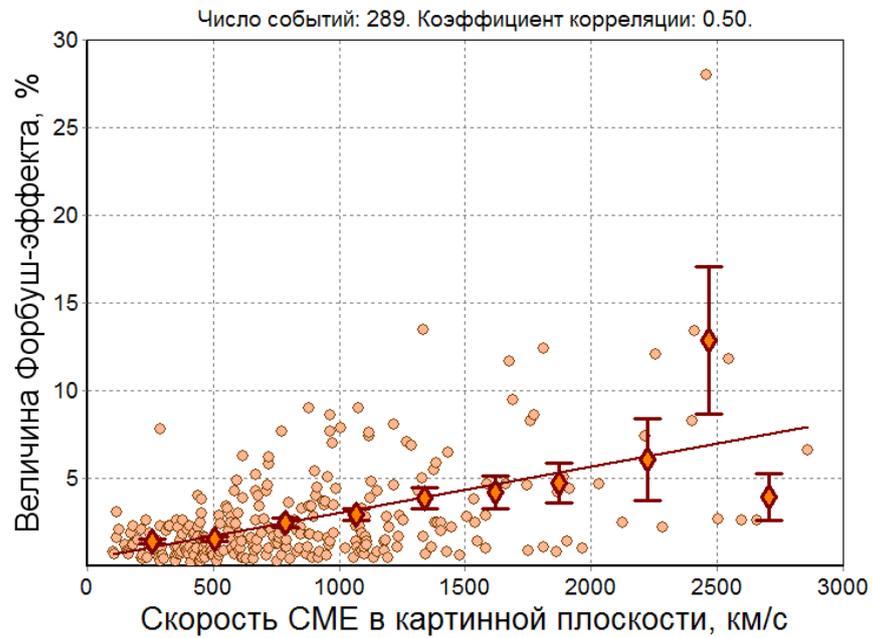


Рис. 2.23. Зависимость величины Форбуш-эффекта от скорости выброса в картинной плоскости.

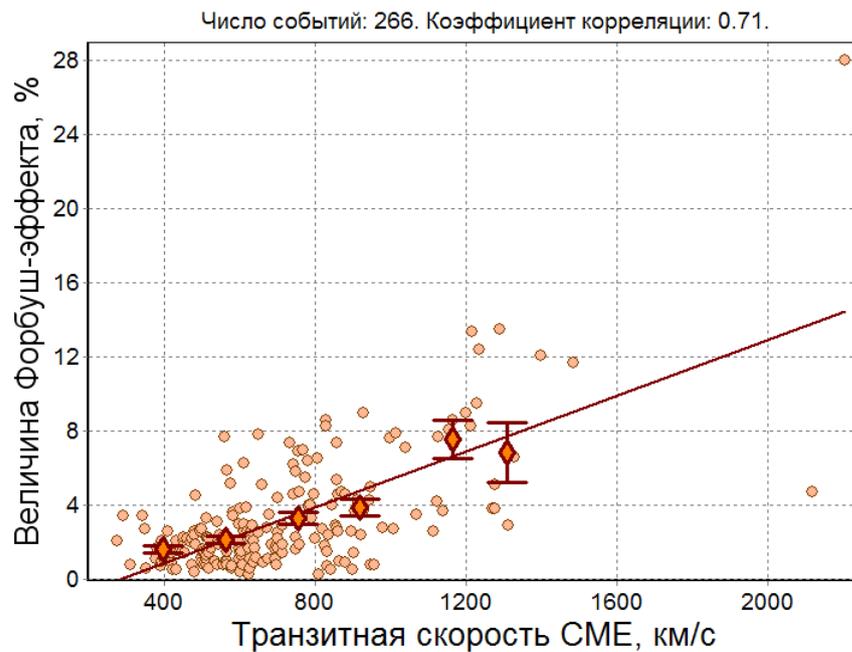


Рис. 2.24. Зависимость величины Форбуш-эффекта от транзитной скорости коронального выброса.

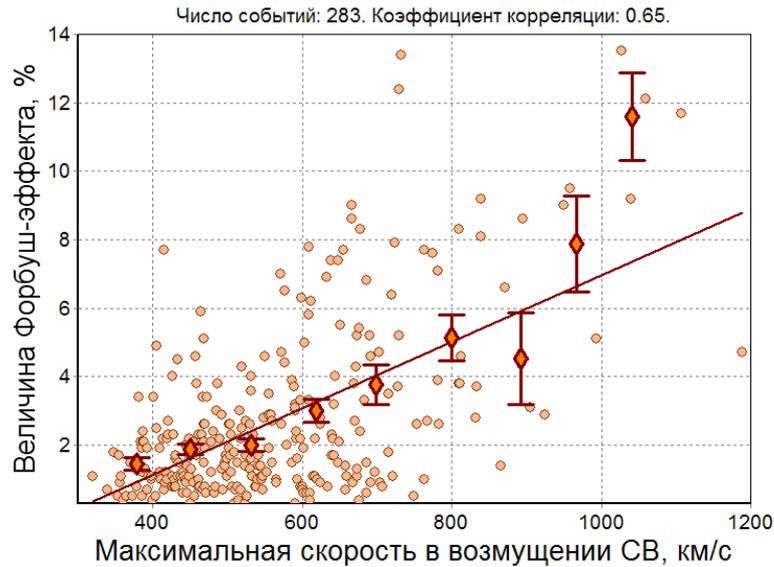


Рис. 2.25. Зависимость величины Форбуш-эффекта от максимальной скорости солнечного ветра в возмущении у Земли.

Для нашей выборки событий, определенно обусловленных СМЕs, корреляция с максимальной скоростью в возмущении солнечного ветра значительно выше, чем корреляция для всех ФЭ, когда объединяются события различных типов. Отметим также, что корреляция величины ФЭ с локальной скоростью солнечного ветра ожидаемо выше, чем со скоростью СМЕ. Интересно, что корреляция с транзитной скоростью еще выше. По-видимому, это объясняется тем, что ФП создается не у Земли, а на всем пути между Солнцем и Землей.

### 2.5.3. Связь величины Форбуш-эффекта с угловыми размерами коронального выброса

На рис. 2.26 показана зависимость амплитуды ФЭ от угловых размеров коронального выброса. Коэффициент корреляции в данном случае  $r \approx 0.68$ . Как мы уже отмечали, угловая ширина плохо отражает истинные размеры СМЕ. Так, например, под значением угловой ширины  $360^\circ$  (гало) реально собраны выбросы самых разных размеров. Тем не менее, связь есть, и таблица 2.5 убедительно демонстрирует, что ФП, связанные с частичными гало, в целом, заметно больше, чем ФП от СМЕ с меньшей шириной, а самые большие

эффекты связаны с гало СМЕ. Таким образом, в воздействии на КЛ у Земли гало выделяются, как и в других СМЕ эффектах [139].

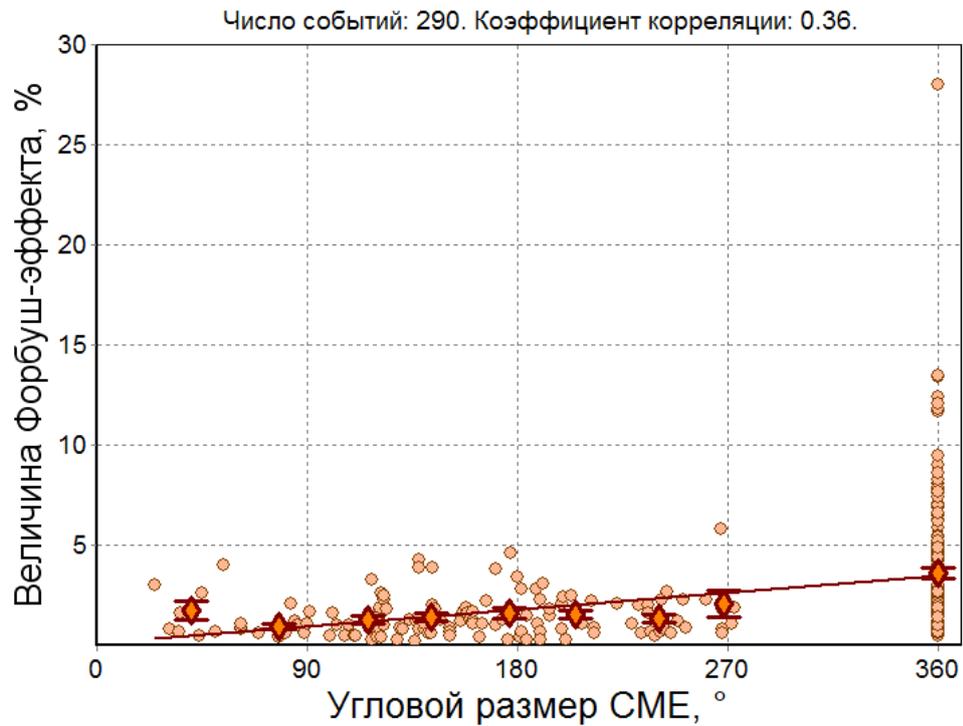


Рис. 2.26. Зависимость величины Форбуш-эффекта от углового размера СМЕ.

Таблица 2.5.

Средняя величина Форбуш-эффектов, связанных с корональными выбросами различных типов.

Тип выброса	Угловой размер, °	Средняя величина ФЭ, %
полное гало	360	$3.64 \pm 0.28$
частичное гало	120–359	$1.54 \pm 0.11$
узкие выбросы	<120	$1.01 \pm 0.14$

Особая эффективность гало СМЕ проявляется и при усреднении событий методом наложения эпох (рис. 2.27 и 2.28). Легко видеть существенную разницу как в мощности межпланетных и геомагнитных возмущений, так и в степени модуляции КЛ при разных типах выбросов.

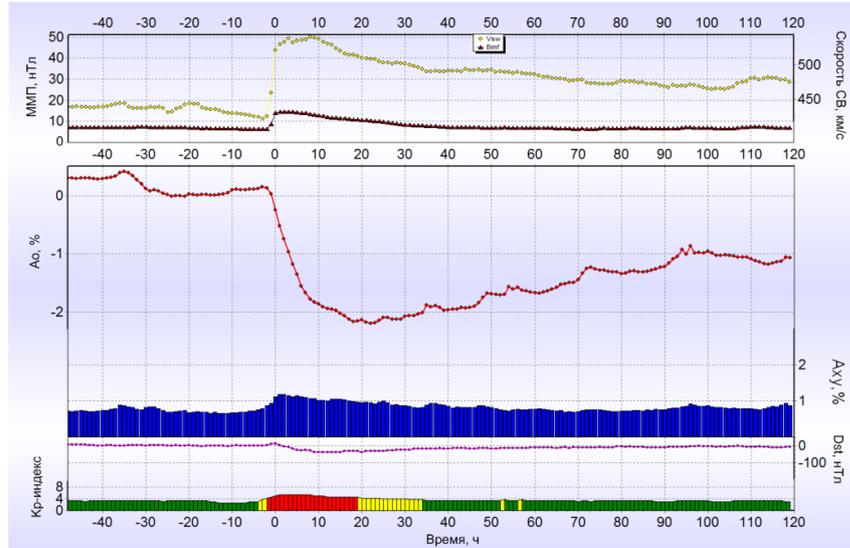


Рис. 2.27. Усредненное методом наложения эпох поведение скорости солнечного ветра, напряженности межпланетного магнитного поля (верхняя панель); плотности и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ (средняя панель);  $Dst$ - и  $Kp$ -индексов геомагнитной активности (нижняя панель) для событий, обусловленных гало СМЕ.

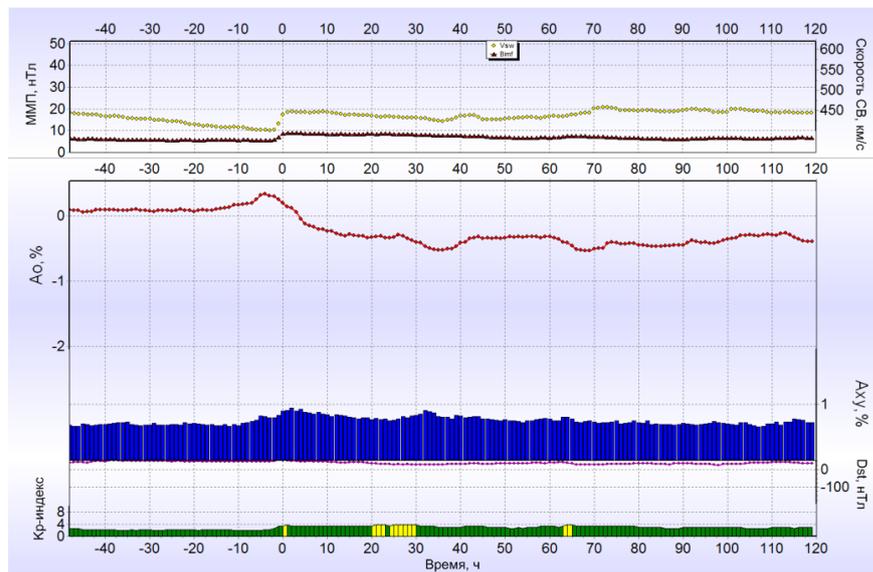


Рис. 2.28. Усредненное методом наложения эпох поведение скорости солнечного ветра, напряженности межпланетного магнитного поля (верхняя панель); плотности и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ (средняя панель);  $Dst$ - и  $Kp$ -индексов геомагнитной активности (нижняя панель) для событий, обусловленных СМЕ типа «не гало».

Следует еще раз подчеркнуть, что полученная зависимость – это не связь с реальным размером коронального выброса. Угловой размер также зависит не только от линейного размера, но и от расположения эрупции на солнечном диске – чем ближе к центру, тем, как правило, больше угловой размер. К этому нужно добавить, что угловая ширина выброса чаще отображает широтный его размер, а для формирования ФЭ важнее размер азимутальный. Таким образом, мы видим, что найти связь величины ФЭ с реальными размерами СМЕ не так легко. И на данный момент эта задача пока еще не решена.

## 2.6. Краткие выводы к главе 2

В результате проведенного анализа было показано, что разные выборки событий существенно различаются между собой.

- *События с внезапным (*S*-группа) и с постепенным (*NS*-группа) началами.* В *S*-группе оказались в среднем более мощные события. Межпланетные возмущения двух групп различаются и по структуре. Те, которые относятся к *S*-группе, эффективнее модулируют КЛ и создают большие ФП по сравнению с возмущениями *NS*-группы, имеющими сходные характеристики. Кроме того, одним и тем же уровням геомагнитной активности в *NS*-группе соответствуют ФЭ меньшей величины, чем в *S*-группе. Полученные результаты говорят в пользу того, что в выделенных группах преобладают разные механизмы модуляции галактических КЛ. События *S*-группы в большей мере обусловлены выбросами солнечного вещества, в то время как значительная часть событий группы *NS* – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.
- *События с различным местоположением источника на Солнце.* Сравнение ФЭ, обусловленных спорадическими солнечными источниками из различных областей солнечного диска, выявляет существенную зависимость различных параметров ФЭ от гелиодолготы источника. Эффекты, ассоциированные с восточными СМЕs, развиваются наиболее

медленно. Группа ФЭ с умеренно западными источниками выделяется своим быстрым развитием (в частности, быстрым достижением минимума ФП). Дальнейший анализ может выявить также и другие параметры Форбуш-эффектов, существенно зависящие от гелиодолготы источника. Знание таких зависимостей дает дополнительную информацию о причинах возмущений солнечного ветра, позволяет судить об их дальнейшем развитии и имеет прогностическую ценность.

- **Корональные выбросы, сопровождающиеся ФЭ, и без ФЭ.** Проведенный в разделе 2.5 анализ показывает, что выбросы, создающие ФЭ, в целом, заметно отличаются от остальных СМЕs. У них существенно выше скорость, больше угловые размеры и они массивнее. Выявленные связи характеристик СМЕ (особенно скорости и углового размера) с величиной ФП, позволяют оценивать ожидаемую эффективность СМЕ в модуляции КЛ. Однако объективные трудности в количественном описании СМЕ накладывают определенные ограничения на применимость полученных соотношений. По-видимому, в проблеме «СМЕ – ФЭ» разумно не ограничиваться непосредственными наблюдениями СМЕ, а привлекать сопутствующие данные, например, наблюдения эрупций (см. подробнее в главе 4). То, что серьезное изучение ФЭ невозможно без изучения СМЕs, не требует доказательств. Но и ФП могут оказаться весьма полезными при изучении СМЕ. Одной из проблем исследований корональных выбросов является отсутствие какой-либо обобщающей характеристики их мощности (чего-то подобного баллу рентгеновской вспышки), позволяющей сравнивать эффективность различных СМЕ. Такую интегральную характеристику, видимо, следует искать за пределами наблюдений собственно СМЕ. И одним из наиболее реальных кандидатов на это место является величина ФЭ.

### Глава 3. Изучение событий 19-го цикла солнечной активности по данным нейтронных мониторов

В конце 50-х – начале 60-х гг. XX века наблюдалась аномально высокая солнечная активность, но отсутствовали многие возможности ее наблюдения, к которым мы привыкли за последние годы. В то время практически не было измерений солнечного ветра, наблюдений рентгеновских и гамма-вспышек, данных о корональных выбросах и т.д., но велись непрерывные наземные наблюдения космических лучей (КЛ) [3]. При отсутствии межпланетных измерений и внеатменных коронографов наблюдения КЛ являются основным источником информации о состоянии космической погоды. В частности, Форбуш-эффекты (ФЭ) дают, пожалуй, самую непосредственную информацию о возмущениях межпланетной среды, обусловленных корональными выбросами и высокоскоростными потоками солнечной плазмы из корональных дыр.

#### 3.1. Используемые данные

В работе [3], при восстановлении событий данного цикла, использовались два основных источника информации по КЛ. К первому источнику относится база данных ФЭ и межпланетных возмущений (*DBFE*), описанная в разделе 1.5. В ней КЛ представлены результатами глобальной съемки (*GSM*) [20,50] по данным всей мировой сети нейтронных мониторов, полученным для жесткости 10 ГВ. Поскольку эта сеть сформировалась только в 1957 г., то база данных не содержит информацию о событиях, произошедших в начале 19-го цикла (с 1954 по 1957 гг.). Поэтому нужен другой источник, который содержал бы данные об этих событиях. В качестве такого источника был взят каталог ФЭ, созданный Дж. Локвудом [130] (*L*-каталог) по данным одной станции КЛ – г. Вашингтон (*MTWS*, *Mt. Washington*, координаты: 44.27,-71.30, высота: 1909 м,  $R_c = 1.24$  ГВ). Одной из особенностей *L*-каталога является то, что он содержит только крупные ФП (с амплитудой  $\geq 3\%$ ) за период с 1954 по 1990 гг. Другая особенность каталога заключается в том, что при выделении ФЭ, чтобы убрать

влияние анизотропии КЛ, данные нейтронного монитора усреднялись за сутки. В результате такого усреднения, как правило, происходит существенное занижение эффектов (см. раздел 1.4).

Разумеется, нельзя механически объединить два каталога ФЭ, поскольку они во многом различаются. К примеру, в использовании детекторов (*IGY* и *NM64*), типах данных (одно- и двухчасовые, среднесуточные), в способах выделения и отбора событий и т.д. На рис.3.1 представлено сопоставление ФП из двух каталогов в период с июля 1957 по декабрь 1964.

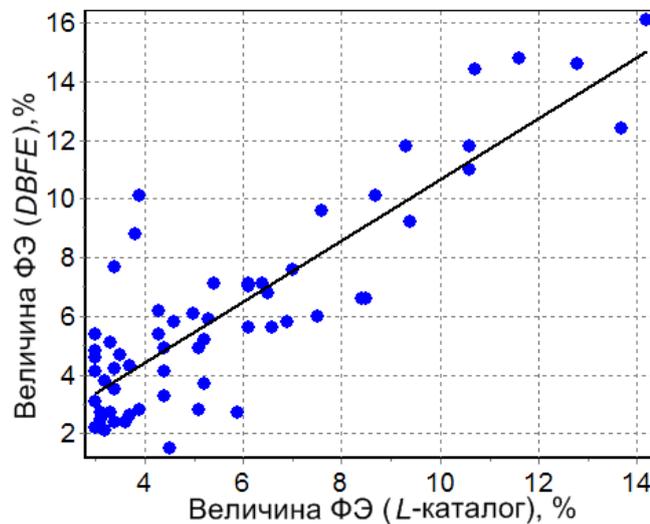


Рис. 3.1. Сопоставление событий из базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, созданной в ИЗМИРАН (*DBFE*) и каталога Форбуш-понижений Локвуда (*L*-каталог).

