Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН

В. И. Козлов, В. В. Козлов

АРИТМИЯ СОЛНЦА
В космических лучах

Ответственный редактор
академик Г. Ф. Крымский

Издательство ФГБУН ИМЗ СО РАН
г. Якутск
2016

УДК 523.165;523.74
ББК В652.7
К59

Козлов, В. И.
К59 АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах / В. И. Козлов; В. В. Козлов ; отв. ред. Г. Ф. Крымский. – Якутск : Изд-во ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2014. – 220 с.
ISBN 978-5-93254-135-7

Монография посвящена изучению переходных режимов солнечного ветра различных масштабов по изучению «групповых» особенностей поведения космических лучей. Установлено, что нелокальные свойства замагниченной среды, проявляющиеся в коррелированности флуктуаций космических лучей в окрестности ударной волны, могут быть использованы для ее прогноза с заблаговременностью ~1 сутки, а на больших масштабах и… активной фазы солнечного цикла с заблаговременностью порядка ~1 оборота Солнца. Это обусловлено тем, что предвестник в космических лучах является индикатором начала перестройки магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла. Более того, космические лучи могут дать ценную информацию и о возможном развитии 11-летнего цикла на несколько лет вперед: так в 2006 г., нами был сделан вывод о грядущем сбое 11-летнего цикла. Сейчас, это свершившийся факт.

Ожидается восстановление 11-летней цикличности в 25 цикле (2020 – 2030 гг.). Не восстановление 11-летней цикличности в 25 цикле, будет означать изменение статуса неординарного сбоя 11-летней цикличности солнечной активности в 23–24–25 циклах с локального на глобальный! Это будет соответствовать наступлению режима «фазовой катастрофы» или срыва режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца, со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности: многолетнего повышения радиационного фона космических лучей высоких энергий и, как следствие – повышение облачности и последующей интенсификации ковективных процессов в атмосфере, сопровождающейся увеличением количества осадков и понижением температуры в планетарном масштабе.

Книга адресована как специалистам в области космических лучей, так и широкому кругу читателей интересующихся проблемами солнечно-земной физики и является русской версией перевода ее на английский язык.

УДК 523.165;523.74
ББК В652.7

Рецензенты:
доктор физико-математических наук С. И. Петухов;
доктор физико-математических наук В. В. Борог;
доктор физико-математических наук Ю. А. Ромащенко.

Ответственный редактор
академик Г. Ф. Крымский.

ISBN 978-5-93254-135-7
© В. И. Козлов, В. В. Козлов

Светлой памяти любимого отца и деда –
Козлова Игнатия Петровича, посвящаем.

ПРЕДИСЛОВИЕ
ответственного редактора

В работе излагаются результаты многолетних исследований флуктуаций космических лучей по данным нейтронных мониторов и сопровождающих явлений в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. Показано, что флуктуации могут использоваться в целях диагностики процессов в межпланетной среде. Приводятся результаты такой диагностики и излагаются соображения о природе связи флуктуаций с возмущениями солнечного ветра.

Большое внимание уделено методам исследования флуктуаций. Так как флуктуации наблюдаются на фоне естественных шумов, в том числе аппаратурных, их изучение требует изощренных методов выделения, оценки их параметров и достоверности.

Авторами была обнаружена динамика частотного спектра флуктуаций в периоды, предшествующие попаданию Земли в область, охваченную ударной волной в солнечном ветре. Явление получило правильное объяснение как появление пучков космических частиц и их пространственная эволюция.

Авторы установили, что спектр флуктуаций меняется не только во время приближения ударной волны, но и при перестройках гелиосферного токового слоя. Особенно важными являются наблюдения флуктуаций в периоды переполюсовок солнечного магнитного поля. Изучая закономерности обнаруженных явлений, один из авторов предсказал сбой солнечной цикличности, который спустя несколько лет действительно произошел.

Работа содержит ценный фактический материал. Один из авторов, В.И. Козлов, является создателем метода исследований процессов в межпланетной среде с помощью флуктуаций космических лучей и известным экспертом в этой сфере.

Следует, однако, заметить, что некоторые положения, высказанные в монографии, по существу являются интуитивными суждениями (по Е.Л. Фейнбергу) и не имеют строгого научного доказательства. Допустимы ли суждения в академическом издании? Рецензент склонен дать положительный ответ. Предмет исследования очень сложен, и строгие научные результаты в таких случаях достигаются нечасто. С другой стороны, автор имеет огромный опыт в этой области и его суждениям можно доверять, хотя и с некоторым риском. Читатели смогут самостоятельно оценить степень такого риска.

Считаю, что монография нуждается в опубликовании.

Академик РАН, Г. Ф. Крымский

ВВЕДЕНИЕ

Каждый по-своему воспринимает начало космической эры, но точка отсчета одна на всех – это сигналы первого спутника и имя первого космонавта планеты – Юрия Гагарина. Мое первое ощущение от далекой движущейся звездочки в небе, это – удивление, совершенно одинаковое у меня, еще мальчишки, и у моего отца, убеленного сединами фронтовика, много повидавшего и пережившего. Завороженные, мы долго стояли вместе, задрав головы, внимательно разглядывая рукотворное создание, стремительно вспарывающее темно-синее небо, теперь уже и не небо даже, а новое, еще непривычное для детского слуха слово – Космос. Кто знает, может быть, эта первая встреча с незнакомым космосом и определило в дальнейшем мое отношение к нему, таинственному и загадочному. Но, окончательный выбор был сделан лишь в воскресный солнечный день 1961 г., когда я, курсант одесского морского училища, сквозь раскрытые окна учебного корпуса услышал ликующе-торжественный голос знакомого диктора о «...первом выходе человека в Космос», первом космонавте Юрии Гагарине. С того момента я и стал одним из множества членов, тогда еще незримого, клуба космофизиков «гагаринского призыва».

Космос – это гигантская, неисчерпаемая, бесконечно разнообразная лаборатория, созданная природой. Все в большей степени нуждаются в сведениях из космоса физика, химия, астрономия и многие другие науки. Не остался в стороне от магистрального направления науки и наш Институт космофизических исследований и аэрономии (ИКФИА СО РАН), 50-летие которого отмечалось в минувшем 2012 г. – год 100-летия открытия космических лучей австрийским физиком В.Ф. Гессом. На важность этого открытия указывает хотя бы тот факт, что плотность энергии галактических космических лучей (ГКЛ) в нашей Галактике оказалась сравнима с плотностью энергии межзвездного газа и галактического магнитного поля. Основателем нашего института и его директором, Юрием Георгиевичем Шафером, была организована Лаборатория космических исследований (стать сотрудником которой посчастливилось и одному из авторов), в которой создавались приборы для измерения уровня радиации на космических аппаратах (фото 1). Этим, прежде всего, объясняется интерес известных космонавтов к нашему Институту, в том числе, и визит космонавта «№ 2» Германа Титова (фото 2). Это, новое тогда, направление исследований заметно расширило спектр измеряемых энергий космических лучей в ИКФИА. По сравнению с субъективностью оценок чисел Вольфа, поток солнечного радиоизлучения и поток космических лучей являются более объективными, хотя и опосредованными характеристиками активности Солнца.

Фото 1. Директор Института космофизических исследований и аэрономии (ИКФИА) Юрий Георгиевич Шафер демонстрирует приборы для измерения космической радиации на космических аппаратах, создаваемые в Лаборатории космических исследований ИКФИА (1983 г.)

Фото 2. Встреча сотрудников ИКФИА и директора института Ю. Г. Шафера с космонавтом «№ 2» Германом Титовым (1983 г.)

В этой, возможно, единственной ситуации термин «лучи» (космические) оправдывает свое название. В действительности космические лучи – это частицы. Протоны, например, из которых преимущественно эти лучи и состоят. Но в отличие от фотонов (квантов света) они обладают массой и зарядом. Очевидно, что космические лучи, как и все заряженные частицы, подвержены воздействию магнитного поля, в данном случае, межпланетного. Искажения магнитного поля, вызванные взрывами на Солнце, практически, мгновенно передаются космическим лучам. Следовательно, космические лучи обладают зондирующими свойствами. В этом смысле можно сказать, что своеобразный «пульс Солнца» давно уже передается нам через модуляцию шумоподобного фона космического излучения. Оставалось только его услышать. Если вовремя зарегистрировать эти изменения существующей сетью наземных станций космических лучей, то можно предсказать экстремальное радиационное и электромагнитное возмущение на орбите Земли или, как сейчас принято говорить, экстремальное событие Космической Погоды.

Эти, казалось бы, очевидные диагностические возможности космических лучей и легли в основу создания в 1981 г. в Полярной Геокосмофизической Обсерватории Тикси экспертной системы диагностики и прогноза экстремальной активности Солнца на базе мониторинга космических лучей. Результаты тех многолетних исследований и заложили основы в области мониторинга космических лучей в режиме реального времени (фото 3). Впоследствии, это было отражено в итогах 3-х летнего международного проекта в рамках гранта INTAS 2000 – 2003 гг. – «Ключевые параметры Космической Погоды». По результатам этого проекта нами был создан сайт «Арктический центр космической погоды» http://www.forshock.ru, который размещен на сайтах ведущих

Фото 3. Первые эксперименты на созданной в Полярной обсерватории Тикси автоматизированной системе корпускулярной оперативной диагностики (АСКОД). 1986 г.

институтов: ИКИ (http://spaceweather.ru/ru/content/datasets), НИЯЯФ МГУ (http://www.kosmofizika.ru/ssilki.htm) и ИЗМИРАН (http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm).

Максимум и минимум солнечной активности, 11-летний цикл, солнечные пятна, магнитные бури – вот далеко не полный список узнаваемых терминов, появляющихся в печати, на радио и телевидении с завидным постоянством, примерно, через каждые 11 лет. Светимость Солнца (или полный поток солнечного излучения в видимом и инфракрасном диапазонах) практически неизменна. В связи с этим ее часто так и называют – солнечная постоянная. В чем секрет удивительного постоянства светимости Солнца, какова природа цикличности солнечной активности и, что не менее важно, какова причина ее длительных сбоев? Однозначного ответа на эти вопросы до сих пор нет.

Принято считать, что 11-летняя цикличность Солнца была установлена в середине XIX в. Р. Вольфом по данным систематических наблюдений за солнечными пятнами, открытыми Галилео Галилеем после изобретения им телескопа. С тех пор, так называемые, числа Вольфа (суммарное число пятен *W* на видимой части солнечного диска) и служат характеристикой активности Солнца, правда, не единственной. В год четырехсотлетия применения телескопа в астрономии Международный астрономический союз принял решение объявить 2009 г. Международным годом астрономии (МГА-2009). Так случилось, что в год 400-летия открытия Галилео Галилеем солнечных пятен, эти самые пятна не наблюдались: к примеру, в течение первых 79 дней 2009 г. на Солнце пятен вообще не обнаружено!? По этой причине некоторые ученые даже назвали 2008 г. «самым белым годом» за всю 50-летнюю эпоху космической эры. «Ничего экстраординарного не происходит, беспокоиться нечего, все протекает в пределах статистической нормы – утверждает другая группа ученых – просто сейчас регистрируется очередной минимум 11-летнего цикла солнечной активности, и не более того». По всем прогнозам, в 2008 г. минимум текущего 23-го цикла должен был уже закончиться и начаться следующий 24-й, но этого не произошло. С чем мы столкнулись? Аномалия или закономерность? Является ли затянувшийся минимум солнечного цикла чрезвычайным, или это только запоздалая, «компенсирующая» реакция Солнца на необычайно интенсивные предшествующие солнечные циклы? Представляется, что положение скорее чрезвычайное. И на это есть все основания.

Последние данные, полученные с космических аппаратов, указывают на то, что солнечный ветер «теряет силу»: среднее давление снизилось на 20% по сравнению с серединой 90-х гг. XX века. Причем, это самое низкое давление за все время существования космического

мониторинга. И это еще не все. В течение последних 10 – 12 лет общее магнитное поле Солнца ослабло на 30%! Радиотелескопами было зарегистрировано самое «тусклое» радиоизображение Солнца, по сравнению с первыми измерениями в 1955 г. (то же самое произошло и в ультрафиолетовом диапазоне). Возможно, что уменьшение радиоэмиссии как раз и связано с ослаблением солнечного магнитного поля. Мощные, в обычное время, солнечные взрывы стали перемещаться в замедленном темпе (≈300 км/с). Словно, это не сверхзвуковые образования типа ударных волн в среде, а часть структуры более медленного солнечного ветра. Получается так, что выбросы корональной солнечной массы оказываются как бы «вморожены» в плазму солнечного ветра, распространяясь вместе с ним. Может быть, нам действительно повезло, и мы можем оказаться свидетелями столь захватывающего и настолько же редкого явления, как глубокий минимум солнечной активности.

С другой стороны, в последние годы в прессе часто мелькали разного рода сообщения о гигантских вспышках на Солнце, которые ожидались в 2012 г. К сожалению, проблема прогноза величины и момента наступления гигантских солнечных вспышек – до сих пор не решена. Более приемлемым, на наш взгляд, является подход к проблеме прогноза экстремальной активности Солнца основанный на идеологии мониторинга. Так и появилась идея о необходимости проведения наземного мониторинга космических лучей в режиме реального времени. Практическая же реализация данной идеи оказалась далеко не простой. Тем не менее, нам с коллегами из Полярной обсерватории Тикси, удалось осуществить подобный мониторинг в первой половине восьмидесятых годов (фото 4). Правда, тогда еще не был в ходу термин «Космическая погода». Но идеология мониторинга (в нашем случае, космических лучей), составляет его основу и в настоящее время.

Структура расположения материала монографии следующая. В первой главе рассказывается о том, что такое Космическая погода и почему так важна проблема ее прогноза, в частности, на базе мониторинга космических лучей. Постановка задачи исследования и краткий обзор по флуктуациям космических лучей составляет содержание 2 главы. Методические особенности изучения флуктуаций космических лучей рассматриваются в главе 3. На базе известной концепции о частично детерминированных процессах указывается на принципиальную возможность прогноза поведения традиционно стохастических систем на интервале времени динамического их описания. Степень детерминированности исследуемого процесса предлагается для надежности определять принципиально различными способами. В частности,

Фото 4. «РАЗБОР ПОЛЕТОВ». Слева направо: зам. директора ИКФИА (1986 г.) – Гермоген Филиппович Крымский, гл. инженер ИКФИА – Александр Пантелеймонович Васильев, руководитель группы Мониторинга ПГО Тикси – Валерий Игнатьевич Козлов, председатель профкома ИКФИА – Валерий Афанасьевич Колосов и директор ИКФИА – Юрий Георгиевич Шафер. За пультом Установки – инженер-математик Николай Николаевич Туголуков.