Из рисунка видно, что величины одних и тех же событий в них могут существенно различаться. Важно отметить, что отличия были бы больше, если бы особенности двух каталогов действовали однонаправлено (к примеру, только уменьшая или только увеличивая величину ФЭ). Однако эти особенности частично компенсируют друг друга и величины, по-разному выделенных ФП, довольно хорошо коррелируют. Коэффициент корреляции в этом случае  $r \approx 0.86$ . Таким образом, обнаруженная зависимость дает

возможность использовать  $L$ -каталог для оценок количества ФП различной величины в первой части 19-го цикла.

Основываясь на наличии данных в обоих источниках по 19-му циклу, все события были разбиты на две части. Так как в базе данных  $DBFE$  содержится информация по ФЭ с 01/07/1957, а в  $L$ -каталоге – с 01/04/1954, то к первой части событий 19-го цикла были отнесены события с 01/04/1954 по 01/07/1957. Вторая часть цикла включает события, произошедшие с 01/07/1957 по 31/12/1964. Такое деление позволит в дальнейшем оценить полное количество ФЭ в рассматриваемом цикле солнечной активности.

### 3.2. Отличия 19-го цикла от последующих циклов солнечной активности

Одним из самых необычных циклов солнечной активности был 19-й цикл. Во-первых, ни в каком другом цикле за последние 250 лет на Солнце не было столько пятен. Максимум 19-го цикла почти вдвое превосходит максимум среднего цикла (см. рис. 3.2).

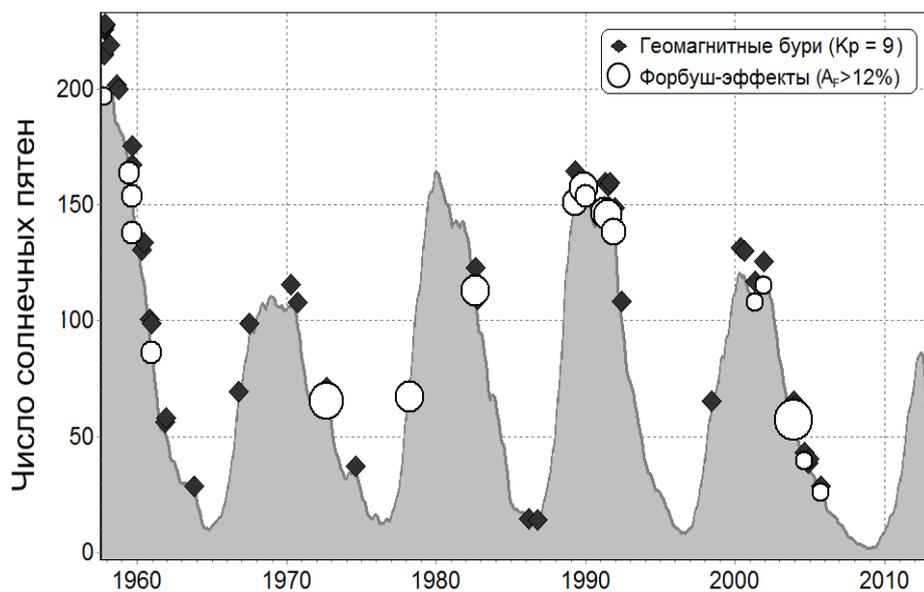


Рис. 3.2. Числа солнечных пятен, а также самые большие Форбуш-эффекты ( $A_F > 12\%$ ) и геомагнитные ( $K_p = 9$ ) бури за пять последних полных циклов солнечной активности (19-23 циклы).

Во-вторых, именно в начале данного цикла (в феврале 1956 г.) наблюдалось самое большое наземное возрастание солнечных КЛ (GLE05), которому уделено много внимания в ряде работ (см., напр., [51,141,169,178]). И хотя с тех пор были зарегистрированы сотни протонных событий и десятки наземных возрастаний – все они на порядок и более уступают событию 1956 г. В-третьих, в сентябре 1957 г. наблюдалась самая высокая среднемесячная геомагнитная активность за последние 72 года, а из трех самых активных месяцев – два принадлежат именно 19-му циклу. В-четвертых, на этот цикл приходится 1/3 часть от всех исключительно больших (*extreme*) геомагнитных бурь (ГМБ), произошедших в семи последних циклах.

Все эти факты дают возможность утверждать, что в 19-м цикле Солнце было особенно активно, и если мы хотим знать, насколько опасными могут быть экстремальные проявления солнечной активности, мы обязаны возвращаться к событиям именно этого цикла.

### 3.3. Форбуш-эффекты и геомагнитные бури 19-го цикла

В 19-м цикле возмущения на орбите Земли наблюдались с высокой частотой. Например, на рис. 3.3 показано, что за семь суток на Землю пришло пять ударных волн (SSC) и все они вызвали геомагнитные возмущения разной величины. Такие частые возмущения были типичны для того цикла.

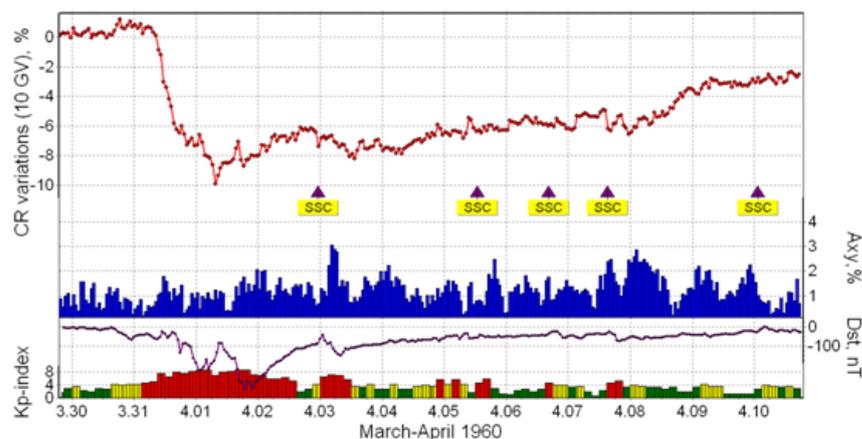


Рис. 3.3. Поведение плотности и анизотропии КЛ (верхняя панель),  $Dst$  и  $Kp$  индексов геомагнитной активности (нижняя панель) в марте-апреле 1960 г.

Таким образом, 19-й цикл выделяется не только числом пятен, но количеством ГМБ (см. таблицу 3.1 и рис. 3.3).

Таблица 3.1

Геомагнитные бури и Форбуш-эффекты за последние пять полных циклов солнечной активности (19-23 циклы).

Циклы	19	19с	20	21	22	23
Все геомагнитные бури (ГМБ)	621	-	499	588	538	487
Слабые ГМБ ( <i>minor</i> , $Kp=5$ )	317	-	294	308	283	272
Умеренные ГМБ ( <i>moderate</i> , $Kp = 6$ )	168	-	119	173	152	119
Большие ГМБ ( <i>strong</i> , $Kp = 7$ )	72	-	49	73	72	60
Очень большие ( <i>severe</i> , $Kp = 8, 9_{-}$ )	57	-	34	32	30	33
Исключительные ( <i>extreme</i> , $Kp = 9$ )	7	-	3	3	1	3
ФЭ ( $A_F > 1\%$ )	435*	508	631	593	586	635
ФЭ ( $A_F > 3\%$ )	71*	83	102	94	123	110
ФЭ ( $A_F > 5\%$ )	35*	41	23	35	38	50
ФЭ ( $A_F > 10\%$ )	10	10	2	2	7	7
ФЭ ( $A_F > 15\%$ )	1	1	1	2	6	1

Как видно из таблицы, бурь высшей категории (*extreme*) в нем было 7, а в остальных циклах не более 3. Похожая картина и с бурями следующей по мощности категории (*severe*) с максимальным  $Kp^1$  индексом в диапазоне от 8<sub>-</sub> до 9<sub>-</sub>. Естественно было бы ожидать, что-то похожее и от ФП, но это не так. Количество ФЭ с амплитудой  $A_F > 5\%$  в 19-м цикле почти такое же, как в 21-м и 22-м, и явно меньше, чем в 23-м цикле – и это при том, что в 19-м цикле было почти в два раза больше ГМБ класса *severe* и *extreme*, чем в других циклах (см. рис. 3.4). Тот факт, что ГМБ и ФЭ вызываються одними и теми же возмущениями в межпланетной среде, дает основание полагать, что количество сравнимых ФП и геомагнитных возмущений должно быть примерно одинаковым или, если брать во внимание  $B_z$  составляющую ММП, должно наблюдаться небольшое преобладание числа ФЭ над ГМБ. Но в 19-м и, в меньшей степени, в 20-м цикле солнечной активности наблюдается преобладание количества ГМБ над ФП. Что касается эффектов с величиной  $A_F$

<sup>1</sup> В данном разделе под параметрами  $A_p$ ,  $K_p$ ,  $A_{xy}$ ,  $A_z$ ,  $A_F$  подразумеваются максимальные значения характеристик в событии, а под параметрами  $Dst$ ,  $\Delta_{min}$ ,  $B_z$  – их минимальные значения в возмущении.

$> 10\%$ , то здесь 19-й цикл выделяется, но не столь явно, как для магнитных бурь. Если же говорить о гигантских понижениях в КЛ (с амплитудой  $A_F > 15\%$ ), то в этой выборке выделяется вовсе не 19-й, а 22-й цикл.

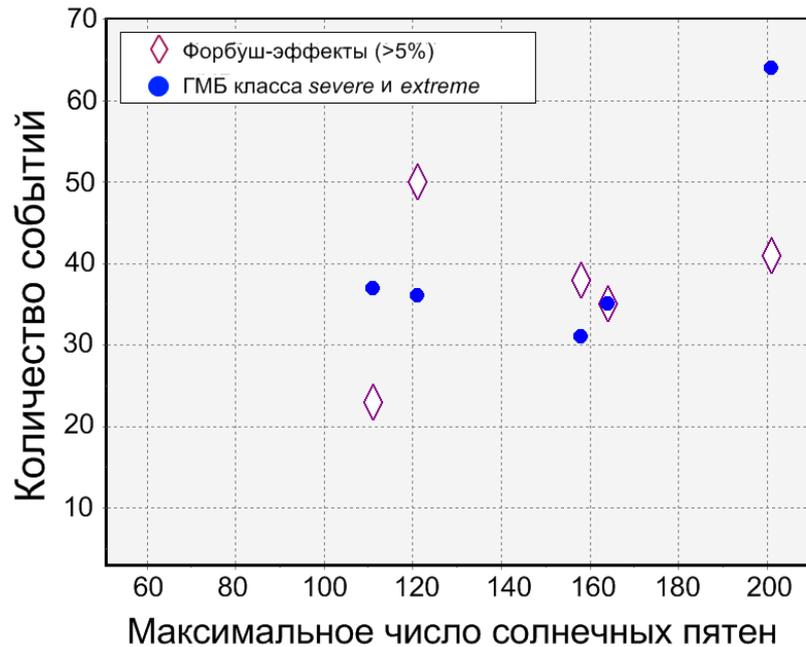


Рис. 3.4. Количество Форбуш-эффектов с амплитудой  $A_F > 5\%$  ( $\diamond$ ) и сильных геомагнитных бурь с  $K_p > 8_-$  ( $\bullet$ ) в пяти различных циклах солнечной активности.

В ходе текущего анализа было выявлено, что из первой части 19-го цикла *L*-каталог содержит 10 событий, а из второй – 60. На основании этого можно предположить, что в полном 19-м цикле солнечной активности было в 7/6 раз больше событий, чем мы насчитали с июля 1957 года, используя базу данных *DBFE*. Отметим, что самый большой ФЭ из ранних событий *L*-каталога был зарегистрирован в ноябре 1956 г. и имел величину  $A_{FL} = 7.5\%$ . Ему соответствует ФП с амплитудой 8% из *DBFE* (см. линию регрессии на рис. 3.1). Таким образом, увеличение числа событий не должно распространяться на ФЭ с большой амплитудой ( $A_F > 8\%$ ). В результате 19-му циклу в таблице 1 соответствуют два столбца. Столбец 19 включает в себя количество событий, которые реально наблюдались с июля 1957 г., а столбец 19с – количество

событий с учётом вышеописанных поправок (увеличивающих количество событий в 7/6 раз для  $A_F < 8\%$ ).

Что касается больших ФП, то если расположить все ФЭ, произошедшие за последние 55 лет, в порядке убывания, то в первом десятке событий окажется только один представитель из 19-го цикла, причем на последнем десятом месте. Отметим, что самые большие ФП 19-го цикла существенно (почти вдвое) уступают более поздним гигантским событиям и по вариациям плотности КЛ, и по величине анизотропии: 29 октября 2003 г. – 28% и 4-5 августа 1972 г. – 25 %. В таблице 3.2 приведены самые глубокие ФЭ в 19-м цикле, из которых самым большим является событие, произошедшее в ноябре 1960 г., с амплитудой  $A_F = 16.1\%$ . Отметим, что его профиль был сильно искажен двумя GLE. Другим примером больших ФП является серия эффектов, произошедшая в июле 1959 г. (рис. 3.5). Эти события неоднократно освещались в ряде работ (см., напр., [53]).

Таблица 3.2.

Самые большие Форбуш-понижения в 19-м цикле солнечной активности.

Дата	$A_F$	$Kp$	$Dst$	$A_{xy}$	$A_z$	$t_{min}$	$\Delta_{min}$
1957.08.29	11.6	6.7	-75	2.22	3.87	26	-3.42
1957.10.21	11.8	6.7	-60	4.04	3.31	39	-2.55
1959.05.11	14.6	8.3	-88	5.12	3.90	13	-4.07
1959.07.11	10.1	6.7	-36	2.96	2.77	18	-2.41
1959.07.15	14.8	9.0	-429	2.77	4.74	12	-6.01
1959.07.17	14.4	8.7	-183	3.30	7.02	21	-2.63
1960.03.30	11.0	8.7	-327	2.08	4.55	26	-1.84
1960.05.08	10.1	8.3	-129	4.64	10.18	18	-2.62
1960.11.12	16.1	9.0	-339	3.32	3.18	34	-3.21
1961.07.13	11.8	8.3	-77	4.36	4.00	14	-2.58

Как видно, все большие ФЭ, отмеченные в таблице 3.2, сопровождались интенсивными ГМБ, причем, как минимум, большими (*strong*) ( $Kp = 7_0$ ), а две из них были типа *extreme* ( $Kp = 9_0$ ). Кроме того, все ГМБ типа *extreme* пришлись на период после июля 1957 г. (т.е. относятся ко второй части цикла), поэтому 19-й цикл в этом сравнении представлен полностью.

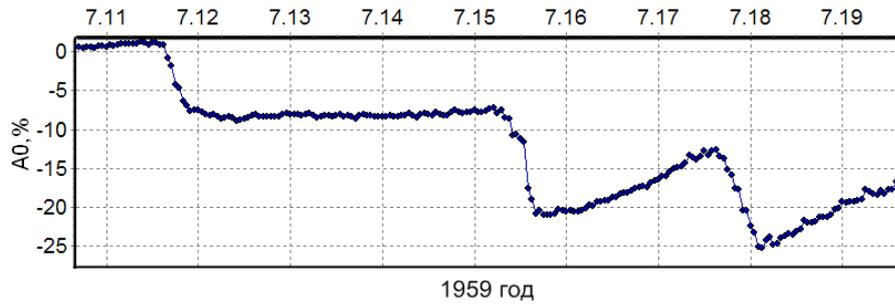


Рис. 3.5. Серия крупнейших Форбуш-понижений, наблюдаемых в июле 1959 г.

Что касается средних величин эффектов в 19-м и последующих циклах, то средняя величина семи ФЭ, связанных с исключительно большими магнитными бурями равна  $A_F = 8.40 \pm 1.91\%$ . Для 9 событий более позднего периода она равна  $A_F = 13.29 \pm 3.16\%$ . Не менее явно различалась и анизотропия ( $A_{xy}$ ) КЛ –  $2.78 \pm 0.18$  и  $4.48 \pm 0.98\%$  соответственно.

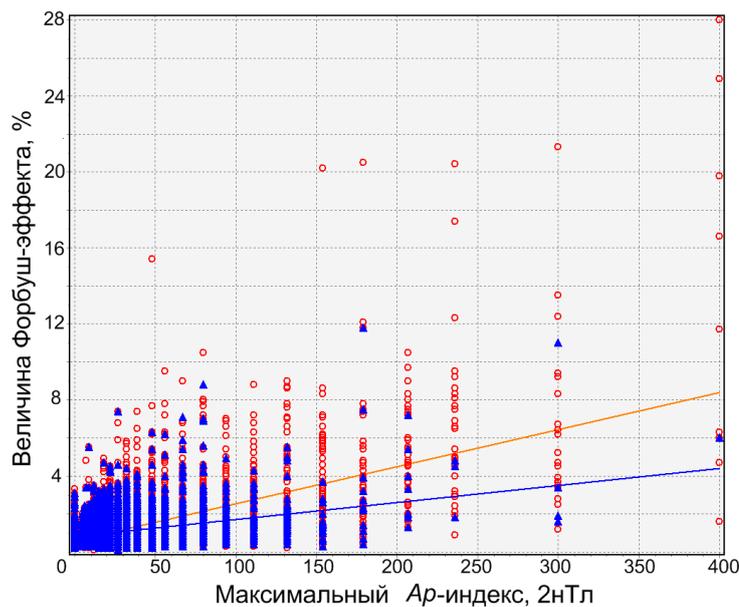


Рис. 3.6. Связь амплитуды Форбуш-эффекта ( $A_F$ ) с максимальным индексом геомагнитной активности ( $A_p$ ) для событий 19-го цикла ( $\blacktriangle$ ) и последующих циклов солнечной активности ( $\circ$ ).

На рис. 3.6 показана связь величины ФЭ с максимальным  $A_p$  индексом для событий 19 цикла ( $\blacktriangle$ ) и последующих циклов солнечной активности ( $\circ$ ). Видно, что при одном и том же уровне геомагнитной активности в этих группах

наблюдаются различные средние величины ФП. В частности, средняя величина ФЭ в 19-м цикле, почти в два раза меньше, чем средняя величина эффектов в последующих циклах. Существенно отличается и связь между величиной ФП и геомагнитными индексами в эти периоды.

Таким образом, мы обнаружили определенный дефицит больших ФП в 19-м цикле на фоне высокой солнечной и геомагнитной активности.

### **3.4. Возможные объяснения дефицита Форбуш-эффектов в 19-м цикле солнечной активности**

Сопоставление событий в КЛ с солнечной и геомагнитной активностью показало, что количество и мощность магнитных бурь в 19-м цикле соответствует аномально высокому числу солнечных пятен. Однако в этом цикле существует определенный дефицит ФЭ с большими величинами. Можно предложить три типа возможных объяснений: методические причины, особенности межпланетных возмущений и их воздействия на КЛ, различия в самих корональных выбросах.

В первую очередь, мы искали методические объяснения. Можно выделить ряд методических отличий ранних наблюдений КЛ от последующих измерений. Во-первых, для регистрации КЛ использовались различные типы детекторов. 19-ый цикл приходится на начало наблюдений КЛ, а то время использовали детекторы *IGY*-типа (конструкция такого монитора была описана Симпсоном [173]). Затем была предложена улучшенная версия нейтронного монитора (*NM-64*) [103], в результате чего все станции КЛ стали устанавливать именно этот тип. Во-вторых, в самых ранних наблюдениях, в ряде случаев, использовались двухчасовые интервалы регистрации вместо одночасовых. В-третьих, существенны различия в методике самого выделения. Важно отметить, что в более поздние периоды выделение событий опирается на измерения солнечного ветра, практически отсутствовавшие в 19-м цикле. Именно возможность видеть отдельные межпланетные возмущения в данных солнечного ветра обычно позволяет нам разделять события. Это приводит к

увеличению числа событий и к уменьшению амплитуд ФЭ в них. Ясно, что уменьшение величины ФП 19-го цикла, таким образом, нельзя объяснить.