статистическими методами (метод проверки статистических гипотез и метод «наложения эпох»), радиофизическими методами анализа сигналов (метод адаптивной фильтрации, корреляционно-спектральный и спектрально-временной анализ), методами топологической динамики: оценка степени детерминированности или коррелированности процесса по его корреляционной (фрактальной) размерности, методами вейвлет-анализа и с использованием теории аналитического сигнала.

Основным результатом 4 главы является факт обнаружения динамики частотного спектра флуктуаций интенсивности ГКЛ в возмущенные периоды. Показана связь коррелированных флуктуаций космических лучей с фронтом ударной волны. Анализ динамики флуктуаций ГКЛ привел также к выводу о существовании области своеобразного «следа» за ударной волной с регулярным магнитным полем. По нашей терминологии, это есть эффект «увеличения масштаба турбулентности», проявляющийся в недовосстановлении мелкомасштабных неоднородностей межпланетного магнитного поля за ударной волной в течение времени

порядка ~1 суток. Впоследствии, по данным прямых измерений эта область с регулярным магнитным полем за ударной волной была определена как область «магнитного облака».

В 5 главе, посредством обобщения знакопеременного (для шумоподобного процесса) показателя спектра мощности флуктуаций вводится спектрально-временной индекс мерцаний ГКЛ. Представление трехмерного динамического спектра в виде двумерной последовательности чисел удобно для исследования изменчивости спектра со временем существующими методами анализа временных рядов. Это и позволило обнаружить перестройку структуры гелиосферного токового слоя (ГТС) в активный период. Установлено, что подобная перестройка завершается развитой «волнистостью» ГТС, по нашей терминологии – формированием «волны активности» ГТС с квазинедельным периодом.

В главе 6 показано, что динамика флуктуаций ГКЛ обладает свойством масштабной инвариантности или скейлинга на исследуемом интервале масштабов понижений интенсивности ГКЛ. В частности: изолированных и многоступенчатых форбуш-понижений, резких и экстремально больших понижений в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла. Скейлинговый характер наблюдаемой динамики спектра флуктуаций отражает иерархически самоподобную или фрактальную структуру понижений интенсивности ГКЛ. Поведение корреляционной (фрактальной) размерности для геоэффективной фазы начала ветви спада 11-летнего цикла оказалось отличной от случайного процесса. Выход зависимости корреляционной размерности $d(n)$ на плато достигается, практически, при одном и том же значении $d \approx 2.5 – 3$ для разных циклов.

Наоборот, в окрестности минимума солнечной активности плато размыто и зависимость d(n) характерна, скорее, для случайного процесса. Монотонно растущая корреляционная размерность вида $d_{ГКЛ}(n) \sim n$, характерная для эпохи минимума означает, что на фазе восстановления интенсивности ГКЛ восстанавливаются мелкомасштабные неоднородности межпланетного магнитного поля. Этим объясняется ухудшение модуляционных свойств магнитного поля, что приводит к дефициту числа эфф. Форбуша и уменьшению (ужестчению) показателя их энергетического спектра, а также к уменьшению глубины модуляции интенсивности ГКЛ рекуррентными возмущениями, доминирующими в этот период.

Таким образом, ожидаемое из теоретических представлений академика Крымского Г. Ф., групповое поведение частиц космических лучей в окрестности «магнитных пробок» различных масштабов или фрагментация фазового объема интенсивности ГКЛ, проявилась в конечной и

низкой величине корреляционной размерности индекса мерцаний космических лучей. Скейлинг динамики мерцаний космических лучей отражает иерархически самоподобную (фрактальную) структуру понижений интенсивности ГКЛ различных масштабов. Эффект коррелированности флуктуаций ГКЛ наиболее выражен на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла (в период завершения переполюсовки общего магнитного поля Солнца), когда регистрируется наибольшее число ударных волн и эфф. Форбуша, что и определяет ее геоэффективность.

В главе 7, описывается создание в полярной обсерватории Тикси автоматизированной системы диагностики околоземного космического пространства на базе наземного мониторинга космических лучей, а также первые натурные эксперименты по прогнозу экстремальных событий Космической погоды. Показана эффективность предложенного подхода.

Важность результатов и выводов, полученных в результате анализа динамики флуктуаций ГКЛ на переходных режимах солнечного ветра различных масштабов, привела к необходимости верификации результатов изучения «групповых» свойств космических лучей или коррелированных флуктуаций космических лучей. Этому посвящены последующие главы 8 и 9. На основе новых, вероятностных представлений, проведена параметризация динамики флуктуаций ГКЛ в окрестности переходных режимов солнечного ветра. Введенный параметр определяется как индикатор степени неоднородности магнитного поля: мелкомасштабного в окрестности фронта ударной волны и более регулярного крупномасштабного поля за ударной волной.

Алгоритм обнаружения коррелированных флуктуаций ГКЛ в окрестности фронта ударной волны реализован авторами в виде роботизированной экспертной системы «Cyber-FORSHOCK» в режиме реального времени. Вся информация с февраля 2012 г. автоматически поступает в сеть Интернет на сайт Арктического центра космической погоды: http://www.forshock.ru/pred.html каждые 12 часов. Приведены примеры мониторинга и прогноза экстремальных событий космической погоды посредством экспертной системы «Cyber-FORSHOCK» с заблаговременностью ~1 сутки. Установлено, что возможности прогноза обусловлены нелокальными свойствами замагниченной среды, проявляющимися в коррелированности флуктуаций космических лучей в окрестности «магнитной пробки» на ударной волне.

В главе 9, проведен анализ введенного параметра флуктуаций ГКЛ на больших масштабах усреднения (за 1 солнечный оборот – 27 дней). Показано, что и на больших масштабах, параметр флуктуаций является индикатором степени неоднородности магнитного поля:

мелкомасштабного (при максимальном значении параметра флуктуаций ГКЛ) в окрестности переходного режима к активной фазе солнечного цикла и более регулярного крупномасштабного поля, непосредственно во время активной фазы. Впервые, по параметру флуктуаций ГКЛ дан среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего цикла с заблаговременностью ~1 оборот Солнца (http://www.forshock.ru/predlong.html). При этом важно отметить, что моменты регистрации предвестников активных фаз солнечного цикла в космических лучах совпадают с периодами перестроек Комплексов активности на Солнце.

В итоге, на новой базе подтвержден вывод об обнаружении по космическим лучам переходного колебательного процесса инверсии знака общего магнитного поля Солнца. Установлено, что длительность процесса переполюсовки для «низких» (по амплитуде в максимуме) циклов 20 и 23, фактически, вдвое превышает таковую для более высоких циклов 21 и 22. Выявленная зависимость указывает на возможное наличие своеобразного ИНВАРИАНТА: «амплитуда цикла в максимуме – длительность волны переполюсовки». Если этот инвариант действительно имеет место, то из факта низкой амплитуды 23 цикла, следовало ожидать увеличения длительности 23 цикла, что и было подтверждено результатами вейвлет-анализа вариаций.

Почему так важен факт увеличения длительности 11-летнего цикла? Дело в том, что регистрация низкочастотной «подложки» в спектре 11-летней вариации, в соответствии с гипотезой Г.В. Куклина (1982 г.), может предшествовать сбою 11-летней цикличности. Подобный период с полным исчезновением солнечных пятен наблюдался лишь в начале прошлого века. Ввиду важности этого вывода, необходимо было дать независимое его подтверждение другим методом. Для этого, нами был использован метод аналитического сигнала, когда анализ 11-летних циклов в целом, проводится с помощью построения их «фазовых портретов» на комплексной фазовой плоскости. В итоге, получено независимое подтверждение вывода об обнаружении предвестника сбоя 11-летней цикличности в современную эпоху, сделанного нами в 2006 г. по результатам вейвлет-анализа вариаций космических лучей (http://www.forshock.ru/predvlong.html). Сейчас, по прошествии 9 лет, неординарный сбой 11-летней цикличности в 23-24 циклах, есть свершившийся факт.

И в завершение, стоило бы сказать следующее. С целью определения приоритетов, НАСА раз в 12 лет опрашивает научное сообщество, в данном случае (2012 г.) специалистов в области солнечной физики, о выборе важнейших научных направлений. По итогам опроса составляется отчет, который называется Decadal Survey. Ниже, перечислены те

проблемы, над которыми НАСА собирается работать в ближайшее десятилетие:

1. Определение механизма одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Согласно наблюдениям солнце меняет свою активность с циклом в 11 лет. Существует много теорий, почему это происходит, но отсутствует консенсус. Это фундаментальная задача и решение ее необходимо, для понимания крупномасштабных изменений на Солнце, а также для оценки влияния подобных изменений на Солнце на климат Земли.

.....

3. Умение предсказывать изменения в космической погоде. Иными словами, важно знать, что приводит к вспышкам на солнце, корональным выбросам масс, всплытиям новых активных областей. Здесь надо не только понимать, что происходит, но и уметь предупредить об этом общественность. На данный момент не существует ни одного надежного метода, предсказывающего вспышки и выбросы корональной массы. Тем не менее, все это необходимо для уверенной работы спутников, радиосвязи, самолетов и электросетей».

Глава 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

1.1 Актуальность проблемы прогноза Космической погоды.

Термин Космическая Погода означает состояние околоземного космического пространства в данное время или за определенный временной интервал. Так же, как и в случае обычной погоды, наибольший интерес представляет возможное воздействие Космической Погоды на самого человека и среду его обитания. Наиболее известным типом возмущений замагниченной плазмы солнечного ветра а, соответственно, и межпланетного магнитного поля, являются межпланетные ударные волны, которые условно можно разделить на 2 типа. Во-первых, мощные ударные волны, связанные с взрывными выбросами корональной массы (CME) Солнца в период вспышечной, т.е. спорадической солнечной активности. Во-вторых, сравнительно слабые ударные волны от долгоживущих «струй» солнечного ветра, вращающихся вместе с Солнцем. Вспышечные ударные волны в то же время и трудно предсказуемы. Именно эти, взрывные ударные волны вызывают на орбите Земли экстремальные радиационные и электромагнитные возмущения, выводящие из строя системы телеметрии космических аппаратов, навигационные космические системы, системы жизнеобеспечения и управления в воздухе и на Земле, длительные нарушения радиосвязи, катастрофические «наводки» в линиях электропередач, сетях нефте- и газопроводов и т.д.

Существующие зондовые способы раннего обнаружения возмущений межпланетной среды на космических аппаратах позволяют достичь заблаговременности обнаружения (причем лишь, слабых, не представляющих особый интерес, возмущений) не более двух десятков минут, что недостаточно для практического использования. С другой стороны, сами космические аппараты выходят из строя под воздействием, в первую очередь, радиационного облучения в возмущенный период. Иными словами, имеет место проблема надежности, причем, дорогостоящего комплекса на основе нескольких космических аппаратов.

1.2. Принцип теле-видения космических «целей».

«Искажения магнитного поля, вызванные взрывами на Солнце, практически мгновенно сказываются на космических лучах. В этом смысле можно сказать, что своеобразный «пульс Солнца» давно уже передается нам через модуляцию шумоподобного фона космического излучения. Оставалось только его услышать!».

Козлов В.И. «ГРЯДЕТ ЛИ СБОЙ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА» // Наука и техника в Якутии. 2006. № 1 (10). С. 51-56.

Вышеуказанные недостатки вообще присущи зондовым методам диагностики. В этой связи, предпочтительнее использовать дистанционные методы наземной диагностики. В частности, с использованием космических лучей высоких энергий. Частицы ГКЛ, движущиеся под небольшими углами к межпланетному магнитному полю, беспрепятственно проникают через магнитную «пробку» магнитного поля от ударной волны. Другая же часть космических лучей, которая движется под большими углами к магнитному полю, отражается от пробки. Вытесненные и отраженные магнитной пробкой частицы (вследствие физических «законов сохранения», так называемых – «адиабатических инвариантов») в расходящемся межпланетном магнитном поле (ММП) фокусируются в пучки, которые и являются индикатором приближающегося к Земле фронта возмущения межпланетной среды. На Земле подобные пучки космических лучей проявятся как предвестники ударной волны.

Предложенный способ выгодно отличается простотой реализации а, следовательно, и экономической эффективностью (т. к. используется уже существующая мировая сеть наземных станций космических лучей – высокоширотных нейтронных мониторов) и оперативностью. Оперативность способа заключается в том, что скорость обнаружения взрывных ударных волн от солнечных вспышек почти мгновенна, т. к. космические лучи, регистрируемые наземными станциями, движутся, практически, со световой скоростью. При этом, расстояние, или «длина пробега» частиц космических лучей, начиная с которого наземные станции космических лучей регистрируют быстропеременные вариации (коррелированные флуктуации) космических лучей от приближающегося фронта межпланетного возмущения, по меньшей мере, в 10 раз больше расстояния от Земли до местонахождения, например, американского космического аппарата SOHO в «точке либрации». Проще говоря, в «точке» равенства действия сил притяжения Земли и Солнца.

По этой причине заблаговременность обнаружения мощного и потому наиболее опасного радиационного и электромагнитного шторма по флуктуациям космических лучей более чем в 10 раз (≈1 сутки) больше заблаговременности, достигаемой на космическом аппарате (≈15 мин). О надежности и эффективности «теле-видения» космических «целей» на базе наземного радиационного мониторинга космических лучей говорилось выше. Экономическая же эффективность предложенного дистанционного способа раннего обнаружения вспышечных ударных волн говорит сама за себя. Стоимость и эксплуатация, к примеру, американской спутниковой группировки прогноза – порядка ~1 млрд. долл. Ущерб от всевозможных потерь, связанных с пропуском подобных «космических цунами», представляет собой не менее значительную сумму. Все

возрастающая зависимость современной цивилизации от высокотехнологичных систем жизнеобеспечения в космосе, в воздухе и на Земле делает нас, по сути, заложниками научно-технического прогресса основанного, в частности, на спутниковых технологиях, в первую очередь подверженных разрушающему воздействию экстремальных проявлений Космической погоды.

Все это указывает на актуальность проблемы раннего обнаружения радиационного шторма, сопровождающегося электромагнитной бурей. Прогнозы вообще, да к тому же в науке, вещь неблагодарная, особенно в космической физике. Здесь отсутствует воспроизводимость условий «эксперимента», если так можно говорить о гелиогеофизическом явлении. Наблюдать же то, что предсказано, удается вообще чрезвычайно редко.