Другое возможное объяснение может заключаться в особенностях межпланетных возмущений и их воздействии на КЛ. В 19-м цикле значительные межпланетные возмущения чаще появлялись у Земли, и серии ФП в тот период были более типичным явлением. Можно было бы предположить, что некоторые события в сериях не развились полностью, а на другие повлияла предыдущая модуляция. Но при этом мы должны были бы видеть самую глубокую модуляцию КЛ в сериях 19-го цикла. Действительно, в 19-м цикле было много серийных событий, один из примеров показан на рис. 3.3, другой – это упоминавшаяся серия июльских событий 1959 г. (см. рис. 3.5), но в сериях из последующих циклов 1972, 1989, 1991 и 2003 гг. наблюдалась более глубокая модуляция КЛ.

Еще одним возможным объяснением дефицита ФЭ может быть то, что CMEs/ICMEs 19-го цикла чем-то отличались от корональных выбросов в последующих циклах, причем это отличие существенно влияло на модуляцию КЛ. Для начала, необходимо вспомнить какие параметры CMEs/ICMEs определяют глубину ФЭ и интенсивность ГМБ. Геомагнитные возмущения и ФП вызываются одними и теми же возмущениями межпланетной среды. В отклике магнитосферы и КЛ на возмущения солнечного ветра есть общие черты, но есть и существенные различия. Во-первых, интенсивность ГМБ и амплитуда ФЭ зависят от скорости распространения возмущения в пространстве. Во-вторых, с увеличением напряженности ММП увеличивается и модуляция КЛ, и геомагнитная активность. К различиям здесь можно отнести то, что если на величину ФП влияет сама величина напряженности ММП, то интенсивность ГМБ определяется величиной и знаком  $B_z$  составляющей магнитного поля в возмущении. Но, пожалуй, самое существенное различие в том, что ФЭ определяется размерами межпланетного возмущения, тогда как интенсивность ГМБ от размера возмущений не зависит.

### 3.5. Краткие выводы к главе 3

Вывод из материалов главы 3 сводится к следующему: методические различия и различия в межпланетных возмущениях могут повлиять на характеристики ФП, но это влияние не того рода, чтобы объяснить дефицит больших ФП в период высокой солнечной и геомагнитной активности. Это означает, что ICME 19-го цикла чем-то отличались от более поздних выбросов и это отличие существенно для модуляции КЛ. Кроме того, это отличие должно по-разному сказываться на модуляции и геомагнитной активности. Главными характеристиками ICME, влияющими на уровень геомагнитной активности являются скорость солнечного ветра и величина  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля. Большое количество ГМБ класса *severe* и *extreme* ясно свидетельствуют о том, что в 19-м цикле было много ICME с высокой скоростью и сильным магнитным полем. Эти же характеристики обычно определяют и глубину ФП. Разница в том, что для величины ФП важен еще и размер возмущения. При прочих равных условиях, чем больше размер ICME, тем больше должно быть ФП, им созданное. Интенсивность же ГМБ от размеров ICME не зависит. Эти рассуждения заставляют предположить, что размеры выбросов в 19-м цикле были, в целом, меньше, чем размеры ICME в более поздних циклах.

## **Глава 4. Основы ультрафиолетовой / магнитной диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и Форбуш-понижений**

Существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: рекуррентные и спорадические [53,65,80,128]. К первому типу относятся вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр. Ко второму – наблюдаемые в белом свете корональные выбросы (CMEs – coronal mass ejections), которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака (ICMEs) (см., напр., [56,97]). Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик как в магнитосфере и ионосфере Земли, так и в вариациях космических лучей (КЛ), в частности, геомагнитные бури (ГМБ) и Форбуш-понижения<sup>1</sup>(ФП). Рекуррентные источники возмущения космической погоды, как правило, вызывают менее интенсивные ГМБ и меньшие по амплитуде ФП, чем спорадические, и в данной главе рассматриваться не будут.

Корональные выбросы являются наиболее крупномасштабными проявлениями солнечной активности с точки зрения энергетики, размеров возмущения в межпланетном пространстве и вызываемых ими эффектов в космической погоде (см., напр., [99,124]). Они связаны, прежде всего, с перестройками локальных магнитных полей в атмосфере Солнца. В результате таких перестроек происходит высвобождение запасов магнитной энергии, накапливаемой в различных плазменных конфигурациях, и ее преобразование в кинетическую и тепловую энергию плазмы. Другими словами, происходит инъекция замагниченной солнечной плазмы в межпланетное пространство. Корональные выбросы являются основными источниками наиболее сильных возмущений межпланетной среды, которые на Земле могут проявляться в виде нерекуррентных ФП и интенсивных ГМБ [56,97,101]. Но для создания ФП и

---

<sup>1</sup> С учетом содержания данной главы мы не будем рассматривать Форбуш-эффекты в широком смысле, а сосредоточимся только на основной фазе Форбуш-понижения (фазе спада), обозначая эффект аббревиатурой ФП.

ГМБ необходимы разные условия. Первые зависят, в основном, от глобальных характеристик ICMEs: величины напряженности магнитного поля ( $B_t$ ) в облаке выброса, скорости и размеров ICMEs [53]. Интенсивность ГМБ же зависит от величины  $B_z$  компоненты южного направления в той локальной части ICMEs, которая непосредственно взаимодействует с магнитосферой Земли.

Одной из основных и наиболее важных задач солнечно-земной физики и прогнозирования космической погоды является диагностика геоэффективности CMEs/ICMEs, т.е. заблаговременная оценка их способности вызывать нерекуррентные ГМБ и ФП. Существующие алгоритмы такой диагностики опираются, в основном, на данные о скорости, угловых размерах и формы CMEs в картинной плоскости коронографа *SOHO/LASCO* [57]. В ряде работ [92,96,140,118,177,195] были установлены эмпирические соотношения между параметрами CMEs в картинной плоскости и транзитным временем, т.е. интервалом между моментом эрупции на Солнце и приходом соответствующего возмущения к Земле. В работе [160] показано, что величина ФП возрастает с увеличением скорости CMEs в картинной плоскости, а также с ростом рентгеновского балла вспышки.

Что касается интенсивности ГМБ, то она сильно зависит от напряженности и ориентации магнитного поля в источнике CMEs. Наличие  $B_z$  составляющей южного направления в выбросе может быть определено из ориентации магнитного поля в источнике CME, из формы предэруптивных рентгеновских сегмоидов ( $S$  или обратная  $S$ ), из угла ориентации вытянутого CME по данным *LASCO* и постэруптивных аркад, а также из локального угла наклона корональной нейтральной линии, так называемой поверхности источника, локализованной на гелиоцентрическом расстоянии 2.5 радиуса Солнца [117,180,201]. Например, в работе [200] для оценки интенсивности ГМБ сначала используется аналитическое выражение, которое характеризует зависимость величины  $B_z$  компоненты в ICMEs на орбите Земли от величины скорости CMEs в картинной плоскости. Затем используется установленное на

основе статистических данных аналитическое выражение, связывающее  $Dst$  индекс с величиной оцененной  $B_z$  компоненты в выбросе. В другой работе [177] предложен метод, с помощью которого можно оценить интенсивность ГМБ, основываясь на данных о величинах максимального магнитного поля и скорости коронального выброса в межпланетном пространстве, а эти параметры ICME, в свою очередь, были получены на основе данных о скорости CME в картинной плоскости. Еще одним примером может являться анализ событий, выполненный в работе [119]. Авторы разделили все ICMEs на группы, исходя из ориентации  $B_z$  компоненты магнитного поля в соответствующих источниках. К одной группе были отнесены события с северной ориентацией, а к другой – с южным направлением  $B_z$  компоненты в возмущении. Затем авторами было предложено эмпирическое выражение для оценки  $Dst$  индекса для каждой группы событий, основываясь все также на скорости CMEs в картинной плоскости, гелиодолготе источника и направлении распространения в пространстве.

Следует отметить, что помимо эмпирических/статистических выражений были также разработаны различные аналитические модели для прогнозирования транзитного времени начала возмущения ICMEs (см., напр., [177,179,185,189]).

С появлением космических аппаратов *STEREO*<sup>1</sup> [116] стало возможным более точно отслеживать распространения ICMEs в пространстве, используя три коронографа (два из которых установлены на космических аппаратах *STEREO* и один на *SOHO*). Более того, появилась возможность использовать стереоскопические методы для реконструкции 3D траектории, угловых размеров и скорости корональных выбросов [127,132,194]. Однако это не уменьшает актуальности и важности ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций по их проявлениям непосредственно на Солнце.

---

<sup>1</sup> Solar Terrestrial Relations Observatory

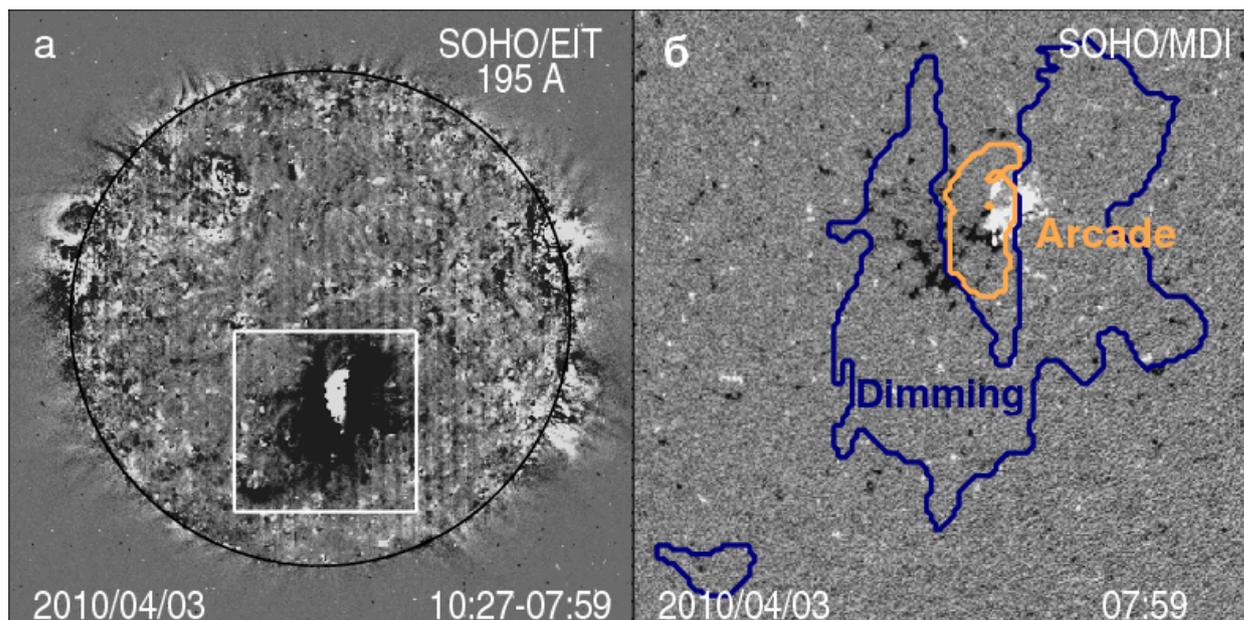


Рис. 4.1 Эрупция 2010/04/03 по данным *SOHO*: (а) разностное изображение диммингов и аркады с фиксированным кадром, полученное в канале 195Å с помощью телескопа *EIT*; (б) *MDI* магнитограмма с выделенными диммингами и постэруптивной аркадой.

Мы предложили и реализовали принципиально новый подход к ранней диагностике геоэффективности солнечных эрупций. В качестве основного исходного параметра взяты не характеристики CMEs в плоскости коронографов, а сравнительно легко измеряемый количественный параметр, непосредственно характеризующий мощность самой эрупции – суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных (ПЭ) аркад продольного поля на уровне фотосферы ( $\Phi$ ):  $\Phi = \Phi_{dim} + \Phi_{arc}$  (см. рис. 4.1). Идея такого метода была предложена в работе [26] и развита в работах [27,28,70]. Димминги представляют собой крупномасштабные области пониженной яркости крайнего ультрафиолетового (КУФ) и мягкого рентгеновского излучения, возникающие в короне в результате коронального выброса и имеющие время жизни несколько часов. Другими словами, димминги – это транзистные (т.е. временные) корональные дыры, которые располагаются рядом с центром солнечной эрупции [102,107,187]. Наиболее долгоживущие и глубокие димминги

расположены, в основном, в опорных точках расширяющегося жгута CMEs [181,192].

Увеличивающиеся в размерах ПЭ аркады ярких петель образуются на месте располагавшегося до эрупции магнитного жгута, выброшенного в виде CME [107,115,182,188]. Они формируются на стадии, когда магнитное поле в обширной области короны, сильно возмущенное эрупцией CME, релаксирует к новому квазиравновесному состоянию посредством магнитного пересоединения. В целом, димминги и ПЭ аркады визуализируют крупномасштабные структуры, вовлеченные в процесс эрупции CMEs. Это дает основание полагать, что их количественные параметры, в частности магнитные потоки, могут быть полезными для ранних оценок геоэффективности соответствующих ICMEs.

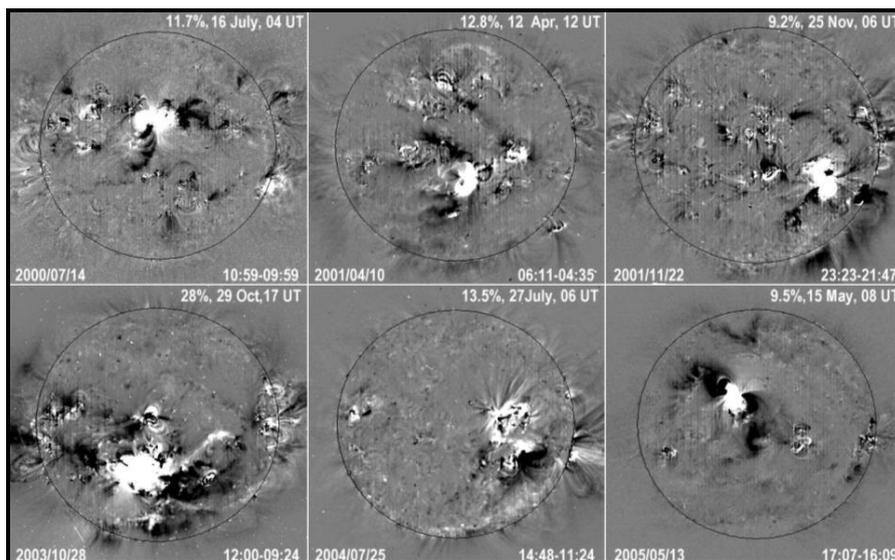


Рис. 4.2 Димминги и постэруптивные аркады в источниках крупнейших Форбуш-понижений 23 цикла солнечной активности.

На рис. 4.2 представлены разностные изображения КУФ телескопа *SOHO/EIT*<sup>1</sup> в канале 195Å [76], на которых видны темные димминги и яркие аркады в эруптивных источниках самых глубоких ФП 23-го цикла солнечной активности. Из рисунка видно, что димминги и аркады занимают значительную

<sup>1</sup> Extreme ultraviolet Imaging Telescope

часть видимого солнечного диска и, в целом, визуализируют солнечные эрупции. До сих пор в аспекте космической погоды димминги и аркады использовались, в основном, как качественный индикатор, который показывал, в какую сторону распространяются ICMEs в межпланетном пространстве – движется ли выброс к Земле или эрупция произошла на обратной стороне солнечного диска (см., напр., [205]).

Магнитный поток диммингов на уровне фотосферы рассчитывался в нескольких работах, причем, только для небольшого числа событий и сравнивался с магнитным потоком в ICMEs (в частности, в магнитных облаках), определенном из прямых измерений на 1 АЕ (см. [77,133]).

## 4.1. Методика и используемые данные

### 4.1.1. Рассматриваемые события

Данный анализ основан на каталоге больших геомагнитных бурь, подготовленный центром *CDAW*<sup>1</sup> (см. [203,204]). Каталог содержит данные по наиболее интенсивным ГМБ за период 1996-2005 гг., в которых индекс геомагнитной активности  $Dst < -100$  нТл. Помимо информации о ГМБ, в каталоге содержатся данные о соответствующих солнечных источниках и межпланетных возмущениях. В дополнение к каталогу *CDAW* нами принимался во внимание уточненный и обновленный список ICMEs (около 300 событий) в 23-ем цикле солнечной активности [159], в котором содержится информация об их предполагаемых источниках, основных свойствах и соответствующих геомагнитных эффектах.

В каталоге *CDAW* все события разделены на три класса в зависимости от характера ГМБ, особенностей распространения возмущения в межпланетном пространстве и типа солнечного источника. К классу *S* относятся одиночные возмущения, вызванные изолированными CMEs/ICMEs. Смешанные события и/или события с несколькими источниками составляют класс *M*. И, наконец, к классу *C* относятся магнитные бури, вызванные высокоскоростными потоками

---

<sup>1</sup> Coordinated Data Analysis Workshop

солнечной плазмы из корональных дыр. Кроме того, в зависимости от степени надежности отождествления ГМБ с солнечными источниками, все классы делятся на три уровня. Самой высокой степенью надежности отождествления является уровень 1. Это означает, что ГМБ однозначно отождествляется с конкретной одиночной эрупцией на Солнце. Уровень 2 соответствует менее уверенному отождествлению, где, скорее всего, имеют место несколько источников возмущения межпланетной среды. И, наконец, к уровню 3 относятся сложные события, где имеет место неоднозначная идентификация солнечного источника. Отметим, что событиям класса *M* автоматически присваивается степень надежности отождествления уровня 2 или 3 из-за их сложной внутренней структуры. Для событий класса *M*, в случаях, где это было возможно, выбирались самые большие значения *Dst* индекса, а параметры диммингов и ПЭ аркад вычислялись по самой мощной, подходящей по времени, солнечной эрупции.

Следует еще раз подчеркнуть, что в данной работе мы имеем дело только с нерекуррентными геомагнитными бурями *S* и *M* классов, которые были вызваны спорадическими солнечными эрупциями. Следовательно, события *C*-класса, которые связаны с корональными дырами, не рассматриваются.

Чтобы свести к минимуму проекционные эффекты параметров диммингов и аркад, нами были рассмотрены только те ГМБ, источники которых находились в центральной зоне солнечного видимого диска в пределах  $\pm 45^\circ$  от центрального меридиана. Более целесообразно было бы использовать зону  $\pm 30^\circ$  от центрального меридиана [190], но в этом случае число рассматриваемых событий заметно уменьшается. Часть нерекуррентных интенсивных ГМБ с источниками из центральной зоны видимого диска Солнца не были включены в общий список рассматриваемых событий. Одни события не рассматривались из-за полного отсутствия данных с космического аппарата *SOHO* (здесь и далее события пронумерованы в соответствии с нумерацией в каталоге *CDAW*): №6, 1997/11/23; №11, 1998/08/06; №13, 1998/08/27; №14,

1998/09/25; №20, 1999/02/18; №23, 1999/11/13. Другие события не были включены в общий список по причине отсутствия *EIT*-изображений: №47, 2001/11/06; №72, 2004/04/04; №85, 2005/06/12. Третьи – из-за отсутствия *MDI*<sup>1</sup> магнитограмм Солнца [165]: №15, 1998/10/19. Также не анализировались события, в которых не был известен солнечный источник: №2, 1997/04/22; №7, 1998/02/18; №28, 2000/08/11; №31, 2000/10/05; №40, 2001/04/22; №58, 2002/10/01.

В ходе анализа была выполнена проверка событий из каталога *CDAW*: с помощью базы данных ФП и межпланетных возмущений, созданной в ИЗМИРАН [45,47]; по данным электронного каталога корональных выбросов *SOHO/LASCO* [196]; а также на основе всех доступных солнечных и солнечно-земных данных, полученных из наземных и космических наблюдений. В результате этой проверки были внесены некоторые уточнения и поправки, касающиеся отождествления ГМБ с солнечными эрупциями.

Помимо деления на классы и уровни отождествления с источником возмущения, все события были разделены на те, которые произошли в активной области (АО) и те, которые связаны с эрупцией волокна вне АО. Последние отмечены в каталоге *CDAW* как «*QS*», т.е. спокойная солнечная область. Причина такого деления заключается в том, что эрупции этих двух категорий сильно отличаются друг от друга как диммингами и ПЭ аркадами, так и создаваемыми ими эффектами космической погоды (см., напр., [69,97,184]).