1.3 Коррелированные флуктуации космических лучей как индикатор состояния Космической Погоды.

Известно, что для описания движения частиц в электромагнитных полях применима теорема Лиувилля, утверждающая, что фазовый объем, занимаемый группой частиц, сохраняется в процессе их движения. В частности, инжекция частиц означает фрагментацию фазового объема на такие части, в пределах которых содержится одна или несколько частиц, которые взаимодействуют с намного более массивными частями фазового объема. Деформацию фазового объема можно исследовать экспериментально, наблюдая флуктуации космических лучей с помощью узкоугольных детекторов. Предварительные результаты такого изучения показывают, что вблизи источников сильных возмущений в межпланетной среде имеет место “рваная” структура интенсивности космических лучей. Это качественно согласуется с представлением о фрагментации фазового объема /1/. Источником или стоком (в зависимости от знака эффекта) подобной фрагментации, наблюдаемой в эксперименте как регистрация мерцаний интенсивности ГКЛ, могут служить «магнитные пробки» в межпланетном магнитном поле регистрируемые в окрестности ударных волн.

Известно, что число межпланетных ударных волн и вызываемых ими эффектов Форбуша, т.е. понижений интенсивности ГКЛ, достигает максимума на фазе роста и в начале фазы спада 11-летнего цикла /2/. Количество событий, сопровождающихся инжекцией корональной солнечной массы (которые являются источником ударных волн и магнитных облаков), увеличивается также в начале ветви спада цикла /3/. С другой стороны, известен факт доминирования рекуррентных возмущений в эпоху минимума СА. Таким образом, представляет несомненный

интерес исследование мерцаний интенсивности ГКЛ на различных фазах 11-летнего цикла. Отличие физических условий на различных фазах цикла является принципиально важным для верификации механизма образования мерцаний интенсивности ГКЛ. В этой связи, в отличие от традиционного вычисления средних спектров в большом частотном интервале, т.е. за длительные промежутки времени, нами проводилось изучение изменений в частотном спектре флуктуаций ГКЛ во время прохождения крупномасштабных возмущений солнечного ветра через орбиту Земли /4-10/.

Относительно применяемой в данной работе терминологии. В литературе существует несколько терминов, определяющих по сути дела один и тот же класс вариаций космических лучей с периодами от нескольких минут до нескольких часов. Это и микровариации и короткопериодические вариации и пульсации, сцинтилляции и флуктуации космических лучей. В настоящей работе принята терминология, различающая два основных класса вариаций космических лучей, основанная на частотном представлении зависимости интенсивности от времени – вариации со сплошным и дискретным спектром. В целом, вариации космических лучей со сплошным спектром частот определяются как флуктуации. Флуктуации могут оказаться коррелированными, т. е. принимать различные оттенки, или быть “окрашеными”. В частности, высокочастотная – “ультрафиолетовая” область спектра определена нами как область мерцаний интенсивности ГКЛ. Вариации с преобладанием явно выраженных дискретных спектральных линий определены как пульсации. Таким образом, пульсации и мерцания интенсивности являются частным случаем флуктуаций космических лучей и, следовательно, когда характеристики вариаций ГКЛ не определены, целесообразен термин флуктуации интенсивности космических лучей.

Литература к главе 1

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики // Методологические проблемы развития науки в регионе. Наука. Новосибирск. 1987. С.175-176.

2. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. Et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease. // Proceed. 21 ICRC. Adelaide. 1990. Vol.6. P. 217-219.

3. Lindsay G.M., Russel C.T., Luhman J.G. et al. On the Sources of Interplanetary Shocks at 0.72 AU. // J. Geophys. Res. 1994. Vol.99. N A1. P. 11-17.

4. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Козлов В.И. и др. Явления в космических лучах в августе 1972 г. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т.37. № 6. С.1205-1211.

5. Kozlov V.I., Kuzmin A.I., Krymsky et. al. Cosmic Ray Variations with Period Less than 12 Hours. // Proc. 13 ICRC. 1973. Vol.2. P.939-942.

6. Козлов В.И., Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И. и др. Динамические характеристики короткопериодных вариаций космических лучей. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1974. Т.38. N 9. С.1908-1911.

7. Kozlov V.I. On the Degree of Magnetic Field Inhomogeneity of Piston Shock Waves. // Phys.Solariterr. Potsdam. 1978. N 9. p.57-62.

8. Козлов В.И. Происхождение пульсаций космических лучей. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т.20. N 3. С.391-395.

9. Козлов В.И. О турбулентных пульсациях магнитного поля в ударных волнах. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т.21. № 6. С. 1115–1117.

10. Козлов В.И. О структуре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций космических лучей. // Автореферат канд. дисс. М.: НИИЯФ МГУ. 1984. 20 с.

Глава 2. ПРОБЛЕМА ИЗУЧЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

2.1 Особенности поведения флуктуаций космических лучей в окрестности ударной волны.

Как известно, в диффузионном приближении быстрым частицам приписываются индивидуальные случайные траектории не коррелируемые между собой. В то же время на малых пространственно-временных масштабах должна быть существенной корреляция траекторий, вследствие которой группы частиц, близких в фазовом пространстве, сравнительно долго сохраняются как компактные образования с «единой» траекторией /1/. Групповое поведение частиц представляет большой интерес с различных точек зрения. Прежде всего, это важно при изучении нелинейного взаимодействия космических лучей с окружающей средой, а также для диагностики крупномасштабных процессов в космической плазме.

Из-за исключительной сложности коррелированного движения частиц, в исследованиях этого явления чрезвычайно важно опираться на информацию, полученную из анализа наблюдений. В этой работе изучаются вариации космических лучей, обусловленные групповым поведением галактических космических лучей в межпланетном магнитном поле. Соответствующие вариации целесообрано искать в ситуациях, когда возникают «окрашенные» группы частиц, за эволюцией которых легко проследить. Наибольшие контрасты в космических лучах создают ударные волны, порождающие резкие понижения интенсивности называемые эффектами Форбуша. В поршневых волнах относительное сжатие вещества и поля между фронтами превышает те значения, которые она достигает в теле взрывных волн. Как показывают расчеты /2-4/, в области между передним и задним ударными фронтами таких волн магнитное поле может претерпевать дополнительное усиление значительной величины. Поэтому можно говорить о «магнитной пробке» в теле ударной волны распространяющейся вместе с ней по невозмущенному солнечному ветру с магнитным полем B_0. Пробочное отношение $\eta = B_{max}/B_0$ вследствие указанного усиления может быть больше, чем предельное значение, достигаемое для простых ударных волн /2/: $\eta \geq \eta_{max} = \gamma+1/\gamma-1$. Как оценки, так и наблюдения показывают, что пробочное отношение может достигать значения $\eta \approx 10$. Такие пробки способны эффективно отражать заряженные частицы.