#### 4.1.2. Анализируемые параметры

В качестве параметра, характеризующего интенсивность геомагнитной бури, нами использовался минимальный часовой *Dst* индекс в окончательной версии (для событий 1997-2006 гг. – <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>). Отметим, что на момент публикации каталога *CDAW* [203] была доступна только часть окончательно утвержденных индексов, и для ряда событий (в частности, для событий 2004-2006 гг.) в каталоге принимались

---

<sup>1</sup> Michelson Doppler Imager

предварительные значения  $Dst$  индекса. После утверждения финальных данных в событиях №73 (2004/07/23) и №83 (2005/05/20)  $Dst$  индексы получились немного больше, чем  $-100$  нТл. Тем не менее, из-за высокой степени отождествления с источником ( $SI$ ), они были оставлены в списке рассматриваемых событий.

Что касается космических лучей, то в качестве максимальной величины ФП принимались минимальные значения плотности КЛ в период события, полученные для жесткости протонов 10 ГВ методом глобальной съемки [20,50]. В ряде сложных событий наблюдалось наложение нескольких эффектов, например, в событиях №67-68 (2003/10/30) (см. рис. 4.3) и №50-51 (2002/04/18-20). Из рис. 4.3 видно, что 2003/10/29 наблюдается первый минимум в КЛ, после чего на фазе начавшегося восстановления первого ФЭ начинает развиваться второе ФП. В таких случаях в таблицу 2.1 вносилась величина только первого ФП, поскольку точную величину второго ФП определить невозможно.

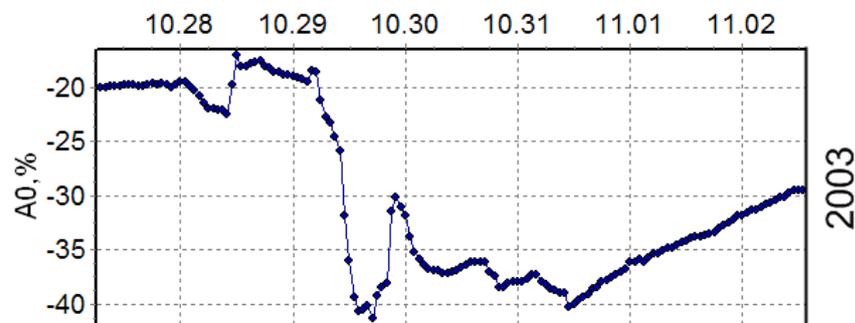


Рис. 4.3. Пример наложения нескольких Форбуш-понижений в октябре 2003 г.

При рассмотрении временных параметров ГМБ и ФП, в качестве момента эрупции на Солнце бралось время пика, соответствующей вспышки в мягком рентгене (по данным  $GOES^1$ ). Для нескольких событий, связанных с эрупцией волокна вне АО и не сопровождающихся рентгеновской вспышкой, в качестве времени эрупции принималось время пика эмиссии ПЭ аркады, видимой в

<sup>1</sup> URL: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>

канале 195 Å.

В настоящей работе анализировались два транзитных времени: начала возмущения  $\Delta T_O$  – интервал между временем эрупции на Солнце и временем прихода соответствующей ударной волны к Земле, практически совпадающем с  $SSC^1$  (*Storm Sudden Commencement*.) и пика ГМБ  $\Delta T_P$  (интервал между временем эрупции на Солнце и пиком геомагнитной бури, т.е. моментом минимального часового значения  $Dst$  индекса).

Для расчета эруптивного магнитного потока анализировались изображения Солнца в канале 195 Å (преобладающая линия  $FeXII$ , характеристическая температура 1.3 МК), получаемые на космическом телескопе КУФ диапазона *SOHO/EIT* [57]. Соответствующие *FITS*-файлы были взяты из электронного *EIT*-каталога<sup>2</sup>. Эти изображения получают обычно в патрульных наблюдениях с интервалом 12 мин. Солнечное вращение в анализируемых изображениях компенсировалось, и затем из каждого из них вычитался один и тот же кадр до события [68]. В большинстве случаев охватывалось 3-4 часа с начала эрупции. За это время основные димминги и аркады уже полностью формируются, а эволюционных, не относящихся к делу структур такого рода обычно бывает немного. В ряде случаев наблюдения с 12-ти мин интервалом на телескопе *EIT* проводились не в канале 195 Å, а в канале 304 Å. В такой ситуации, когда это было возможно, для формирования фиксированных разностных изображений и определения параметров диммингов и аркад использовались два или три изображения в канале 195 Å, полученные с интервалом 6 часов. Например, это было сделано для солнечных эрупций, соответствующих событиям: №41, 2001/08/14; №63, 2003/05/27; №84, 2005/05/26.

Обработка *FITS*-файлов выполнялась с помощью специальной программы, разработанной на языке *IDL*. Программа позволяет выполнить следующие необходимые операции. Во-первых, с ее помощью производится

<sup>1</sup> URL: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUDDEN\\_COMMENCEMENTS/storm2](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/storm2)

<sup>2</sup> URL: <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>

калибровка исходных *FITS*-файлов телескопа *SOHO/EIT*. Во-вторых, выполняется компенсация солнечного вращения. На третьем этапе осуществляется вычитание из всего набора изображений фиксированного кадра до начала события. Это позволяет видеть изменения яркости, происходящие на видимом солнечном диске в связи с анализируемой эрупцией. В-четвертых, по выбранным критериям выделяются площадки существенных диммингов и ПЭ аркад, образующихся в области анализируемой эрупции. На пятом шаге происходит измерение площадей и излучения (суммарной яркости) в областях диммингов и аркад. И, наконец, на шестом этапе осуществляется совмещение полученных изображений диммингов и аркад с магнитограммами *SOHO/MDI* и вычисление магнитных потоков на фотосфере, соответствующих этим образованиям.

В ходе анализа были выявлены пороги относительных изменений яркости, оптимальные для выделения диммингов и аркад. По ряду причин выбирались именно относительные, а не абсолютные пороги. Во-первых, только относительные пороги позволяют учесть вклад диммингов в структурах, чья яркость была сравнительно небольшая перед эрупцией. Во-вторых, благодаря относительным порогам можно уменьшить влияние временных вариаций характеристик *EIT*-детектора, а также изменений в калибровочных процедурах. В-третьих, относительные пороги позволят в будущем применять количественные результаты данного анализа к данным других КУФ телескопов, в частности, телескопа *AIA*<sup>1</sup> [126], установленного на борту космического аппарата *SDO*<sup>2</sup>.

Параметры диммингов вычислялись на так называемом «портрете», который формируется по максимальной глубине депрессии (т.е. минимальной яркости) в каждом пикселе по всему набору изображений. Было установлено, что критерием выделения диммингов целесообразно считать снижение яркости вследствие эрупции более, чем на 40%. При меньших величинах порога на

---

<sup>1</sup> Atmospheric Imaging Assembly

<sup>2</sup> Solar Dynamics Observatory

разностных изображениях появляется много удаленных эволюционных диммингов, не связанных с рассматриваемой эрупцией, а при больших – пропадают некоторые существенные димминги, расположенные вблизи центра эрупции и явно относящиеся к ней.

Для ПЭ аркад оптимальным оказался критерий, выделяющий площадку над центром эрупции, в которой яркость КУФ излучения превышает 5% от максимальной в данный момент времени. Как известно, площадь ПЭ аркады увеличивается со временем. Поэтому, чтобы избежать неоднозначности, выделение ПЭ аркады производилось во время, близкое к моменту максимального потока излучения из обозначившейся площадки. Обычно это время близко ко времени пика соответствующей вспышки в мягком рентгене или немного запаздывает относительно него. В частности, для событий, связанных с эрупцией волокна вне АО, площадь аркады вычислялась во время пика в мягком рентгене. В событиях, связанных с большой солнечной эрупцией в АО и сопровождающихся интенсивной вспышкой (например, вспышкой класса X), часто наблюдается сильное рассеяние света и широкие яркие артефактные полосы в момент максимума вспышки. В таких случаях, для выделения аркад и измерения их параметров брался первый кадр, на котором не было искажений такого рода.

Полученный таким образом суммарный магнитный поток диммингов и ПЭ аркад ( $\Phi$ ) продольного поля на уровне фотосферы является наиболее полным и подходящим параметром для анализа геоэффективности солнечных эрупций, поскольку интенсивность ГМБ, амплитуда ФП, а также транзитные времена во многом определяются магнитными характеристиками CMEs/ICMEs и их источниками на Солнце. Эруптивный параметр  $\Phi$  оценивается в пределах контуров диммингов и аркад, определенных с помощью вышеописанных критериев. В данном анализе для каждого события были вычислены магнитные поля на уровне фотосферы на основе данных прибора *SOHO/MDI*<sup>1</sup>. Для

---

<sup>1</sup> URL: <http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>

большинства событий (для 43 из 50) использовались 1 мин магнитограммы, но для 7 событий мы были вынуждены использовать магнитограммы с 5 минутной экспозицией. Специально проведенный анализ показал, что эруптивные магнитные потоки, рассчитанные по соседним 1- и 5- мин магнитограммам, различаются всего на несколько процентов.

Для оценки фотосферных магнитных потоков диммингов и ПЭ аркад, а также их суммарного потока брались магнитограммы до события, ближайšie ко времени эрупции. При дальнейшем анализе мы использовали суммарный магнитный поток диммингов и аркад как главный параметр солнечной эрупции.

#### 4.1.3. Таблица событий

В результате описанных выше процедур, было рассмотрено около 50 солнечных эрупций 23-его цикла солнечной активности и сформирована таблица анализируемых событий (см. таблицу 4.1). Колонка 1 содержит порядковый номер геомагнитной бури, соответствующий номеру события в каталоге *CDAW* [203,204]. В колонках 2-5 отображена информация о характеристиках соответствующего межпланетного возмущения, в частности о времени пика ГМБ, минимальном значении *Dst* индекса, амплитуде ФП ( $A_F$ ), а также дате/времени прихода межпланетной ударной волны (*SSC*). В колонке 6 обозначен класс события и уровень отождествления с источником. Буква «R» означает, что информация по событию была нами скорректирована по сравнению с каталогом *CDAW*. Колонки 7-10 содержат информацию относительно солнечных эрупций: дату/время наблюдаемой эрупции, соответствующие пику вспышки в мягком рентгене на Солнце; балл и координаты рентгеновской вспышки, наблюдаемой на *GOES*; тип CME, который зависит от локализации источника эрупции относительно АО (*AR* – в АО, *non-AR* – вне АО). В колонке 11 приведены рассчитанные суммарные магнитные потоки для каждого из рассматриваемых событий. И, наконец, в колонках 12-14 представлены транзитные времена начала ( $\Delta T_O$ ) и пика возмущения ( $\Delta T_P$ ).

Таблица 4.1.

Параметры сильных геомагнитных бурь, Форбуш-понижений 23-го цикла и их солнечных источников

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CDAW №	Параметры межпланетного возмущения				Уровень надежности	Параметры солнечной эрупции				Магнитный поток ( $\Phi$ )	Транзитные времена	
	Дата/время пика ГМБ	Dst, нТл	ФП, %	Дата/время SSC		Дата/время	Класс вспышки	Координаты	Тип		$\Delta T_0$	$\Delta T_p$
3	1997/05/15, 13	-115	1.7	15, 01:59	S1	12, 04:55	C1.3	N21W06	AR	95	69	80
4	1997/10/11, 04	-130	1.1	10, 16:12	S1	06, ~15:00	—	S27W05	non-AR	22	97	109
5	1997/11/07, 05	-110	2.1	06, 22:48	S1	04, 05:58	X2.1	S14W33	AR	161	65	71
9	1998/05/04, 06	-205	3.5	04, 02:15	M2	02, 13:42	X1.1	S15W15	AR	220	37	40
16-17	1998/11/08, 07	-149	7.4	08, 04:51	S1, R	05, 19:55	M8.4	N22W18	AR	276	57	59
18	1998/11/13, 22	-131	2.3	13, 01:43	S1	09, 17:58	C2.3	N18E00	non-AR	76	80	100
21	1999/09/23, 00	-173	1.9	22, 12:09	S1	20, 05:50	C2.8	S21W05	non-AR	47	54	66
22	1999/10/22, 07	-237	2.4	21, 02:25	S1	17, 23:25	C1.2	S26E08	non-AR	64	75	104
24	2000/02/12, 12	-133	3.7	11, 23:52	S1, R	09, 20:06	C7.4	S17W40	AR	138	52	64
26	2000/05/24, 09	-147	3.3	23, 14:25	M2	20, 05:35	C7.6	S15W08	AR	69	81	99
27	2000/07/16, 01	-301	11.7	15, 14:37	S1	14, 10:24	X5.7	N22W07	AR	470	28	39
29	2000/08/12, 10	-235	2.7	11, 18:46	S1	09, 16:22	C2.3	N11W11	AR	132	50	66
30	2000/09/18, 00	-201	8.1	17, 17:00	M2	16, 04:26	M5.9	N14W07	AR	234	37	44
32	2000/10/14, 15	-107	3.6	12, 22:28	S1	09, 23:43	C6.7	N01W14	AR	122	71	111
34	2000/11/06, 22	-159	7.8	06, 09:47	S2, R	03, 19:02	C3.2	N02W02	AR	214	63	75
35	2000/11/29, 14	-119	2.7	28, 05:25	M2	26, 16:48	X4.0	N18W38	AR	149	37	69
36	2001/03/20, 14	-149	2.9	19, 11:14	S2, R	15, 21:59	C1.9	N11W09	AR	108	85	112
37	2001/03/31, 09	-387	4.1	31, 00:52	M2	29, 10:15	X1.7	N20W19	AR	377	39	47
38	2001/04/12, 00	-271	12.8	11, 13:43	M2	10, 05:26	X2.3	S23W09	AR	294	32	43
41	2001/08/17, 22	-105	6.3	17, 11:03	S1	14, 12:42	C2.3	N16W36	non-AR	68*	70	81
42	2001/09/26, 02	-102	8.3	25, 20:25	S1	24, 10:38	X2.6	S16E23	AR	271	34	39
43	2001/10/01, 09	-148	1.9	30, 19:24	S1	28, 08:30	M3.3	N08E19	AR	170	59	72

Таблица 4.1.(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
44	2001/10/03, 15	-166	2.5	03, 02:00	S1	29, 11:06	M1.8	N13E03	AR	134	87	100
45	2001/10/21, 22	-187	5.4	21, 16:48	S1	19, 16:30	X1.6	N15W29	AR	220	48	53
46	2001/10/28, 12	-157	1.9	28, 03:13	M2	25, 15:02	X1.3	S18W19	AR	293	60	69
48	2001/11/24, 17	-221	9.2	24, 05:56	M2	22, 23:30	M9.9	S14W36	AR	237	30	41
50	2002/04/18, 08	-127	6.2	17, 11:07	S1	15, 03:55	M1.2	S15W01	AR	236	55	76
51	2002/04/20, 09	-149	-	20, 00:00	S1	17, 08:24	M2.6	S14W34	AR	286	64	73
52	2002/05/11, 20	-110	1.4	11, 10:14	S1	08, 13:27	C4.2	S12W07	AR	137	69	79
55	2002/08/21, 07	-106	0.9	20, 14:00	S2	16, 12:32	M5.2	S14E20	AR	117	97	114
59	2002/10/04, 09	-146	3.0	02, 23:00	S1	30, 02:00	C2.5	S17W17	non-AR	20	93	127
63	2003/05/30, 00	-144	7.7	29, 12:24	M2	27, 23:07	X1.3	S07W17	AR	160*	37	49
64	2003/06/18, 10	-141	3.7	18, 05:01	M2	14, ~05:00	-	N22W15	non-AR	46	96	101
66	2003/08/18, 16	-148	2.6	17, 14:21	S1, R	14, 18:38	C3.1	S14E00	AR	177	68	93
67	2003/10/30, 01	-353	28.0	29, 06:11	S1	28, 11:10	X17.2	S16E08	AR	871	19	38
68	2003/10/30, 23	-383	-	30, 16:00	S1	29, 20:49	X10.0	S15W02	AR	520	19	26
69	2003/11/20, 21	-422	4.7	20, 08:03	S1	18, 08:31	M3.9	N00E18	AR	133	48	60
70	2004/01/22, 14	-130	8.6	22, 01:37	S1	20, 00:40	C5.5	S13W11	AR	273	49	61
73	2004/07/23, 03	-99	4.3	22, 10:36	S1	20, 12:32	M8.6	N10E35	AR	172	46	62
74	2004/07/25, 17	-136	4.6	24, 06:13	S2, R	22, 22:58	M1.6	N05E04	AR	257	31	66
75	2004/07/27, 14	-170	13.5	26, 22:49	S1	25, 13:49	M2.2	N08W33	AR	363	33	48
76	2004/08/30, 23	-129	0.7	29, 10:06	S2, R	26, 13:04	B8.4	S11W38	AR	46.4	69	106
77	2004/11/08, 07	-374	5.2	07, 18:27	M2, R	06, 00:34	M3.9	N09E05	AR	252	42	54
78	2004/11/10, 11	-263	8.3	09, 19:00	M2, R	07, 16:06	X2.0	N09W17	AR	290	51	67
79	2005/01/18, 09	-103	11.8	18, 06:00	M2, R	17, 09:52	X3.8	N15W25	AR	378	20	23
81	2005/05/08, 19	-110	5.1	08, 08:00	M2, R	06, 17:05	C8.5	S09E28	AR	294	39	50
82	2005/05/15, 09	-247	9.5	15, 02:38	S1	13, 16:57	M8.0	N12E12	AR	266	34	40
83	2005/05/20, 09	-83	1.1	20, 04:01	S1	16, 13:01	C1.2	N13W29	AR	54	87	92
84	2005/05/30, 14	-113	4.3	29, 09:52	S2	26, 14:20	B7.5	S12E13	AR	89*	68	96
90	2006/12/15, 08	-162	8.6	14, 14:14	S1	13, 02:40	X3.4	S06W24	AR	222	35	53

## 4.2. Величина Форбуш-понижения как индикатор информативности эруптивного параметра $\Phi$

Чтобы оценить информативность суммарного магнитного потока диммингов и аркад  $\Phi$ , анализировалась его взаимосвязь с величиной Форбуш-понижения ( $A_F$ ), поскольку плотность КЛ не зависит от знака  $B_z$  компоненты магнитного поля в ICMEs, в отличие от величины ГМБ. Амплитуда ФП определяется, в основном, напряженностью магнитного поля в облаке выброса, а также скоростью распространения и размерами ICME, в то время как интенсивность ГМБ определяется величиной и продолжительностью  $B_z$  южной ориентации [53]. Сопоставление величины ФП с эруптивным магнитным потоком диммингов и аркад представляет интерес и само по себе, поскольку до этого оно не производилось.

На рис. 4.4 показаны зависимости величины  $A_F$  от суммарного магнитного потока диммингов и аркад  $\Phi$  для разных групп событий. Здесь и далее все события делятся на четыре типа: закрашенные фигуры (■ и ▲) обозначают однозначно отождествленные одиночные события, которые произошли в АО и вне АО соответственно; не закрашенными фигурами (□ и △) обозначены сложные события, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, с вероятным отождествлением с солнечным источником, также произошедшие в АО и вне АО соответственно. На левых рисунках рассматриваются однозначно отождествленные события, а затем на правых рисунках – добавленные к ним сложные события и/или события с вероятным отождествлением.

Из рисунка видно, что для данных событий имеет место вполне определенная линейная зависимость величины  $A_F$  от эруптивного магнитного потока  $\Phi$ . При увеличении эруптивного параметра  $\Phi$  от 30 до 900 (в единицах  $10^{20}$  Мкс) ожидаемая величина  $A_F$  возрастает от 0.8% до 25%. В аналитическом виде эта зависимость выглядит следующим образом:

$$A_F(\%) = -0.3 + 0.03\Phi \quad (4.2.1)$$

Для однозначно отождествленных одиночных событий (рис. 4.4*a*) коэффициент корреляции между  $A_F$  и параметром  $\Phi$  достигает  $r \approx 0.94$ . Отметим, что такая высокая корреляция получается не только из-за большого вклада от события №67 (2003/10/30), вызванного знаменитой солнечной эрупцией 2003/10/28. Высокая корреляция сохраняется и без учета этого события.