Наличие в ударных волнах областей спрессованного магнитного поля – магнитных пробок – порождает сепарацию траекторий частиц на «разрешенные» и «запрещенные». Первые связывают области перед ударным фронтом и позади него, а вторые – изолируют эти области одну от другой /5-7/. В итоге, в окрестности магнитных пробок будет

происходить разного рода деформация фазового объема: возникнет чередование областей разной плотности – появится «перемежаемость». В угловом распределении, которое представляет собой двумерную проекцию функции распределения, следует ожидать появления кластеров, размеры и контраст которых должны уменьшаться с удалением от источника. Наблюдения за угловым распределением должны показывать «мерцания» небесной сферы в космических лучах, свойства которых находятся в зависимости от источника; от характеристик магнитного поля и от расстояния до точки наблюдения. Можно предвидеть, что параметры мерцаний будут обладать фрактальными свойствами /5/.

2.2. Постановка задачи исследования коррелированных флуктуаций космических лучей.

Как было показано выше, источником фрагментации фазового объема (появления «групп» частиц или коррелированных флуктуаций) могут служить магнитные пробки, ударные волны и т. д. /8-10/. Следовательно, представляет несомненный интерес исследование эффекта фрагментации фазового объема интенсивности ГКЛ в окрестности ударных волн и на различных фазах 11-летнего цикла. Отличие физических условий, например, на различных фазах цикла – является принципиально важным для верификации гипотезы о фрагментации «фазового объема» космических лучей.

Исходя из этого, были поставлены следующие задачи:

1. Изучение *группового* поведения космических лучей в окрестности ударных волн.
2. Разработка методики исследования *коррелированных* флуктуаций.
3. Создание автоматизированной системы мониторинга космических лучей высокой энергии с целью получения *качественных* данных для последующего их анализа.
4. Разработка *количественных* критериев раннего обнаружения ударных волн.
5. Изучение динамики флуктуаций космических лучей на *переходных* режимах солнечного ветра различных масштабов.

В соответствии с поставленными задачами, были подвергнуты изучению короткопериодные вариации космических лучей, регистрируемых нейтронными мониторами. Выбор этих приборов обусловлен их относительно узкими угловыми диаграммами, высокими энергиями частиц, на которые мелкомасштабная турбулентность оказывает незначительное влияние, и хорошим временным разрешением вследствие большой чувствительной площади.

2.3. Флуктуации интенсивности галактических космических лучей по данным нейтронных мониторов.

Связь между случайными магнитными полями и флуктуациями космических лучей была впервые теоретически установлена в работе В.И. Шишова /11/. Последовательное решение задачи об установлении связи между спектрами флуктуаций космических лучей и случайного магнитного поля получили И.Н. Топтыгин и В.А. Васильев /12/. Известно, что колебания плазмы солнечного ветра порождают мелкомасштабные неоднородности в пространственном распределении космических лучей. Так как эти неоднородности перемещаются вместе с ветром, детекторы космических лучей должны зарегистрировать короткопериодные колебания, частотный спектр которых связан со спектром колебаний ММП /13/. Установленная в теоретических исследованиях Б.А. Тверского /14/, И.Н. Топтыгина /15/ и Г.Ф. Крымского /16/ связь процессов распространения и ускорения космических лучей с турбулентностью солнечного ветра указывала на актуальность изучения структуры возмущений ММП по исследованию флуктуаций ГКЛ.

В целом ряде экспериментальных работ начала семидесятых годов, посвященных спектральному анализу флуктуаций в широком интервале частот $10^{-7} < f < 10^{-2}$ Гц, показано, что спектры являются степенными f^{μ} со значениями показателя $1.5 < \mu < 2$. В /17/ сравнивался наблюдаемый частотный спектр флуктуаций космических лучей со спектром, рассчитанным в квазилинейном приближении. Был сделан вывод, что невозможность в рамках квазилинейной теории удовлетворительно описать наблюдаемый спектр флуктуаций ГКЛ для $f > 10^{-4}$ Гц обусловлена, по-видимому, вкладом нелинейных эффектов. Следует отметить, что одной из основных предпосылок формализма Джокипи является слабость взаимодействия, т.е. флуктуации магнитного поля должны быть малы. Это означает, что изменение питч-угла в течение времени одного ларморовского вращения достаточно мало. Согласно /18/, это условие невыполнимо, например, для протонов с энергией порядка ~100 МэВ, что указывало на необходимость найти более строгие решения проблемы питч-углового разброса для сильной турбулентности, а не только поправки квазилинейной теории первого порядка. Все это указывало на важность исследования флуктуаций магнитного поля, в частности, по изучению флуктуаций космических лучей.

Первые результаты исследований изменчивости спектров флуктуаций интенсивности ГКЛ в окрестности межпланетной ударной волны представлены в работе /19/. Оправданность поиска осцилляторной структуры ударных волн вытекала, прежде всего, из самого факта существования ударных волн в бесстолкновительной плазме солнечного

ветра /20/. Подобные пульсации нами были обнаружены и относились они к «особенному» участку спектра $f > 10^{-4}$ Гц. На изучение этого диапазона в основном и были направлены усилия исследователей, как у нас, так и за рубежом. В частности работа /19/, явилась отражением вышеизложенной точки зрения на связь процессов распространения и ускорения космических лучей в окрестности межпланетных ударных волн. В результате, в возмущенные периоды в диапазоне периодов вариаций $10^m < T < 10^h$ была обнаружена динамика частотного спектра флуктуаций ГКЛ, отражающая как макро- так и тонкую структуру межпланетных ударных волн /21/.

Затем, вывод о динамике спектра вариаций ГКЛ (по часовым данным нейтронного монитора ст. Дип-Ривер) был получен группой японских исследователей /22/. В отличие от *N*-образной динамики, полученной нами, динамика найденная японскими исследователями, имела «усеченный» *V*-образный вид. По часовым данным они подтвердили смещение в возмущенный период максимума (суточной гармоники) спектра в более низкочастотную область вариаций, вплоть до периода огибающей форбуш-понижения. *N*-образность динамики (причем в более высокочастотном диапазоне вариаций $10^m < T < 10^h$) обусловлена предварительным смещением максимума спектра в область высокочастотных $10^m < T < 30^m$ флуктуаций и последующим смещением в низкочастотную область (*V*-образность по терминологии японских исследователей /22/) вплоть до вариаций с периодами $T \leq 10$ час.

В /23/ был сделан вывод об обнаружении значимых флуктуаций космических лучей с периодом $T \approx 21$мин, наблюдавшихся во время форбуш-понижения в течение нескольких часов. В результате анализа флуктуаций космических лучей в период эфф. Форбуша по данным сцинтилляционных детекторов в ИЗМИРАН в дальнейшем также были получены аналогичные результаты /24/.

В работах /25/ сообщалось об обнаружении отклика во флуктуациях атмосферного давления на флуктуации в космических лучах. В итоге, авторами был сделан вывод об установлении зависимости между обнаруженными в /24,25/ пульсациями атмосферного давления и известными глобальными 160-мин колебаниями поверхности Солнца /26/. В то же время, в результате изучения флуктуаций атмосферного давления и космических лучей другими группами исследователей, подобной связи между флуктуациями давления и космических лучей не обнаружено /17,27/. Следует сказать, что исследования флуктуаций атмосферного давления проводились в связи с вопросом происхождения флуктуаций космических лучей. Анализ возможных источников (атмосферного, магнитосферного, межпланетного и солнечного) модуляции частотного

спектра флуктуаций ГКЛ привел к выводу о *межпланетном* источнике модуляции /21/.