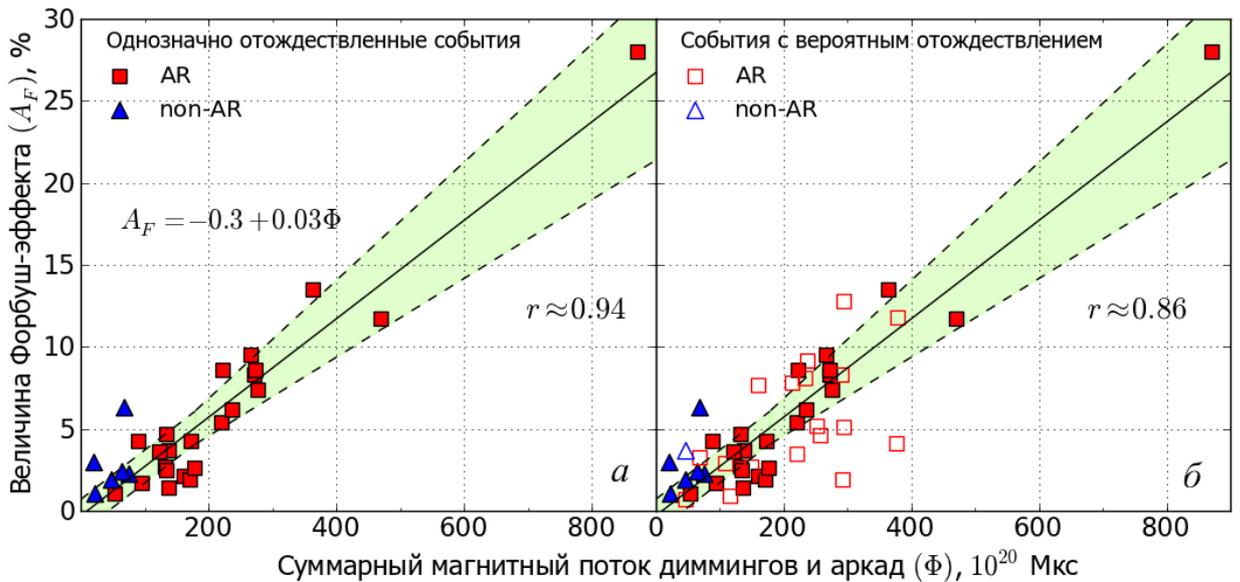


Рис. 4.4. Зависимость величины Форбуш-понижения ( $A_F$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад ( $\Phi$ ) на уровне фотосферы: (а) однозначно отождествленные одиночные события, которые произошли в активной области (АО) (■) и вне АО (▲); (б) все события, включая сложные события, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не однозначно отождествленные с солнечным источником, произошедшие в АО (□) и вне АО (△). Все события взяты из каталога CDAW.

Для дополнительной оценки разброса точек относительно линии регрессии были введены коридоры отклонений с границами в  $\pm 0.2$  от линии регрессии, но не менее 1% величины ФП. Последнее условие выполняется при следующих значениях эруптивного магнитного потока и амплитуды ФП:  $\Phi \leq 180 \times 10^{20}$  Мкс и  $A_F \leq 5\%$ . В результате, 18 из 29 событий (т.е. 62%) попадают внутрь выделенного коридора.

Как и следовало ожидать, если рассматривать все события вне зависимости от степени отождествления с источником, то разброс точек увеличивается, а коэффициент корреляции понижается (см. рис. 4.4б). Однако связь между амплитудой ФП и эруптивным параметром  $\Phi$  остается по-прежнему высокой ( $r \approx 0.86$ ). В этом случае в коридор отклонений попадает 22 из 48 точек, что составляет 46% от всех событий.

Из рис. 4.4 видно, что события, связанные с эрупцией волокон вне АО ( $\blacktriangle$  и  $\triangle$ ), характеризуются небольшими значениями магнитного потока  $\Phi < 75 \times 10^{20}$  Мкс и сосредоточены, в основном, в области небольших величин ФП. Очевидно, что причина этого заключается в том, что такие эрупции происходят в слабых магнитных полях. Тем не менее, 3 из 7 таких событий сопровождались ФП с амплитудами 3-6.3%. Это можно объяснить тем, что эрупции волокон вне активных областей, как правило, характеризуются большими размерами возмущения, а величина  $A_F$ , в отличие от интенсивности ГМБ, зависит от этой характеристики возмущения.

Чтобы расширить статистику, на втором этапе данные из каталога *CDAW* [203,204] были дополнены событиями с величиной  $A_F \geq 3\%$ , которые не сопровождались интенсивными ГМБ, с  $Dst < -100$  нТл. Необходимая информация бралась из базы данных *DBFE* (см. раздел 1.5). Таким образом, было рассмотрено около 80 событий. Как и в предыдущем случае, здесь также наблюдается линейная зависимость амплитуды  $A_F$  от эруптивного магнитного потока  $\Phi$  (см. рис. 4.5). Характеристики и аналитический вид этой зависимости немного отличаются от приведенной выше зависимости для *CDAW* событий:

$$A_F (\%) = 0.68 + 0.0025\Phi \quad (4.2.2)$$

Если рассматривать однозначно отождествленные одиночные события (рис. 4.5а), то в этом случае коэффициент корреляции будет равен  $r \approx 0.84$ . Границы коридора также отклонены на  $\pm 0.2$  от линии регрессии, но не менее 1.5% величины ФП. Минимальное условие выполняется при следующих значениях эруптивного магнитного потока и амплитуды ФП:  $\Phi \leq 273 \times 10^{20}$  Мкс и  $A_F \leq$

7.5%. Вычисления показывают, что 26 из 51 событий (т.е. 51%) попадают внутрь выделенного коридора. Если же рассматривать все события, включая ФП с вероятным отождествлением (рис. 4.5б), то коэффициент корреляции будет равен  $r \approx 0.78$ , а в коридор попадут 37 из 78 событий (т.е. 47%).

Тот факт, что амплитуда  $A_F$  зависит от эруптивного магнитного потока, дает основание проанализировать зависимости и других характеристик космической погоды, в частности, интенсивности ГМБ, от эруптивного параметра  $\Phi$ .

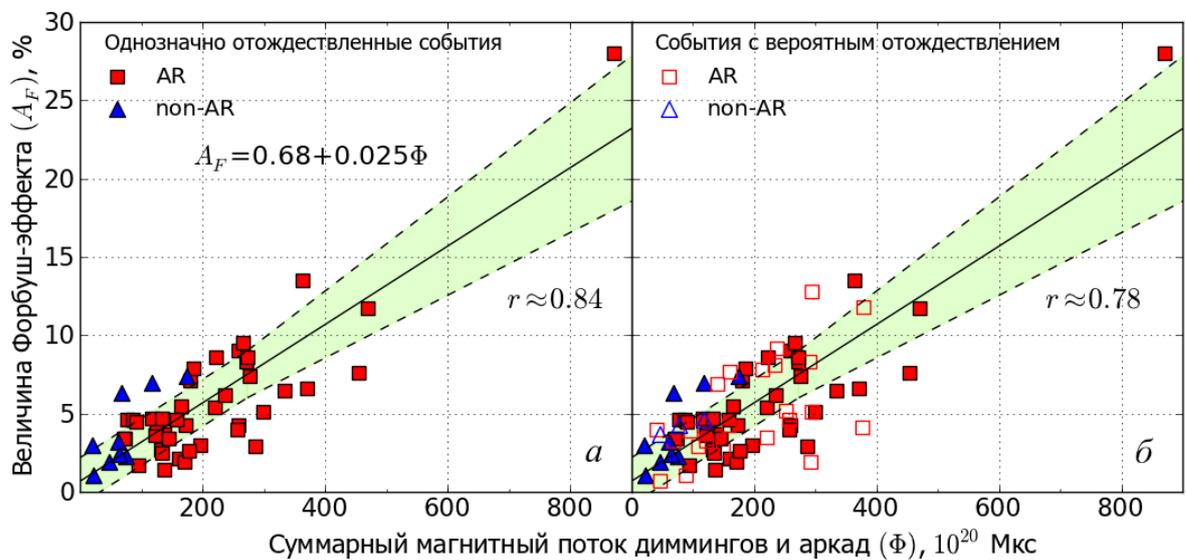


Рис. 4.5. Зависимость величины Форбуш-понижения ( $A_F$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы для расширенного ансамбля событий с включением ФП с амплитудой  $A_F \geq 3\%$ , которые не сопровождались интенсивными ГМБ с  $Dst < -100$  нТл.

### 4.3. Зависимость интенсивности геомагнитных бурь от эруптивного магнитного потока

Описанная в предыдущем разделе зависимость величины ФП ( $A_F$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад дает основания ожидать аналогичную зависимость между интенсивностью ГМБ ( $Dst$ ) и эруптивным магнитным потоком  $\Phi$ . При этом рассматривались следующие CDAW события: интенсивные ГМБ, в которых заведомо присутствовала отрицательная  $B_z$

компонента. На первом этапе не рассматривались факторы, определяющие эту компоненту. На рис. 4.6 представлены зависимости интенсивности ГМБ от суммарного магнитного потока  $\Phi$  для групп событий, произошедших в АО (■ и □) и вне АО (▲ и △). Как и ожидалось, между параметром  $\Phi$  и величиной  $Dst$  индекса наблюдается более слабая связь, чем с амплитудой ФП. Тем не менее, коэффициенты корреляций для различных групп событий по-прежнему остаются высокими.

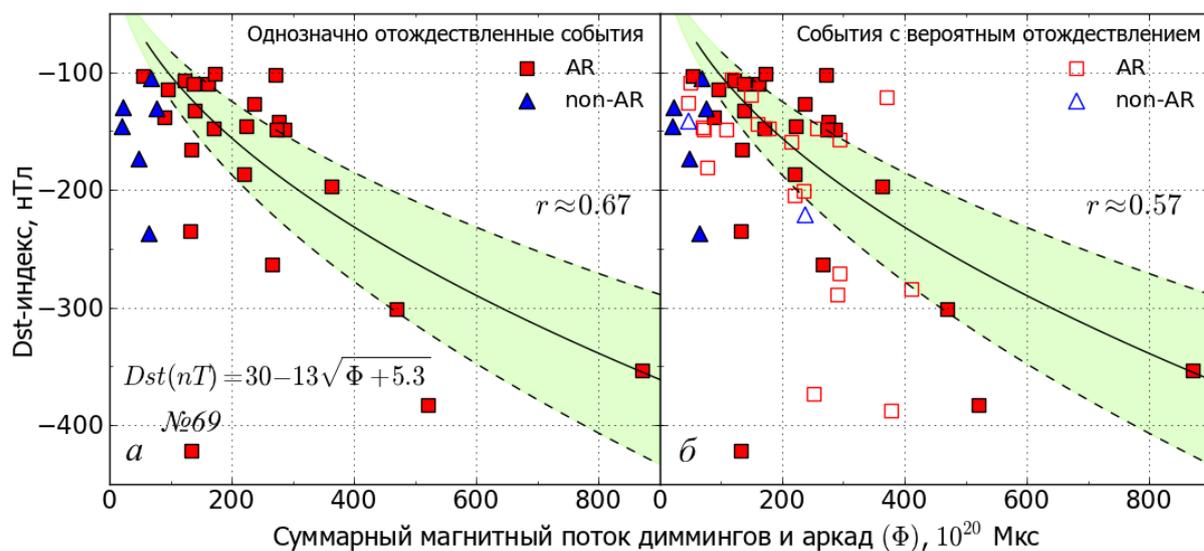


Рис. 4.6. Зависимость интенсивности геомагнитной бури ( $Dst$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы ( $\Phi$ ). Все события взяты из каталога *CDAW*.

Для начала рассмотрим однозначно отождествленные одиночные события (рис. 4.6а), которые произошли в АО (■). Из рисунка видно, что даже при простом анализе (без дополнительного учета факторов, определяющих  $B_z$ ) наблюдается отчетливая зависимость величины  $Dst$  индекса от эруптивного параметра  $\Phi$ . Видно, что чем больше величина суммарного магнитного потока диммингов и аркад, тем интенсивнее соответствующая ГМБ. Отметим, что событие №69 (буря 2003/11/20; см. таблицу 4.1) является заведомым исключением. Это знаменитое событие было вызвано довольно умеренной эрупцией на Солнце (2003/11/18) и сравнительно медленным СМЕ. Тем не

менее, при относительно слабой вспышке и скромных значениях суммарного эруптивного потока  $\Phi$  это была самая интенсивная ГМБ в 23-ем цикле солнечной активности ( $Dst \approx -422$  нТл). Причины исключительности этого события рассматривались в ряде работ (см. [134,166] и ссылки в них), однако до сих пор они остаются невыясненными.

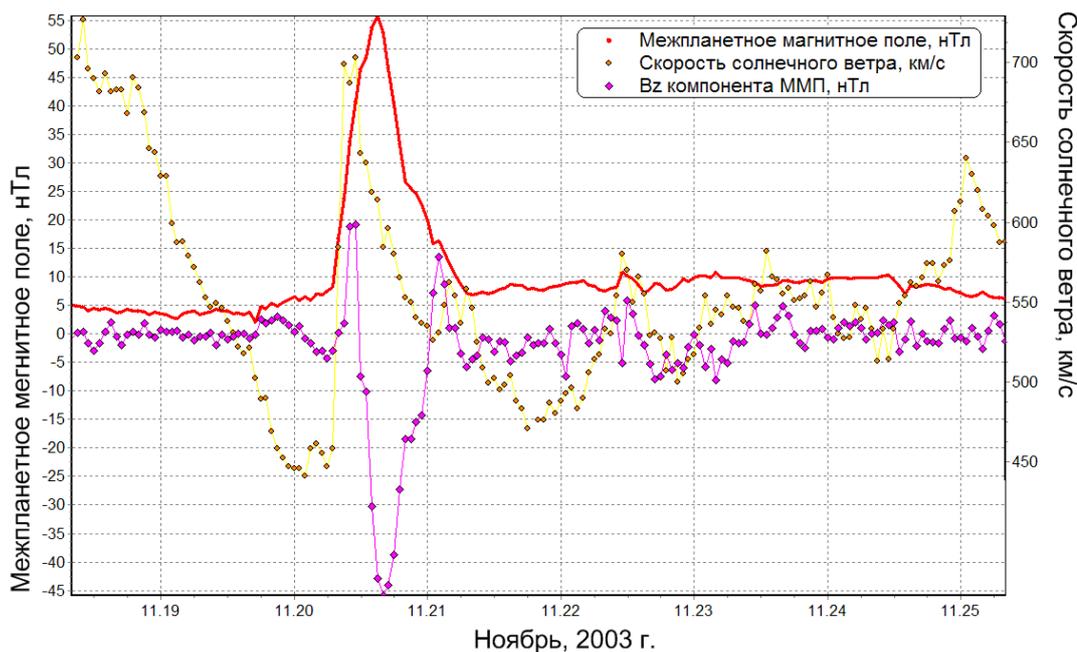


Рис. 4.7. Характеристики межпланетной среды, измеренные на космическом аппарате ACE (ноябрь, 2003 г.).

Для настоящего анализа важным является тот факт, что в данном случае сильнейшая ГМБ ( $Dst \approx -422$  нТл) сочеталась со сравнительно слабым ФП ( $A_F \approx 4.7\%$ ). Такое сочетание характеристик показывает, что соответствующий ICME имел относительно небольшие размеры. В свою очередь это означает, что в процессе распространения от Солнца до Земли магнитное облако расширилось незначительно и, следовательно, сохранило внутри себя довольно сильное поле. Этот важный вывод подтверждается результатами различных измерений в межпланетном пространстве и вблизи Земли. Как наземные, так и космические измерения подтверждают тот факт, что размер ICME в данном событии был небольшой, а величина магнитного поля внутри выброса достигала  $B_i \approx 52$  нТл.

Дополнительным важнейшим фактором для возникновения сильнейшей ГМБ послужил тот факт, что почти во всем межпланетном облаке практически все магнитное поле было ориентировано как южная  $B_z$  компонента (см. рис. 4.7). Подробный анализ этого события с учетом описанных выше факторов проводится в настоящее время В.В. Гречневым и др.

Если исключить из рассмотрения событие №69, то из рис. 4.6а, на котором показаны только однозначно отождествленные события, видно, что при увеличении суммарного магнитного потока от 100 до 900 (в  $10^{20}$  Мкс) интенсивность ГМБ бури ( $Dst$ ) увеличивается от  $-100$  до  $-400$  нТл. В аналитическом виде эта зависимость выглядит как:

$$Dst(\text{нТл}) = 30 - 13\sqrt{\Phi + 5.3} \quad (4.3.1)$$

Коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами  $Dst$  и рассчитанными по формуле (4.3.1) достигает  $r \approx 0.67$ . Тем не менее, даже при наличии высокой корреляции наблюдается довольно большой разброс точек. Вероятно, основная причина в том, что мы не учитываем факторы, определяющие знак  $B_z$  компоненты в выбросе. Что касается коридора ошибок, то в этом случае его границы приняты на уровне  $\pm 20\%$  от линии регрессии, и в него попадают 12 из 29 событий (т.е. 41%) из группы  $S1$ . При учете события №69 коэффициент корреляции ухудшается и принимает значение  $r \approx 0.53$ .

Из рис. 4.6а также видно, что события, произошедшие вне АО (▲), отличаются от событий, связанных с эрупциями в АО (■). Несмотря на небольшие суммарные магнитные потоки, такие события вызывают интенсивные геомагнитные бури. На данном рисунке 5 из 6 точек лежат ниже линии регрессии и коридора отклонений. В этом случае, отклонение в сторону более интенсивных ГМБ, не может быть объяснено большими размерам ICMEs, поскольку, в отличие от ФП, на величину ГМБ размеры возмущения не влияют. Интенсивность ГМБ определяется не глобальными характеристиками возмущения, а локальными параметрами той части ICME, в которую попадает Земля.

На рис. 4.6б к однозначно отождествленным одиночным событиям (■ и ▲, группа *S1*) добавлены сложные события и/или события с вероятно отождествленным солнечным источником, произошедшие в АО (□) и вне АО (△) (группы *S2* и *M2*). Коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами ГМБ и рассчитанными по формуле (4.3.1) для этого общего ансамбля событий достигает  $r \approx 0.57$ . Если же учесть событие №69, то коэффициент корреляции будет равен  $r \approx 0.49$ .

Таким образом, интенсивность ГМБ обнаруживает зависимость от суммарного магнитного потока диммингов и аркад продольного поля на уровне фотосферы в соответствующем источнике на Солнце.

#### 4.4. Временные характеристики возмущений межпланетной среды

Этот раздел посвящен анализу связи суммарного магнитного потока диммингов и аркад с двумя транзитными временами: временем начала возмущения ( $\Delta T_O$ ) и временем пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ). Напомним, что оба транзитных времени отсчитываются в данном случае от момента максимума соответствующей вспышки в мягком рентгене (см. рис. 4.8).

Разумеется, транзитные времена зависят от многих факторов и не определяются только мощностью солнечной эрупции. К примеру, транзитное время начала ( $\Delta T_O$ ) зависит также и от скорости фонового солнечного ветра, состояния гелиосферного токового слоя, степени взаимодействия с другими возмущениями в межпланетном пространстве и т.д. Что касается транзитного времени пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ), то помимо мощности эрупции на Солнце, оно будет определяться тем, в какой части ICMEs (ведущей, хвостовой и т.д.) будет преобладать  $B_z$  с южной (отрицательной) ориентацией. Тем не менее, используя эруптивный магнитный поток  $\Phi$ , можно оценить транзитные времена и, следовательно, транзитную скорость ICMEs.

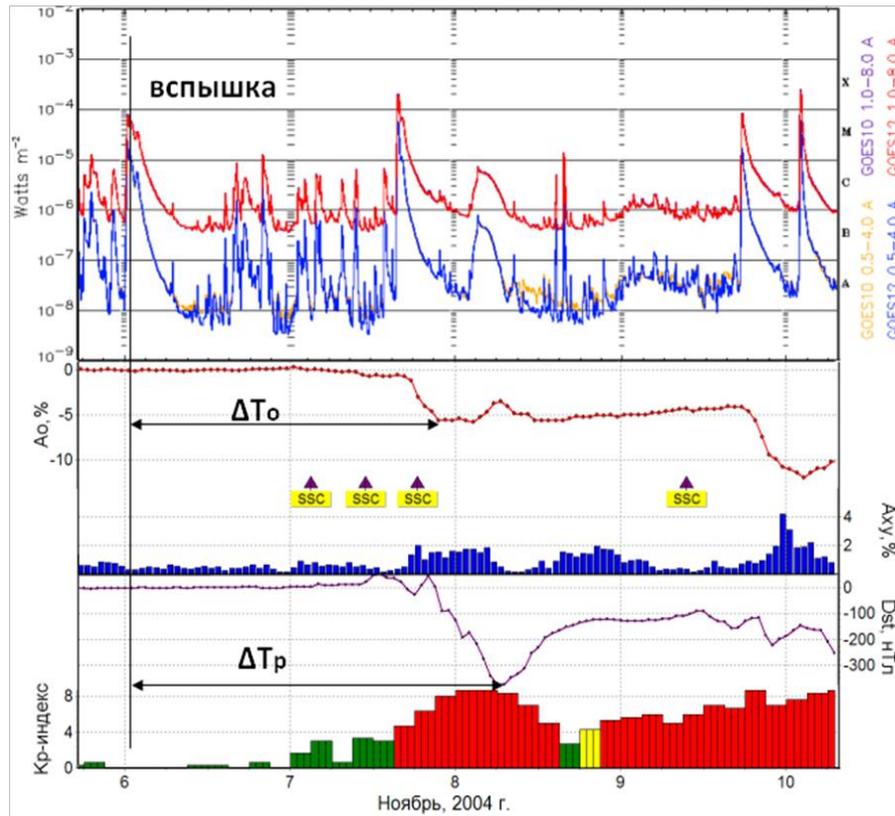


Рис. 4.8. Транзитные времена: начала возмущения ( $\Delta T_0$ ) и пика ГМБ ( $\Delta T_p$ ).

Рис. 4.9а демонстрирует отчетливую связь между эруптивным параметром  $\Phi$  и транзитным временем начала возмущения  $\Delta T_0$  для однозначно отождествленных событий (группа  $S1$ ), включающих в себя как эрупции в АО (■), так и вне АО (▲). Из рисунка видно, что чем больше суммарный магнитный поток (т.е. чем мощнее эрупция), тем быстрее возмущение проходит расстояние от Солнца до Земли и тем быстрее начинаются ГМБ и ФП. В событиях со слабым эруптивным магнитным потоком  $\Phi < 100$  (в единицах  $10^{20}$  Мкс) возмущения на Земле начинаются через  $\Delta T_0 \approx 70-95$  часов. Самым мощным эрупциям с  $\Phi = 500-900$  ( $10^{20}$  Мкс) соответствует время начала  $\Delta T_0 \approx 20$  часов, при котором транзитная скорость ICME достигает  $\sim 2100$  км/с. Аналитически эта зависимость может быть представлена следующим образом:

$$\Delta T_0 (\text{ч}) = 98 / (1 + 0.0044\Phi) \quad (4.4.1)$$

Коэффициент корреляции между рассчитанными по формуле (4.4.1) и наблюдаемыми величинами  $\Delta T_0$  для однозначно отождествленных событий

группы  $S1$  достигает  $r \approx 0.84$ . Кроме того, в  $\pm 20\%$  коридоре отклонений относительно линии регрессии, находится 21 событие из 31 (т.е. 68%). Отметим, что на данном графике нет существенно отклоняющихся точек, как это было в предыдущих случаях. Зависимость транзитного времени  $\Delta T_o$  от параметра  $\Phi$  практически не нарушается, если рассматриваемые события из группы  $S1$  дополнить событиями из групп  $S2$  и  $M2$  (см. рис. 4.9б).

Здесь коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами  $\Delta T_o$  и рассчитанными по формуле (4.4.1), достигает  $r \approx 0.81$ . В этом случае увеличивается разброс точек и уменьшается число событий попавших в коридор отклонений. Таких событий насчитывается 28 из 50 (т.е. 56%).

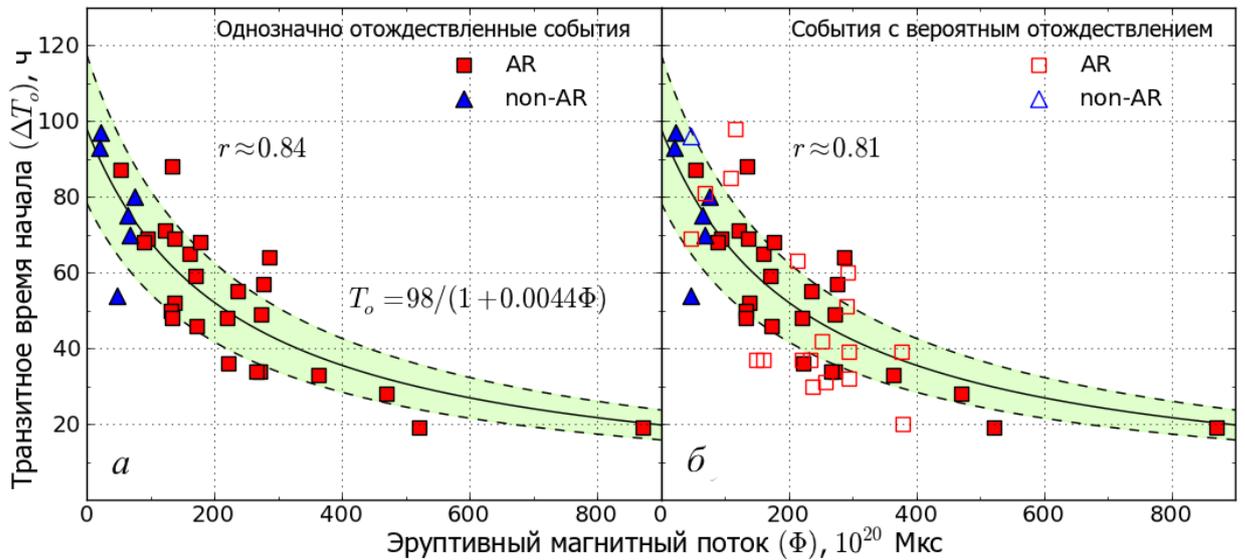


Рис. 4.9. Зависимость транзитного времени начала  $\Delta T_o$  от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад  $\Phi$ : (а) однозначно отождествленные события с одним источником (группа  $S1$ ); (б) все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не отождествленные однозначно с солнечным источником (группы  $S2$  и  $M2$ )

Определяющая роль солнечных эруптивных источников настолько существенна, что пиковое транзитное время  $\Delta T_p$  также обнаруживает аналогичную четкую зависимость от суммарного магнитного потока диммингов и аркад, несмотря на выше упомянутые мешающие факторы (см.

рис. 4.10). В аналитическом виде эта зависимость может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta T_p (\text{ч}) = 118 / (1 + 0.0044\Phi) \quad (4.4.2)$$

Из рис. 4.10а видно, что при значениях эруптивного магнитного потока  $\Phi < 100$  (в единицах  $10^{20}$  Мкс) транзитное время пика принимает значения  $\Delta T_p \approx 80-130$  часов, а при больших значениях  $\Phi = 500-900$  ( $10^{20}$  Мкс) –  $\Delta T_p \approx 20-40$  часов. Коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами  $\Delta T_p$  и рассчитанными по формуле (4.4.2) для событий из группы *S1*, достигает  $r \approx 0.81$ . В этом случае в  $\pm 20\%$  коридор отклонений попало 65% (20 из 31) и 58% (29 из 50) от всех событий из группы *S1* и *S1+S2+M2* соответственно. Что касается событий вне АО, то здесь отметим, что событиям с малым эруптивным магнитным потоком свойственны большие транзитные времена, что соответствует небольшой скорости распространения ICMEs.

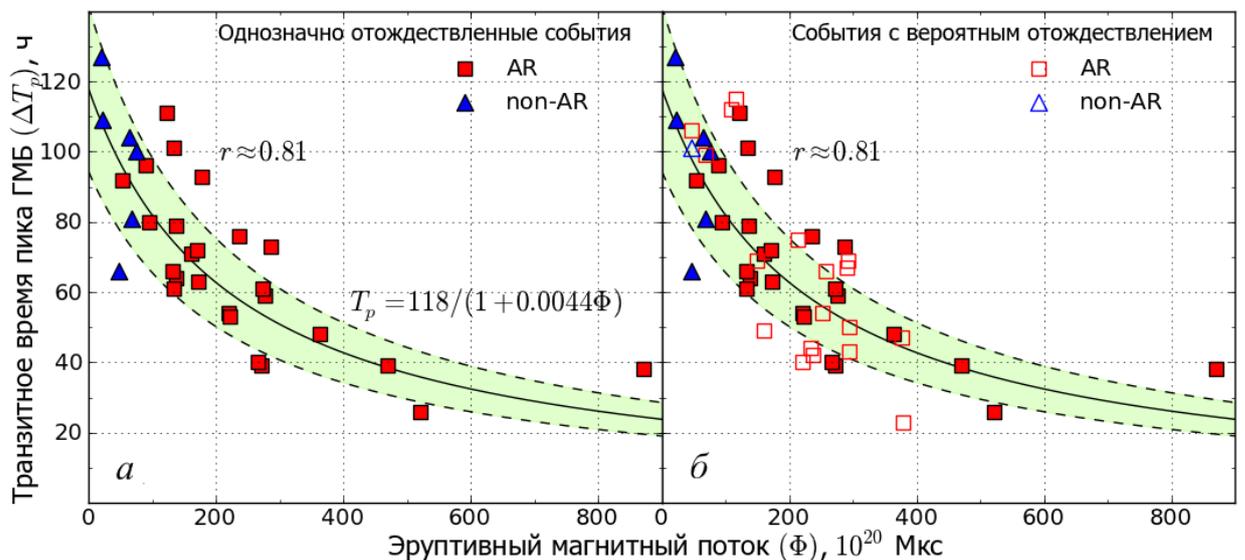


Рис. 4.10. Зависимость транзитного времени пика ГМБ ( $\Delta T_p$ ) от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад ( $\Phi$ ): (а) однозначно отождествленные события с одним источником (группа *S1*); (б) все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не отождествленные однозначно с солнечным источником (группы *S2* и *M2*).

Транзитное время начала ( $\Delta T_0$ ) характеризует не только приход ударной волны ( $SSC$ ) и начало возмущения, но и начало ФП. При этом время пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ) может не совпадать с моментом минимума интенсивности ГКЛ, т.е. пика ФП ( $\Delta T_{FD}$ ). Объясняется это тем, что на величину ФП и на интенсивность ГМБ влияют разные характеристики межпланетного возмущения. Время пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ) зависит от того, в какой части выброса (в оболочке, головной или хвостовой) будет наблюдаться  $B_z$  южной ориентации. Время же пика ФП ( $\Delta T_{FD}$ ) определяется, прежде всего, глобальными характеристиками возмущения и максимальной напряженностью магнитного поля в выбросе. Рис. 4.11 демонстрирует такую же хорошую зависимость  $\Delta T_{FD}$  от эруптивного параметра  $\Phi$ , как и  $\Delta T_P$ . Данную зависимость можно представить в следующем виде:

$$\Delta T_{FD} = 130 / (1 + 0.0044\Phi) \quad (4.4.3)$$

Коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами  $\Delta T_{FD}$  и рассчитанными по формуле (4.4.3) достигает  $r \approx 0.76$ , а в  $\pm 20\%$  коридор относительно линии регрессии попадает 20 из 31 точек, что составляет 65% от числа всех рассматриваемых событий.

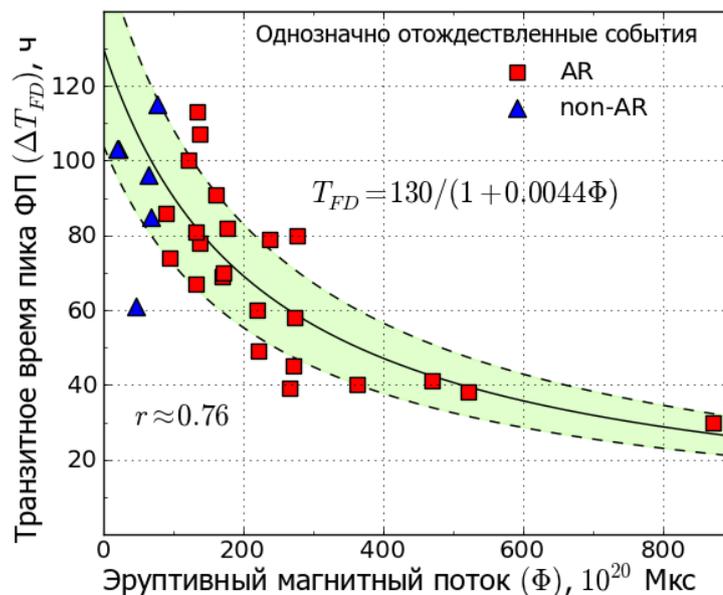


Рис. 4.11 Зависимость транзитного времени пика ФП ( $\Delta T_P$ ) от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад ( $\Phi$ ). Однозначно отождествленные события с одним источником (группа  $SI$ ).

Если сопоставить транзитные времена пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ) и ФП ( $\Delta T_{FD}$ ) для однозначно отождествленных событий, то коэффициент корреляции будет достигать  $r \approx 0.89$ . Чаще всего, при прогнозировании космической погоды стоит задача оценить время прихода возмущения (т.е., определить  $\Delta T_O$ ) и время максимума ГМБ ( $\Delta T_P$ ). Тем не менее, по временному профилю ФП можно многое сказать об источнике возмущения межпланетной среды (о типе, положении на Солнце и т.д.), особенно в тех случаях, когда наблюдаются смешанные события (подробнее см. в разделе 2.5).

Следует отметить, что здесь снова события, связанные с эрупциями волокон вне активных областей ( $\blacktriangle$ ), при малых значениях магнитного потока характеризуются, в основном, большим транзитным временем. А тот факт, что между транзитными временами и эруптивным параметром  $\Phi$  имеет место вполне определенная зависимость, позволяет заключить, что нет необходимости привлекать дополнительную информацию о скорости СМЕ/ICMEs.

Физический смысл выражений (4.4.1) и (4.4.2) становится более понятным, если представить их в виде  $\Delta T = R/(V_0 + k\Phi)$ . Здесь  $V_0$  – скорость фонового солнечного ветра, а  $k\Phi$  – скорость СМЕs/ICMEs, зависящая от параметров солнечной эрупции. При  $R = 1$  АЕ и  $V_0 \approx 426$  км/с коэффициент  $k$  для транзитного времени начала возмущения ( $\Delta T_O$ ) принимает значение 1.86, а для транзитного времени пика ГМБ ( $\Delta T_P$ ) – 1.41 ( $\Delta T$  выражается в секундах). Если эруптивная составляющая  $k\Phi$  мала, то время прихода возмущения определяется, в основном, фоновой скоростью солнечного ветра. В случае мощных СМЕs, где  $k\Phi \gg V_0$ , начальная скорость выброса задается параметрами эрупции. При этом, несмотря на аэродинамическое сопротивление солнечного ветра, транзитное время начала возмущения может составлять  $\Delta T_O \approx 20 \div 24$  часа. Отметим, что в работе [159] приводится аналогичное по смыслу выражение для транзитной скорости в пределах 1 АЕ:  $V_{TR}(\text{км/с}) = 400 + 0.8V_{СМЕ}$ ,

где вместо эруптивного магнитного потока стоит скорость CMEs в картинной плоскости.

Таким образом, по значению суммарного магнитного потока диммингов и аркад можно судить не только о величине соответствующего ФП и интенсивности ГМБ, но и об ожидаемых транзитных временах, характеризующих как время прихода ICMEs к Земле, так и пики ГМБ и ФП.

#### **4.5. Апробация разработанной методики ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций**

В качестве эксперимента раннее прогнозирование возмущений космической погоды по результатам диагностики солнечных эрупций проводилось в 2010 г. (на фазе роста начавшегося 24-го цикла) в Центре прогнозов космической погоды ИЗМИРАН и дало, в целом, положительные результаты. По параметрам диммингов и аркад большинство из эрупций в этот период, близкий к минимуму активности, были относительно небольшими и, согласно оценкам, должны были приводить к довольно слабым возмущениям космической погоды, что и подтвердилось. Одна из самых крупных солнечных эрупций произошла 3 апреля 2010 года и сопровождалась вспышкой  $B7.4$  в мягком рентгене, пик которой пришелся на 09:54 UTC. Димминги и постэруптивная аркада именно этого события показаны на рис. 4.1. Суммарный магнитный поток в этом случае был  $\Phi \approx 110 \times 10^{20}$  Мкс. Такому магнитному потоку соответствуют оцениваемая амплитуда ФП  $A_F \approx 3\%$  и максимальная ожидаемая интенсивность ГМБ  $Dst \approx -110$  нТл.

Реально наблюдавшаяся величина ФП оказалась достаточно близкой к прогнозируемому значению  $A_F \approx 2.6\%$ , но измеренная интенсивность ГМБ  $Dst \approx -73$  нТл была заметно слабее оценочной. Такое сочетание значений ФП и ГМБ возможно, когда отрицательная часть  $B_z$  компоненты магнитного поля ICME составляет лишь часть от полной напряженности магнитного поля выброса. То, что это имело место в данном случае, подтверждается результатами прямых

измерений, приведенных в каталоге *OMNI*<sup>1</sup>: во время пика в *Dst* южная компонента была равна половине от полного магнитного поля (см рис. 4.12).

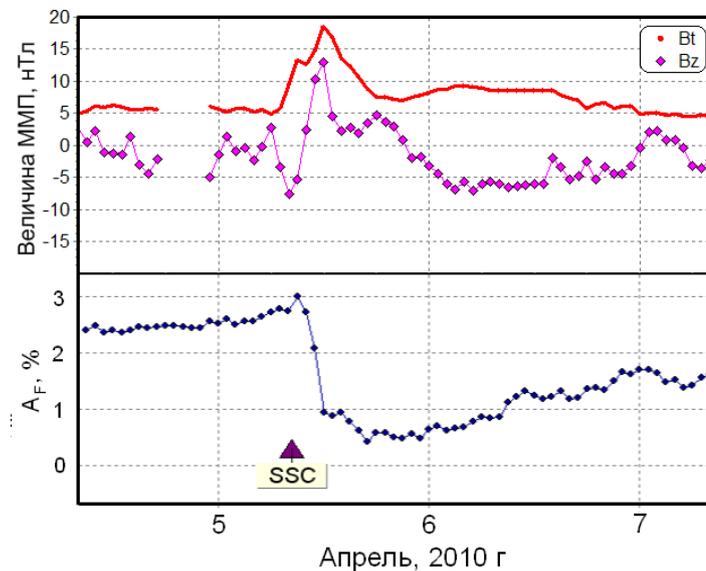


Рис. 4.12 Вариации полного магнитного поля и  $B_z$  компоненты (верхняя панель) и вариации плотности КЛ (нижняя панель) в апрельском событии 2010 г.

Что касается транзитных времен, то транзитное время начала возмущений у Земли равнялось  $\Delta T_O \approx 47$  часов и было меньше, чем ожидаемое ( $\Delta T_O \approx 66$  часов), а наблюдаемое время пика ГМБ ( $\Delta T_P \approx 77$  часов) было близко к ожидаемому ( $\Delta T_P \approx 82$  часа). Примерно такое же соотношение ожидаемых и наблюдаемых величин  $A_F$ ,  $Dst$ ,  $\Delta T_O$  и  $\Delta T_P$  получилось при диагностике других эрупций из центрального сектора солнечного диска в 2010 году.

Описанный предварительный инструмент, основанный на выделении диммингов и постэруптивной аркады и расчете их магнитного потока, обеспечивает самую раннюю диагностику геоэффективности солнечных эрупций и прогноз интенсивности, времени начала и пика предстоящих ГМБ и ФП. Разумеется, этот способ ранней диагностики должен использоваться в будущем как начальный этап и составная часть всего комплекса имеющихся различных методов прогнозирования и моделирования космической погоды. Мы рассматриваем предложенный метод количественной диагностики

<sup>1</sup> URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>

геоэффективности солнечных эрупций как предварительный, поскольку предстоит еще многое сделать для его развития. Прежде всего, зависимость интенсивности ГМБ от эруптивного магнитного потока следует дополнить методами учета факторов, определяющих  $B_z$  компоненту в ICMEs, взаимодействующих с магнитосферой Земли. Во-вторых, для практического применения этого метода в настоящей ситуации с регулярными солнечными наблюдениями необходимо разработать процедуры перехода от КУФ изображений телескопа *EIT* и магнитограмм *MDI*, получавшихся в течение 23-го цикла на космической обсерватории *SOHO*, к соответствующим изображениям телескопа *AIA* и магнитограммам *MDI*, получаемым в настоящее время на борту обсерватории *SDO* (см. [127]).