Вопрос об источнике модуляции снова возник в связи с результатами ряда авторов об обнаружении перестройки частотного спектра флуктуаций ГКЛ перед протонными вспышками с энергией частиц выше 1 ГэВ /28–31/. На основе анализа флуктуаций ММП по данным прямых измерений на КА в работах /32, 33/ было показано, что увеличение амплитуд флуктуаций запаздывает по отношению к солнечным вспышкам. Что касается атмосферно-магнитосферного источника, то там же отмечается, что причиной возникновения флуктуаций ГМП не могут быть флуктуации рентгеновского или ультрафиолетового излучения Солнца.

Аргументы в пользу межпланетного источника модуляции частотного спектра флуктуаций ГКЛ были получены в дальнейшем при совместном анализе флуктуаций по наземным наблюдениям, СКЛ и ММП по измерениям на КА. Была выявлена общность динамики спектров мощности флуктуаций ГКЛ и ММП /34,35/. Эти результаты подтверждаются данными работы /33/, в которой найдено уменьшение показателя спектра флуктуаций модуля ММП в окрестности фронтов ударных волн. Отмечается также, что в относительно спокойные периоды преобладают флуктуации ММП альвеновского типа, а в возмущенные периоды значительно (в 3-5 раз) увеличивается вклад магнитозвуковых волн. Это согласуется с выводом о магнитозвуковом характере вариаций магнитного поля, обусловивших пульсации космических лучей в ударных волнах /20/.

Также важной является задача определения характеристик флуктуаций ГКЛ во время прохождения рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра. Предварительные результаты говорят об усилении флуктуаций в головной части высокоскоростного потока и их отсутствие в задней части потока /36/. Работу необходимо было продолжить. В результате проведенного в работе /37/ анализа сделано заключение, что флуктуации космических лучей высоких энергий, наблюдаемые в области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра, обусловлены модулирующим воздействием быстрых магнитозвуковых волн с характерным пространственным масштабом $10^{11} \div 10^{12}$ см. Как было показано в /35/, возмущение параметров солнечного ветра на секторной границе приводит к увеличению высокочастотных флуктуаций ГКЛ с периодами 20-50 мин, момент появления которых совпадает по времени со сменой знака поля на границе сектора.

Совершенно новый свет на природу флуктуаций проливают работы Алексеенко и др. /38/. Ими использованы данные наблюдений общей ионизующей компоненты, полученные с установки «Ковер» Баксанской

обсерватории. В данных обнаруживаются многочисленные случаи вариаций с периодами 10-20 мин и амплитудой порядка ~1%. Большая часть событий не связана с бросками давления и температуры. Выделены три типа вариаций, обусловленные возникновением сильных атмосферных электрических полей (до 20 кВ/м) и имеющие тесную связь по длительности: длительность микровариаций и длительность возмущений электрического поля имеют коэффициент корреляции $r = 0.994$ /38/. Намечающаяся корреляция между интенсивностью и напряженностью поля такова, как если бы поле воздействовало на электроны. Однако, согласно приближенной оценке, амплитуды наблюдаемых вариаций на порядок больше ожидаемых /38/. Вопрос о механизме этих вариаций оставался открытым. Имеется ли связь обнаруженных микровариаций с флуктуациями космических лучей, обсуждавшихся выше? Определенного ответа на этот вопрос дать нельзя, так как условия наблюдения тех и других сильно отличаются. Как и условия, при которых они могут возникать. В любом случае, отмечалась необходимость в дополнительных исследованиях /39/.

Регистрация ряда мощных событий на спаде 21 цикла солнечной активности в 1982–1984 гг. инициировала продолжение поиска пульсаций ГКЛ. Авторы работы /40/ подтвердили существование 10-часовой вариации ГКЛ в событии 13-15 июля 1982 г., об обнаружении которой сообщалось ранее в работе /41/. В работе /42/ обнаружена 37-мин вариация 25 апреля 1984 г. Так как 25 апреля начинается предпонижение перед эффектом Форбуша 26 апреля 1984 г., то значимые флуктуации 25 апреля предпочтительнее связывать не с магнитосферным /42/, а с межпланетным /43/ источником, вызвавшим мощный (~10%) эффект Форбуша 26.04.1984 г.

К тому времени, снова возник интерес к возможности проявления глобальных 160-мин пульсаций поверхности Солнца в интенсивности ГКЛ. Происхождение обнаруженных в /44/ 160-мин пульсаций ГКЛ связывается с 160-минутными геомагнитными пульсациями и 160-мин колебаниями поверхности Солнца. В результате аналогичных исследований проведенных в /45/, убедительных доказательств наличия 160-мин пульсаций в интенсивности ГКЛ получено не было. Вопрос о реальности этих пульсаций ГКЛ и их природе требует дальнейшего изучения.

Значительный интерес научной общественности вызвали результаты группы авторов о дискретной природе спектра флуктуаций потока космических лучей и параметров солнечного ветра /46-48/. В первую очередь это связано, повидимому, с их интерпретацией. Если факт дискретной структуры спектра флуктуаций исследуемых параметров в диапазоне $10^{-4} \div 10^{-3}$ Гц достаточно убедителен, то интерпретация

дискретности как проявление гравитационной и акустической мод колебаний Солнца нуждается в обосновании.

И в настоящее время актуален вопрос о природе пульсаций, наблюдаемых в интенсивности ГКЛ. Уже в первых работах Г.Ф. Крымского указывалось на возможность раскачки существующих в межпланетной среде магнитозвуковых колебаний за фронтом ударной волны /49,50/. На вероятный эффект нелинейной перекачки энергии по спектру МГД-колебаний в окрестности фронтов возмущений солнечного ветра обращалось в работе /51/. Попытка применения формализма Джокипи-Оуэнса для описания наблюдаемой динамики в указанном участке спектра сделана в работе Дормана и др. /52/. Наблюдаемые в рамках такого подхода, изменения спектров мощности флуктуаций космических лучей, или часть из них, являются (по мнению авторов работы /52/) следствием изменения жесткости энергетического спектра анизотропии ГКЛ. Следует заметить, что неизменность ММП, как одно из условий применимости формализма Оуэнса-Джокипи, в действительности (например, на фронтах ударных волн) не выполняется.

В работах /53–55/ определена скорость нарастания магнитозвуковых колебаний, раскачиваемых в солнечном ветре либо потоками космических лучей ускоренных на фронтах ударных волн, либо потоками СКЛ. Представлены также результаты расчетов, которые свидетельствуют о важной роли этого процесса в создании МГД-турбулентности во внутренней гелиосфере в диапазоне $10^{-4}\div1$ Гц. По мнению авторов работ /53-55/, МГД-волны эффективно модулируют интенсивность ГКЛ с энергией ε = 1÷10 ГэВ, в результате чего следует ожидать существенного изменения спектра микровариаций ГКЛ, регистрируемых нейтронными мониторами в интервале $10^{-4}\div10^{-3}$ Гц.

Изменчивость среднемесячных значений спектров мощности флуктуаций ГКЛ в цикле солнечной активности исследовалась в работе /56/. Было установлено, что функция взаимной корреляции спектра мощности флуктуаций ГКЛ и чисел Вольфа имеет выраженный максимум при сдвиге τ = 10 мес. В итоге, показана значимая связь амплитуды флуктуаций космических лучей с уровнем солнечной активности, что объясняется соответствующей эволюцией магнитозвуковой турбулентности в солнечном цикле.