#### 4.6. Основные результаты и выводы главы 4

По данным 23-го цикла солнечной активности установлены зависимости между количественными параметрами солнечных эрупций, с одной стороны, и характеристиками соответствующих нерекуррентных возмущений, проявляющихся в виде интенсивных ГМБ ( $c Dst < -100$  нТл) и ФП – с другой. В качестве исходного параметра впервые использовался суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных аркад продольного поля ( $\Phi$ ) на уровне фотосферы. Приведенные выше результаты показывают, что параметры межпланетных возмущений, вызванные CMEs/ICMEs, в значительной степени определяются энергетикой и пространственными размерами солнечных эрупций, несмотря на множество других факторов, влияющих на распространение корональных выбросов от Солнца до Земли. Это особенно справедливо для мощных (в терминах магнитного потока) эрупций.

- Оказалось, что при увеличении эруптивного магнитного потока до  $900 \times 10^{20}$  Мкс, амплитуда ФП увеличивается линейно до 25%.
- Получена статистически значимая связь между величиной *Dst* индекса и эруптивным магнитным потоком. Самые сильные солнечные эрупции,

характеризующиеся большими магнитными потоками ( $\Phi > 300 \times 10^{20}$  Мкс), вызывают интенсивные ГМБ с  $Dst \approx -400$  нТл.

- Магнитный поток диммингов и аркад показывает также отчетливую обратную корреляцию с временными параметрами ФП и ГМБ, в частности, с транзитными временами их начала  $\Delta T_O$  и максимума  $\Delta T_P$ . При увеличении эруптивного параметра  $\Phi$  транзитные времена уменьшаются с 3÷5 до 1 суток. Выражения (4.4.1) и (4.4.2) показывают, что в первом приближении скорость CMEs/ICMEs линейно возрастает с увеличением суммарного магнитного потока в их источнике на Солнце. С другой стороны мы установили, что величины ФП и ГМБ зависят от эруптивного магнитного потока (см. выражение (4.2.1) и (4.3.1) соответственно). Комбинация этих результатов позволяет понять известную зависимость магнитного поля в ICME на орбите Земли от скорости CMEs вблизи Солнца [200], а также, зависимость амплитуды ФП от скорости ICMEs [53,160].
- Большинство рассмотренных событий были связаны с солнечными эрупциями в АО. Немногие события, произошедшие в результате эрупции волокон вне АО, как правило, характеризовались незначительными магнитными потоками, большими транзитными временами и относительно слабыми ГМБ и ФП. Тем не менее, некоторые из таких волоконных событий приводили к интенсивным ГМБ и ФП по сравнению с эрупциями в АО при том же магнитном потоке. Наиболее вероятная причина указанной особенности состоит в том, что критерий выделения площадок диммингов и аркад, примененный для эрупций в АО, не полностью подходит для эрупций вне АО, поскольку последние сопровождаются более слабыми диммингами и аркадами по сравнению с эрупциями в АО.

Из комбинации полученных нами аналитических выражений, описывающих зависимости интенсивности ФП (4.2.1), ГМБ (4.3.1) и

транзитного времени начала возмущения (4.4.1) от эруптивного магнитного потока, следует, что слабые ФП и ГМБ характеризуются, в основном, большими значениями транзитного времени и, наоборот, для коротких значений транзитного времени типичны самые интенсивные ФП и ГМБ. Эта закономерность следует как из прямых измерений, которые показывают наличие высоких скоростей плазмы во время сильных ФП и ГМБ, так и из нашего анализа, который показывает, что величина ФП/ГМБ и скорость ICMEs в значительной степени определяются мощностью солнечной эрупции, выраженной в магнитном потоке диммингов и аркад. Следует отметить, что тенденция обратной корреляции между величиной ГМБ и транзитным временем ICME подтверждается данными наибольших исторических ГМБ (см., [74]). В частности, в знаменитом событии Кэррингтона, произошедшем в 1859 г., наблюдалась самая мощная ГМБ ( $Dst \approx 850$  нТл) [177], причем начало возмущения на Земле зафиксировалось спустя 17 часов после вспышки на Солнце.

Зависимости основных характеристик нерекуррентных возмущений межпланетной среды от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад, представленные в аналитической форме эмпирическими выражениями (4.2.1), (4.3.1), (4.4.1) и (4.4.2), формируют некий предварительный инструмент для ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций и прогнозирования основных параметров космической погоды. Важно отметить, что уже в момент, близкий ко времени солнечной вспышки, используя изображения в КУФ диапазоне и магнитограммы Солнца, можно оценить магнитный поток диммингов и аркад, а затем оценивать ожидаемую интенсивность ГМБ, амплитуду ФП, а также величины транзитных времен. Следует помнить при этом, что зависимости, приведенные выше, получены для достаточно больших эрупций, которые создавали сильные геомагнитные бури с  $Dst < -100$  нТл, и во всех рассмотренных событиях присутствовала южная  $B_z$  компонента. Последнее означает, что для ГМБ в настоящее время можно получать оценку

интенсивности, близкую к максимальной для данного эруптивного магнитного потока, т.е. интенсивность, которую можно ожидать в случае, если  $B_z$  компонента будет отрицательной.

## **Заключение**

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

- I. Усовершенствована и обновлена базы данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде (добавлены новые события, проверена и уточнена информация по ранним событиям, добавлены новые параметры, характеризующие солнечные и межпланетные возмущения).
- II. Выполнен статистический сравнительный анализ Форбуш-эффектов с внезапным (совпадающим с внезапным началом геомагнитной бури – *SSC*) и постепенным (без *SSC*) началами. Получены количественные зависимости, характеризующие связь величины Форбуш-эффекта с параметрами межпланетных и геомагнитных возмущений, и показано, что они существенно различаются для выделенных групп событий. Основной причиной этих различий является то, что события с внезапным началом в большей мере обусловлены корональными выбросами (*CMEs/ICMEs*), в то время как значительная часть событий другой группы – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.
- III. Выявлена количественная зависимость величины Форбуш-понижения от гелиодолготы соответствующего источника. На основе событий 1976-2010 гг. показано, что центральные источники создают существенно большие понижения по сравнению с прилимбовыми, а восточные источники, в целом, эффективнее западных.
- IV. Выявлен дефицит очень больших Форбуш-эффектов на фоне исключительно высокой солнечной и геомагнитной активности в 19-м цикле солнечной активности. Возможная причина такого дефицита в том, что размеры самых мощных корональных выбросов в 19-м цикле были

меньше, чем размеры CMEs/ICMEs в более поздних циклах.

- V. По данным 23-го цикла солнечной активности установлены зависимости интенсивности нерекуррентных Форбуш-понижений и геомагнитных бурь, а также транзитных времен начала и пика этих возмущений от магнитного потока ультрафиолетовых диммингов и аркад в соответствующих источниках на Солнце.
- VI. Предложены основы методики ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций, позволяющей по измеряемому эруптивному магнитному потоку ультрафиолетовых диммингов и аркад, вызываемых CMEs, с заблаговременностью от 1 до 4 суток оценивать возможную интенсивность и временные параметры соответствующих Форбуш-понижений и геомагнитных бурь.

## Литература

1. Абунин А.А. Связь величины Форбуш-эффекта с внутренними и внешними параметрами // Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики. Труды 10-й БМШ ЭТФ. – 2010. – Т. 2. – С. 74–81.
2. Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и Аэронавигация. – 2012. – Т. 52. – №3. – С. 313–320.
3. Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты 19-го цикла солнечной активности // Изв. РАН, Сер. физ. – 2013. – Т. 77. – №5. – С. 599–601.
4. 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 Аэронавигация. – 2013. – Т. 53. – №1. – С. 13–22.
5. Алексаньян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др. Экспериментальные исследования геомагнитных эффектов в космических лучах и спектр эффекта возрастания перед магнитными бурями // Изв. РАН, Сер. физ. – 1982. – Т. 46. – №9. – С. 1689.
6. Белов А.В. Модели модуляции космических лучей неоднородным солнечным ветром и исследование возмущений межпланетной среды по данным мировой сети нейтронных мониторов: диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук: 01.03.02 / Белов Анатолий Владимирович. – Москва, ИЗМИРАН. – 1980. – 181 с.
7. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Транзиентные эффекты в космических лучах в 1990-1995 гг. // Изв. РАН, Сер. физ. – 1999. – Т. 63. – №8. – С.1634–1638.
8. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Струминский А.Б., Янке В.Г. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН, Сер. физ. – 2001. – Т. 65. – №3. – С. 373–376.

9. 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.
10. Дорман Л.И. Вариации космических лучей. – М.: Гостехтеориздат. – 1957. – 492 с.
11. Дорман Л.И. Вариации космических лучей и исследование космоса. – М.: Издательство АН, СССР. – 1963. – 1027 с.
12. Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей, I // Изв. АН СССР, Сер. физ. – 1971. – Т. 35. – №12. – С. 2556–2570.
13. Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей, II // Изв. АН СССР, Сер. физ. – 1971. – Т. 35. – №12. – С. 2571–2582.
14. Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. – М.: Наука. – 1971. – 399 с.
15. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. – М.: Наука. – 1972. – 211 с.
16. Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36. – №2. – С. 19–27.
17. 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. – 1966. – 105 с.
18. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1966. – Т. 6. – №8. – С. 991–996.
19. 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.

20. 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.

21. Лузов А.А., Матюхин Ю.Г., Сдобнов В.Е. Расчет энергетической зависимости нейтронного монитора NM64 // В сб. “Исследования по геомагнетизму, и аэрономии и физике Солнца”, М. Наука. – 1971. – №20. – С. 356.

22. Луковникова А.А. Мониторинг околоземного космического пространства по наблюдениям космических лучей: диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук: 01.03.03 / Луковникова Анна Александровна. – Иркутск. – 2012. – 139 с.

23. Пахомов Н.И., Сдобнов В.Е. Расчет характеристик нейтронного супермонитора // В сб. “Исследования по геомагнетизму, и аэрономии и физике Солнца”, М. Наука. – 1977. – №42. – С. 185.

24. Сергеев А.В. Спектрографический метод анализа вариаций космических лучей магнитосферного и межпланетного происхождения // Диссертация, Москва, НИИ ЯФ МГУ. – 1974. – 189 с.

25. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир. – 1980. – 280 с.

26. Черток И.М., Гречнев В.В. Корональные выбросы массы в аспекте космической погоды. II. Ультрафиолетовые димминги и геомагнитные бури // Изв. РАН, Сер. физ. – 2006. – Т. 70. – №10. – С. 1498–1500.

27. Черток И.М., А.В. Белов, В.В. Гречнев. Зависимость величины Форбуш-понижений от параметров солнечных эрупций // Изв. РАН, Сер. Физ. – 2011. – Т. 75. – №6. – С. 845–847.

28. Черток И.М., Абуниин А.А., Белов А.В., Гречнев В.В. Зависимость характеристик Форбуш-эффектов от параметров солнечных эрупций // Изв. РАН, Сер. физ. – 2013. – Т. 77. – №5. – С. 615–617.

29. Чирков Н.П., Алтухов А.М., Крымский Г.Ф. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. III. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1967. – Т. 7. – №4. – С. 621–631.
30. Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush-effects with sudden and gradual storm commencement // Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf. – 2011. – V. 10. – P. 278-281.
31. Abunin A.A., Pletnikov E.V., Shchepetov A.L., Yanke V.G. Efficiency of detection for neutron detectors with different geometries // Bull. Rus. Acad. Sci., Phys. – 2011. – V. 75. – P. 866–868.
32. Alania M.V., Szabelski J., Wawrzynczak A. Modeling and experimental study of the Forbush effects of galactic cosmic rays // Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf., Tsukuba. – 2003. – P. 3585.
33. Altuchov A.M., Krimsky G.F., Kuzmin A.I. The method of “Global survey” for investigation cosmic ray modulation // Proc. 11th Int. Cosmic Ray Conf., Budapest. – 1969. – V. 4. – P. 457–460.
34. Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.A., Klepach E.G., Oleneva V.A., Yanke V.G. Interactive data base of cosmic ray anisotropy (DB-A10) // Adv. Space Res. – 2008. – V. 43. – P. 708–716.
35. Badruddin, Yadav R.S., Yadav N.R. Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation // Solar Phys. – 1986. – V. 105. – P. 413–428.
36. Badruddin. Cosmic ray modulation: effects of high speed solar wind streams // Astrophys. Space Sci. – 1996. – V. 246. – P. 171–191.
37. Barnden L.R. Forbush decreases 1966-1972; their solar and interplanetary associations and their anisotropies // Proc. 13th Int. Cosmic Ray Conf., Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1271–1276.
38. Barnden L.R. The large-scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases // Proc. 13th Int. Cosmic Ray Conf., Denver. – 1973. – V. 2. – P. 1277–1282.
39. Barouch E., Burlaga L.F. Causes of Forbush decreases and other cosmic ray

variations // *J. Geophys. Res.* – 1975. – V. 80. – P. 449–456.

40. 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 Int. Cosmic Ray Conf., Denver.* – 1973. – V. 2. – P. 1247–1255.

41. 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 // *Akademiia Nauk SSSR, Izvestiia, Seria Fizicheskaiia.* – 1974. – V. 38. – P. 1867–1875.

42. Belov A.V., Eroshenko E.A. The reception coefficients of neutron monitors // *Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris.* – 1981. – V. 4. – P. 97–100.

43. 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.

44. Belov A.V., Ivanov K.G. Forbush-effects in 1977-1979 // *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban.* – 1997. – V. 1. – P. 421–424.

45. Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Modulation Effects in 1991-1992 Years // *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban.* – 1997. – V. 1. – P. 437–440.

46. Belov A.V., Eroshenko E.A., Ivanov K.G., Yanke V.G. Causes and precursors of Forbush decreases // *Bull. Russ. Acad. Sci., Phys.* – 1997. – V. 61. – N. 6. – P. 861–863.

47. Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Cosmic ray effects caused by great disturbances of the interplanetary medium in 1990-1996 // *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City.* – 1999. – V. 6. – P. 431–434.

48. Belov A.V. Large-scale modulation: View from the Earth // *Space Sci. Revs.* – 2000. – V. 93. – P. 71–96.

49. 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.

50. Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Yanke V., Mavromichalaki H., Plainaki C., Mariatos G., Pchelkin V. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110. – A09S20. DOI: 10.1029/2005JA011067.
51. Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Mavromichalaki E. Proton event of February 23, 1956 according to neutron monitor data // *Bull. Russ. Acad. Sci., Phys.* – 2006. – V. 69. – N. 6. – P. 901–904.
52. Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Connection of Forbush effects to the X-ray flares // *J. Atmosph. Sol.-Ter. Phys.* – 2008. – V. 70. – P. 342–350.
53. Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // *Proc. IAU Symp.* – 2009. – V. 257. – P. 439–450.
54. Bieber J., Chen J. Cosmic ray diurnal anisotropy, 1936-1988: implications for drift and modulation theories // *Astrophys. J.* – 1991. – V. 372. – P. 301–313.
55. Bieber J., Evenson P. Spaceship Earth – an optimized network of neutron monitor // *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome.* – 1995. – V. 4. – P. 1316–1319.
56. Bothmer V., Zhukov A. The Sun as the prime source of space weather. // *Space Weather – Physics and Effects.* Ed. by V. Bothmer and I.A. Daglis. Springer. – 2007. – P. 31–102.
57. Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J. et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // *Solar Phys.* – 1995. – V. 162. – P. 357–402.
58. Burlaga L.F., Klein L., Sheeley N.R.Jr. et al. A magnetic cloud and a coronal mass ejection // *Geophys. Res. Lett.* – 1982. – V. 9. – P. 1317–1320.
59. Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T. Merged interaction regions at 1 AU // *J. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108. – Issue A12. DOI: 10.1029/2003JA010088.
60. Calogovic J., Vršnak B., Temmer M., Veronig A.M. Cosmic ray modulation by corotating interaction regions // *IAU Symp.* – 2009. – V. 257. – P. 425–427.
61. Cane H.V., Richardson I.G., von Roseninge, 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.

62. Cane H.V. Cosmic ray decreases and magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – N. A3. – P. 3509–3512.

63. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Wibberenz G. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study // *J. Geophys. Res.* – 1994. – V. 99. – N. A11. – P. 21429–21441.

64. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge, T.T. Cosmic ray decreases: 1964-1994 // *J. Geophys. Res.* – 1996. – V. 101. – P. 21561–21572.

65. Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // *Space Sci. Rev.* – 2000. – V. 93. – P. 55–77.

66. Cane H.V., Richardson I.G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002 // *J. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108. – CiteID 1156, DOI: 10.1029/2002JA009817.

67. Carmichael H., Shea M.A., Smart D.F., McCall J.R. Geographically smoothed geomagnetic cutoffs // *Canadian J. Phys.* – 1969. – V. 47. – P. 2067–2072.

68. Chertok I.M., Grechnev V.V. Large-scale activity in the Bastille day 2000 solar event // *Solar Phys.* – 2005. – V. 229. – P. 95–114.

69. Chertok I.M., Grechnev V.V., Uralov A.M. Large-scale phenomena on the Sun associated with the eruption of filaments outside active regions: the event of September 12, 1999 // *Astron. Rep.* – 2009. – V. 53. – P. 355–368.

70. Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // *Solar Phys.* – 2013. – V. 282. – P. 175–199.

71. Chilingarian A., Bostanjyan, N. On the relation of the Forbush decreases detected by ASEC monitors during the 23rd solar activity cycle with ICME parameters // *Adv. Space Res.* – 2010. – V. 45. – P. 614–621.

72. Clem J.M., Dorman L.I. Neutron Monitor Response Functions // *Space Sci.*

Rev. – 2000. – V. 93. – P. 335–359.

73. Cliver E.W., Cane H.V. The angular extents of solar/ interplanetary disturbances and modulation of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* – 1996. – V. 101. – P. 15533–15546.

74. Cliver E.W., Svalgaard L. The 1859 solar-terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity // *Solar Phys.* – 2004. – V. 224. – P. 407–422.

75. Crooker N.U., Cliver E. W. Postmodern view of M-regions // *J. Geophys. Res.* – 1994. – V. 99. – P. 23383–23388.

76. Delaboudiniere J.-P., Artzner G.E., Brunaud J. et al. EIT: extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission // *Solar Phys.* – 1995. – V. 162. – P. 291–312.

77. Demoulin P. A review of the quantitative links between CMEs and magnetic clouds // *Ann. Geophys.* – 2008. – V. 26. – P. 3113–3125.

78. Dorman L.I. Cosmic ray variation and space research. Moscow: AN USSR. – 1963. – 1027 p.

79. Dorman L.I., Fedchenko S.G., Granitsky L.V., Rische G.A. Coupling and barometer coefficients for measurements of cosmic ray variations at altitudes of 260-400 mb // *Proc. 11-th Int. Cosmic Ray Conf., Budapest.* – 1970. – V. 29. – P. 233–236.

80. Dorman L.I. Cosmic rays: variations and space explorations. Amsterdam: North-Holland. – 1974. – 675 p.

81. Dorman L.I. Cosmic rays in magnetospheres of the Earth and other planets. Springer Science+Business Media B.V. – 2009. – 800 p.

82. Dorman L.I. Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground. Springer. – 2010. – 862 p.

83. Duldig M. Muon Observations // *Space Sci. Rev.* – 2000. – V. 93. – P. 207–226.

84. Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Karlica M. Cosmic ray modulation

by solar wind disturbances // *Astronomy & Astrophysics*. – 2011. – V. 531. – A91, DOI: 10.1051/0004-6361/201016006.

85. Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances // *Astronomy & Astrophysics*. – 2012. – V. 538. – A28, DOI: 10.1051/0004-6361/201117710.

86. Esser R., Habbal S.R. Coronal holes and the solar wind in cosmic winds and the heliosphere // Ed. J.R. Jokipii, C.P. Sonett, M.S. Giampapa. U. Tucson, AZ.: Arizona Press. – 1997. – P. 297.

87. Fan C.Y., Meyer P., Simpson J.A. Cosmic radiation intensity decreases observed at the earth and in the nearby planetary medium // *Space Phys. Rev. Lett.* – 1960. – V. 4. – P. 421–423.

88. Fan C.Y., Meyer P., Simpson J.A. Rapid reduction of cosmic ray intensity measured in Interplanetary // *Space Phys. Rev. Lett.* – 1960. – V. 5. – P. 269–271.

89. Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* – 1937. – V. 51. – P. 1108–1109.

90. Fushishita A., Kuwabara T., Kato C. et al. Precursors of the Forbush decrease on 2006 December 14 observed with the Global Muon Detector Network (GMDN) // *Astrophys. J.* – 2010. – V. 715. – P. 1239–1247.

91. Gonzalez W.D., Tsuritani B.T., McIntosh P.S., A.L. Clua de Gonzalez. Coronal hole-active region-current sheet (CHARCS) association with intense interplanetary and geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* – 1996. – V. 23. – N. 19. – P. 2577–2581.

92. Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – P. 29207–29218.

93. Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., Nunes S., Howard R.A. Coronal mass ejection activity during solar cycle 23 // *Int. Solar Cycle Studies (ISCS) Symp., Tatranska Lomnica*. – 2003. – P. 403–414.

94. Gopalswamy N., Yashiro S., Krucker S., Stenborg G., Howard R.A.

Intensity variation of large solar energetic particle events associated with coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* – 2004. – V. 109. – Issue A12, DOI: 10.1029/2004JA010602.

95. Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S. Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // *JGR Space Physics.* – 2007. – V. 112. – A06112, DOI: 10.1029/2006JA012149.

96. Gopalswamy N., Xie H. Comment on “Prediction of the 1-AU arrival times of CME-associated interplanetary shocks: Evaluation of an empirical interplanetary shock propagation model” by K.-H. Kim et al. // *J. Geophys. Res.* – 2008. – V. 113. – A10105, DOI: 10.1029/2008JA013030.

97. Gopalswamy N. Coronal mass ejections and space weather // *Climate and Weather of the Sun-Earth system (CAWSES): selected papers from the 2007 Kyoto Symposium.* Ed. by T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M.A. Geller. TERRAPUB, Tokyo. – 2009. – P. 77–120.

98. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Stenborg G., Vourlidis A., Freeland S., Howard R. The SOHO/LASCO CME catalog // *Earth, Moon and Planets.* – 2009. – V. 104. – P. 295–313.

99. Gopalswamy N. Corona mass ejections: a summary of recent results // *Proc. 20th National Solar Physics Meeting, Slovakia.* – 2010. – P. 108–130.

100. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Makela P., Vourlidis A., Howard R. A catalog of halo coronal mass ejections from SOHO // *Sun and Geosphere.* – 2010. – V. 5. – P. 7–16.

101. Gosling J.T. The solar flare myth // *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – P. 18937–18950.

102. Harra L.K., Mandrini C.H., Dasso S., Gulisano A.M., Steed K., Imada S. Determining the solar source of a magnetic cloud using a velocity difference technique // *Solar Phys.* – 2011. – V. 268. – P. 213–230.

103. Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor // *Can. J. Phys.* – 1964. – V. 42. – P. 2443–2472.

104. Haurwitz M.W., Yoshida S., Akasofu S.I. Interplanetary magnetic field asymmetries and their effects on polar cap absorption events and Forbush decreases // *J. Geophys. Res.* – 1965. – V. 70. – P. 2977–2988.

105. Hess V.F., Demmelair A. World-wide effects in cosmic ray intensity, as observed during a recent magnetic storm // *Nature.* – 1937. – V. 140. – P. 316–317.

106. Hess W.N., Patterson H.W., Wallace R. Cosmic ray neutron energy spectrum // *Phys. Rev.* – 1959. – V. 116. – P. 445–457.

107. Hudson H.S., Cliver E.W. Observing coronal mass ejections without coronagraphs // *J. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – P. 25199–25214.

108. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // *Nuovo Cimento C.* – 1979. – V. 2C. – P. 1–52.

109. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G. High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation // *Nuovo Cimento C.* – 1979. – V. 2C. – P. 421–438.

110. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G. Interplanetary disturbances during Forbush decreases // *Nuovo cimento C.* – 1984. – V. 7. – P. 467–488.

111. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G., Pinter S. Longitudinal dependence of the interplanetary perturbation produced by energetic type 4 solar flares and of the associated cosmic ray modulation // *Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf., La Jolla.* – 1985. – V. 5. – P. 234–237.

112. Iucci N., Pinter S., Parisi M., Storini M., Villaresi G. The longitudinal Asymmetry of the interplanetary perturbation producing Forbush decreases // *Nuovo Cimento C.* – 1986. – V. 9C. – P. 39–50.

113. Jamsen T., Usoskin I.G., Raiha T., Sarkamo J., Kovaltsov G.A. Case study of Forbush decreases: energy dependence of the recovery // *Adv. Space Res.* – 2007. – V. 40. – P. 342–347.

114. 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, DOI:

10.1029/2011JA016791.

115. Kahler S. The morphological and statistical properties of solar X-ray events with long decay times // *Astrophys. J.* – 1977. – V. 214. – P. 891–897.

116. Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., St. Cyr O.C., Guhathakurta M., Christian E. The STEREO mission: an introduction // *Space Sci. Rev.* – 2008. – V. 136. – P. 5–16.

117. Kang S.-M., Moon Y.-J., Cho K.-S., Kim Y.-H., Park Y.D., Baek J.-H., Chang, H.-Y. // *J. Geophys. Res.* – 2006. – V. 111. – DOI: 10.1029/2005JA011445.

118. Kim K.-H., Moon Y.-J., Cho K.-S. Prediction of the 1-AU arrival times of CME-associated interplanetary shocks: Evaluation of an empirical interplanetary shock propagation model // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – A05104, DOI: 10.1029/2006JA011904.

119. Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J., Dryer M., Lee J., Yi Y., Kim K.-H., Wang H., Park Y.-D., Kim Y.H. An empirical model for prediction of geomagnetic storms using initially observed CME parameters at the Sun // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115. – A12108, DOI: 10.1029/2010JA015322.

120. Kitamura M. On the close correlation between the cosmic ray storm and the «SC-type» magnetic storm // *Reports Ionos. Res. Japan.* – 1954. – V. 8. – P. 145–148.

121. Kota J., Jokipii J.R. The role of corotating interaction regions in cosmic-ray modulation // *Geophys. Res. Lett.* – 1991. – V. 18. – P. 1797–1800.

122. Krivosheeva M.A., Abunin A.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G., Osipenko A.S. Relation of the Forbush-effect parameters to the heliolongitude of the solar sources // *Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf., Beijing.* – 2011. – V. 10. – P. 274-277.

123. Krymsky G.F. Diffusion mechanism of cosmic-ray daily variation // *Proc. 9th Int. Cosmic Ray Conf., London.* – 1966. – V. 1. – P. 197.

124. Kunow H., Crooker N.U., Linker J.A., Schwenn R., Von Steiger R. Foreword // *Space Sci. Rev.* – 2006. – V. 123. – P. 1–2.

125. 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.

126. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* – 2012. – V. 275. – P. 17–40.

127. Liu Y., Davies J.A., Luhmann J.G., Vourlidas A., Bale S.D., Lin R.P. Geometric triangulation of imaging observations to track coronal mass ejections continuously out to 1 AU // *Astrophys. J. Lett.* – 2010. – V. 710. – P. L82–L87.

128. Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.* – 1971. – V. 12. – P. 658–715.

129. Lockwood J.A., Webber W.R., Jokipii J.R. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation. I – Observations at Earth at different energies // *J. Geophys. Res.* – 1986. – V. 91. – P. 2851–2857.

130. Lockwood J.A. List of Forbush decreases 1954-1990 with supplemental information // *Solar Geophys. Data.* – 1990. – N. 549. – P. 154–163.

131. 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. – P. 11587–11604.

132. Lugaz N., Hernandez-Charpak J.N., Roussev I.I., Davis C.J., Vourlidas A., Davies J.A. Determining the azimuthal properties of coronal mass ejections from multi-spacecraft remote-sensing observations with STEREO SECCHI // *Astrophys. J.* – 2010. – V. 715. – P. 493–499.

133. Mandrini C.H., Nakwacki M.S., Attrill G., van Driel-Gesztelyi L., Dasso S., Duemoulin P. The link between CME-associated dimmings and interplanetary magnetic clouds // *Proc. IAU Symp.* – 2009. – V. 257. – P. 265–270.

134. Marubashi K., Cho K.-S., Kim Y.-H., Park Y.-D., Park S.-H. Geometry of the 20 November 2003 magnetic cloud // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A01101, DOI: 10.1029/2011JA016802.

135. Mayaud P.N., Romana A. Supplementary geomagnetic data, 1957-1975. IAGA Bulletin. N. 39. Paris: IUGG Pub. Office. – 1977. – P. 147.
136. McComas D.J., Goldstein R., Gosling J.T., Skoug R.M. Ulysses' second orbit: Remarkably different solar wind // *Space Sci. Rev.*, 2001. V. 97. P. 99–103.
137. McCracken K.G., Rao V.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field // Technical report, Massachusetts Institute of Technology. – 1962. – N. 77. – P. 77.
138. McCracken K.G., Rao V.R., Fowler B.C., Shea M.A., Smart D.F. Cosmic ray tables (asymptotic directions, variational coefficients and cut-off rigidities // *IQSY instruction manual*. – 1965. – N. 10. – P. 183.
139. Michalek G., Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. Properties and geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // *Space Weather*. – 2006. – V. 4. – S10003, DOI: 10.1029/2005SW000218.
140. Michalek G., Gopalswamy N., Yashiro S. Space weather application using projected velocity asymmetry of halo CMEs // *Solar Phys.* – 2008. – V. 248. – P. 113–123.
141. Miroshnichenko L.I. Solar cosmic rays // Kluwer Academic publishers. – 2001. – P. 492.
142. Moraal H., Belov A., Clem J. Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor network // *Space Sci. Rev.* – 2000. – V. 93. – P. 285–303.
143. Munakata K., Bieber J., Yasue S. et al. Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – P. 27457–27468.
144. Nagashima K. Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space // *Rep. Ionosphere Space Res.* – 1971. – V. 25. – P. 189–211.
145. Nagashima K., Sakakibara S., Murakami K., Morishita I. Response and yield functions of neutron monitor, Galactic cosmic-ray spectrum and its solar modulation, derived from all the available world-wide surveys // *Nuovo Cimento C.* –

1989. – V. 12. – N. 2. – P. 173–209.

146. 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.

147. Papaioannou A., Malandraki O.E., Mavromichalaki H., Belov A., Skoug R., Eroshenko E., Abunin A. Study of the January 2005 Forbush decreases // *EGU General Assembly.* – 2010. – P. 1242.

148. Papaioannou A., Malandraki O., Belov A., Skoug R., Mavromichalaki H., Eroshenko E., Abunin A., Lepri S. On the analysis of the complex Forbush decreases of January 2005 // *Solar Phys.* – 2010. – V. 266. – P. 181–193.

149. Paquet E., Laval M., Basalaev L.M., Belov A., Eroshenko E., Kartyshev V., Struminsky A., Yanke V. An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent // *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf., Merida.* – 2008. – V. 1. – P. 761–764.

150. Parker E.N. *Interplanetary dynamical processes* // New York: Interscience Publishers. – 1963. – 272 p.

151. Penna R.F., Quillen, A.C. Decay of interplanetary coronal mass ejections and Forbush decrease recovery times // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110. – A09S05, DOI: 10.1029/2004JA010912.

152. Pomerantz M.A., Duggal S.P. North-south anisotropies in the cosmic radiation // *J. Geophys. Res.* – 1972. – V. 77. – P. 263–265.

153. Reames D.V., Kahler S.W., Tylka A.J. Anomalous cosmic rays as probes of magnetic clouds // *Astrophys. J. Lett.* – 2009. – V. 700. – P. L196–L199.

154. Richardson I.G., Cane H.V. Signatures of shock drivers in the solar wind and their dependence on the solar source location // *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – P. 15295–15304.

155. Richardson I.G., Wibberenz G., Cane H.V. The relationship between recurring cosmic ray depressions and corotating solar wind streams at  $\leq 1$  AU: IMP 8 and Helios 1 and 2 anticoincidence guard rate observations // *J. Geophys. Res.* –

1996. – V. 101. – P. 13483–13496.

156. Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower ( $\sim 1$  MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – P. 12579–12592.

157. Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Sci. Rev.* – 2004. – V. 111. – P. 267–376.

158. Richardson I.G., Cane H.V. A survey of interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2005 // *Proc. Solar Wind 11/SOHO 16, Canada.* – 2005. – SP-592. – P. 755.

159. 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.

160. 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.

161. Richardson I.G., Cane H.V. Geoeffectiveness (Dst and Kp) of interplanetary coronal mass ejections during 1995–2009 and implications for storm forecasting // *Space Weather.* – 2011. – V. 9. – DOI: 10.1029/2011SW000670.

162. Roldugin V.K., Beloglazov M.I. Schumann resonance amplitude during the Forbush effect // *Geomag. Aeronomy.* – 2008. – V. 48. – P. 768–774.

163. Russell C.T. Geophysical coordinate transformations // *Cosmic Electrodyn.* – 1971. – V. 2. – P. 184–196.

164. 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.

165. Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Schou J., Rosenberg W., Springer L., Tarbell T.D., Title A., Wolfson C.J., Zayer I.

The solar oscillations investigation - Michelson Doppler Imager // *Solar Phys.* – 1995. – V. 162. – P. 129–188.

166. Schmieder B., Démoulin P., Pariat E. et al. Actors of the main activity in large complex centres during the 23 solar cycle maximum // *Adv. Space Res.* – 2011. – V. 47. – P. 2081–2091.

167. Shea M.A., Smart D.F., McCall J.R. A five degree by fifteen degree world grid of trajectory-determined vertical cutoff rigidities // *Can. J. Phys.* – 1968. – V. 46. – P. 1098–1101.

168. Shea M.A., Smart D.F., Humble J.E., Flückiger E.O., Gentile L.C., Nichol M.R. A revised standard format for cosmic ray ground-level event data // *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., Moscow.* – 1987. – V. 3. – P. 171–174.

169. Shea M.A., Smart D.F. Solar proton event patterns: the rising portion of five solar cycles // *Adv. Space Res.* – 2002. – V. 29. – N. 3. – P. 325–330.

170. Shibata S., Munakata Y., Tatsuoka R. et al. Calibration of neutron monitor using accelerator neutron beam // *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City.* – 1999. – V. 7. – P. 313–316.

171. 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.

172. Simpson J.A. Cosmic-radiation intensity-time variations and their origin. III. The origin of 27-day variations // *Phys. Rev.* – 1954. – V. 94. – P. 426–440.

173. Simpson J.A. Cosmic-radiation neutron intensity monitor // *Annals of the IGY.* – 1957. – V. 4. – P. 351–373.

174. Simpson J.A. Cosmic radiation neutron intensity monitor // *Annals of the Int. Geophys. Yr. IV. Parts I-III, Pergamon Press, London.* – 1958. – P. 351.

175. Singh Y.P., Badruddin. Corotating high-speed solar-wind streams and recurrent cosmic ray modulation // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – A05101, DOI: 10.1029/2006JA011779.

176. Sinno K. Mechanism of cosmic ray storms inferred from some statistical

results // *J. Phys. Soc. Japan.* – 1962. – V. 17. – P. 395–399.

177. Siscoe G., Schwenn R. CME disturbance forecasting // *Space Sci. Rev.* – 2006. – V. 123. – P. 453–470.

178. Smart D.F., Shea M.A. Probable pitch angle distribution and spectra of the 23 February 1956 solar cosmic ray event // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide.* – 1990. – V. 5. – P. 257–260.

179. Smith Z.K., Steenburgh R., Fry C.D., Dryer M. Predictions of interplanetary shock arrivals at Earth: Dependence of forecast outcome on the input parameters // *Space Weather.* – 2009. – V. 7. – DOI: 10.1029/2009SW000500.

180. Song H., Yurchyshyn V., Yang G., Tan C., Chen W., Wang H. The automatic predictability of super geomagnetic storms from halo CMEs associated with large solar flares // *Solar Phys.* – 2006. – V. 238. – P. 141–165.

181. Sterling A.C., Hudson H.S. YOHKOH SXT observations of X-ray "dimming" associated with a halo coronal mass ejection // *Astrophys. J. Lett.* – 1997. – V. 491. – P. L55.

182. Sterling A.C., Hudson H.S., Thompson B.J., Zarro D. Yohkoh SXT and SOHO EIT observations of sigmoid-to-arcade evolution of structures associated with halo coronal mass ejections // *Astrophys. J.* – 2000. – V. 532. – P. 628–647.

183. Struminsky A. Forbush precursory increase and shock-associated particles on 20 October 1989 // *Annales Geophysicae.* – 2002. – V. 20. – P. 1247–1252.

184. Svestka Z. Varieties of coronal mass ejections and their relation to flares // *Space Sci. Rev.* – 2001. – V. 95. – P. 135–146.

185. Taktakishvili A., Kuznetsova M., MacNeice P., Hesse M., Rastätter L., Pulkkinen A., Chulaki A., Odstrcil D. Validation of the coronal mass ejection predictions at the Earth orbit estimated by ENLIL heliosphere cone model // *Space Weather.* – 2009. – V. 7. – S03004, DOI: 10.1029/2008SW000448.

186. Thatcher L.J., Müller H.-R. Statistical investigation of hourly OMNI solar wind data // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116. – DOI: 10.1029/2011JA017027.

187. Thompson B.J., Plunkett S.P., Gurman J.B., Newmark J.S., St. Cyr O.C.,

Michels D.J. SOHO/EIT observations of an Earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997 // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – V. 25. – P. 2465–2468.

188. Tripathi D., Bothmer V., Cremades H. The basic characteristics of EUV post-eruptive arcades and their role as tracers of coronal mass ejection source regions // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 422. – P. 337–349.

189. Vršnak B., Žic T., Falkenberg T. V., Möstl C., Vennerstrom S., Vrbanec D. The role of aerodynamic drag in propagation of interplanetary coronal mass ejections // *Astron. Astrophys.* – 2010. – V. 512. – A43, DOI: 10.1051/0004-6361/200913482.

190. Wang Y.M., Ye P.Z., Wang S., Zhou G.P., Wang J. A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000 // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107. – CiteID 1340. – DOI 10.1029/2002JA009244.

191. Wawrzynczak A., Alania M.V. Modeling and experimental study of the Forbush effect of galactic cosmic rays // *Adv. Space Res.* – 2008. – V. 41. – P. 325–334.

192. Webb D.F., Lepping R.P., Burlaga L.F. et al. The origin and development of the May 1997 magnetic cloud // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – P. 27251–27260.

193. 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.

194. Wood B.E., Wu C.-C., Howard R.A., Socker D.G., Rouillard A.P. Empirical reconstruction and numerical modeling of the first geoeffective coronal mass ejection of solar cycle 24 // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 729. – ID 70. – DOI: 10.1088/0004-637X/729/1/70.

195. Xie H., Gopalswamy N., Ofman L., St. Cyr O.C., Michalek G., Lara A., Yashiro S. Improved input to the empirical coronal mass ejection (CME) driven shock arrival model from CME cone models // *Space Weather.* – 2006. – V. 4. – S10002, DOI: 10.1029/2006SW000227.

196. Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., St. Cyr O.C., 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.* – 2004. – V. 109. – A07105, DOI: 10.1029/2003JA010282.

197. Yashiro S., Michalek G., Akiyama S., Gopalswamy N., Howard R.A. Spatial relationship between solar flares and coronal mass ejections // *Astrophys. J.* – 2008. – V. 673. – P. 1174–1180.

198. Yasue S., Mori S., Sakakibara S., Nagashima K. Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations // *Nagoya.* – 1982. – N. 7. – P. 225.

199. Yu X., Lu H., Le G., Shi F. Influence of magnetic clouds on variations of cosmic rays in November 2004 // *Solar Phys.* – 2010. – V. 263. – P. 223–237.

200. Yurchyshyn V., Wang H., Abramenko V. Correlation between speeds of coronal mass ejections and the intensity of geomagnetic storms // *Space Weather.* – 2004. – V. 2. – S02001, DOI: 10.1029/2003SW000020.

201. Yurchyshyn V., Tripathi D. Relationship between earth directed solar eruptions and magnetic clouds at 1AU: A brief review // *Adv. Geosci.* – 2009. – V. 21. – P. 51.

202. Zhang G., Burlaga L.F. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – P. 2511–2518.

203. Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during 1996-2005 // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – A10102, DOI: 10.1029/2007JA012321.

204. Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al. Correction to “Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during 1996-2005” // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – A12103, DOI: 10.1029/2007JA012891.

205. Zhukov A.N. Solar sources of geoeffective CMEs: a SOHO/EIT view // *Proc. IAU Symp.* – 2005. – 226. – P. 437–447.