Вывод же автора цитируемой работы о том, что МГД-волны генерируемые потоками низкоэнергичных (~1 МэВ) частиц вызывают наблюдаемую модуляцию интенсивности галактических космических лучей высокой энергии (≥1 ГэВ), по нашему мнению, не получил убедительного экспериментального подтверждения. Основным источником МГД-волн, которые вызывают модуляцию интенсивности ГКЛ, является

крупномасштабное возмущение солнечного ветра – ударная волна, на которой (при выполнении необходимых условий) происходит и ускорение частиц до энергии порядка ~1 МэВ. Достаточным условием для модуляции интенсивности ГКЛ МГД-волнами, является наличие крупномасштабного возмущения, т.е. ударной волны (с турбулентной структурой фронта /51, 57/). Этот вывод подтверждается данными прямых измерений: коррелированные флуктуации ГКЛ регистрируются обычно при наличии возмущений ММП, градиентов скорости и плотности плазмы солнечного ветра, в том числе, и при отсутствии потоков низкоэнергичных частиц. И, наоборот, в отсутствие возмущений ММП и сколько-нибудь значительных градиентов скорости и плотности солнечного ветра, значимые мерцания ГКЛ, как правило, отсутствуют. Притом, что в это время регистрируется поток низкоэнергичных частиц с энергией до ~1 МэВ. Достаточно полный обзор по связи флуктуаций интенсивности ГКЛ с крупномасштабными возмущениями солнечного ветра приведен в недавней работе /58/.

Литература к главе 2

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики. // Методологические проблемы развития науки в регионе. Наука. Новосибирск. 1987. С.175-176.

2. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде. // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. N2, С. 196-200.

3. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты. // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. N3. С. 407-410.

4. Крымский Г.Ф., Транский И.А. Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. // Динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1973. С. 154-198.

5. Крымский Г.Ф., Елшин В.К., Ромащенко Ю.А. и др. Магнитные пробки в ударных волнах и их роль в ускорении частиц. // Связь физических процессов в ионосфере и магнитосфере Земли с параметрами солнечного ветра. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1977. С. 27-49.

6. Kamoldinov S.M. et al. The Influence of Magnetic «Corks» upon the Galactic Cosmic Ray Distribution. // Proc. 14 ICRC. Munchen. 1975. Vol.3. P. 838-843.

7. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Шафер Г.В. и др. Модели ударных волн и наблюдаемые свойства форбуш-эффектов. // В сб.:

Исследования по космофизике и аэрономии. Изд. ЯФ СО АН СССР. Якутск. 1975. С.58-68.

8. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. Et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease. // Proceed. 21 ICRC. Adelaide. 1990. Vol.6. P. 217-219.

9. Lindsay G.M., Russel C.T., Luhman J.G. et al. On the Sources of Interplanetary Shocks at 0.72 AU. // J. Geophys. Res. 1994. Vol.99. N A1. P. 11-17.

10. Badruddin. Cosmic Ray Modulation and High Speed Solar Wind Streams of Different Origin. // Proc. 23 ICRC. Calgary. 1993. Vol.3. P. 727–730.

11. Шишов В.И. Флуктуации интенсивности заряженных частиц движущихся в случайном магнитном поле. // ЖЭТФ. 1968. Вып.4(10). Т.55. С.1449-1455.

12. Васильев В.Н., Топтыгин И.Н. Связь спектра неоднородностей межпланетного магнитного поля со спектром флуктуаций интенсивности космических лучей. // Изв. АН СССР. Сер.физ. 1976. Т.40. №12. С.627-629.

13. Крымский Г.Ф. Вариации космических лучей и межпланетная среда. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т.33.

14. Тверской Б.А. К теории статистического ускорения Ферми. // ЖЭТФ. 1967. Т.52. С.483.

15. Toptygin I.N., Vasilyev V.N. On the Interplanetary Cosmic Ray Scintillations // Astrophys. Space Sci. 1977. Vol.48. P.267.

16. Крымский Г.Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. // ДАН СССР. 1977. Т.234. С.1306. №11. С.1858-1869.

17. Owens A.J., Jokipii J.R. A Relation between Cosmic Ray Fluctuations, Gradient and Diffusion Coefficient. // Proc. 13 ICRC. Denver. USA. 1973. Vol.2. P.777-782.

18. Wibberenz G. Propogation of Cosmic Rays in Interplanetary Space. // Lect. on Space Physics. Dusseldorf. 1973. P.81-124.

19. Kozlov V.I., Kuzmin A.I., Krymsky G.F. Cosmic Ray Variations With Period Less Than 12 Hours. // Proceed. XIII ICRC. 1973. Denver. USA. Vol.2. P.939-942.

20. Kennel C.F.., Sagdeev R.Z. Collisionless Shock Waves in High Plasmas. // J.Geophys.Res. 1967. Vol.2. N13. P.3303-3341.

21. Козлов В.И. О структуре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций космических лучей. // Автореферат канд. дисс. М.: НИИЯФ МГУ. 1984. 20с.

22. Kanno T., Saito T., Sakurai T. Dunamical Spectral Analysis of Cosmic Ray Anisotropy by Means of High-Speed Spectral Analysis (HISSA) Method. // Report of Ionosphere and Space Research in Japan. 1975. Vol.29. №3. P.118-126.

23. Kato M., Sakai T, Wada M. A Search for Transient of Cosmic Ray Intensity Variations in the Range of 10^{-4}-10^{-3} Hz. // Contributions to the 16 ICRC. Kyoto. 1979. P.65-69.

24. Либин И.Я. Исследование межпланетных флуктуаций космических лучей с помощью многонаправленного сцинтилляционного супертелескопа ИЗМИРАН. // Автореферат диссертациии. Изд. ИЗМИРАН. М. 1979.

25. Новиков А.М., Старина В.А., Скрябин Н.Г. Регистрация спектров временных вариаций интенсивности космических лучей и атмосферного давления. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1984. С.3-6.

26. Новиков А.М., Старина В.А., Скрябин Н.Г. и др. Пульсации космических лучей и атмосферного давления вблизи периодов 160 и 180 мин. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т.25. N3. С.494-495.

27. Fujii L., Mori., Nagashima k. Power Spectrum of the Cosmic Ray Intensity Variations. // Proc. ICRC. Denver. 1973. Vol.2. P.785-788.

28. Стародубцев С.А., Филиппов А.Т., Чирков Н.П. Флуктуации галактических космических лучей перед протонными вспышками на Солнце. // Астроном. журнал. 1982. Т.59. С.1229.

29. Стародубцев С.А., Филиппов А.Т. О пульсациях интенсивности космических лучей перед возрастаниями потока релятивистских частиц от солнечных вспышек. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т.24. №4. С.682-683.

30. Стародубцев С.А. Динамика спектров флуктуаций космических лучей перед протонными вспышками и форбуш-понижениями. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т.25. N6. С.997-1000.

31. Блох Я.Л., Либин И.Я., Юдахин К.Ф. Флуктуации космических лучей на Земле во время солнечных вспышек. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т.24. N6. С.875-878.

32. Шельтинг Б.Д., Вальчук Г.Е., Фельдштейн Я.И. и др. Флуктуации межпланетного магнитного поля в связи с протонными вспышками. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т.24. N4. С.557-565.

33. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Флуктуационные характеристики ММП в диапазоне 3×10^{-4}-10^{-2} Гц. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т.25. N6. С.881-885.

34. Безродных И.П., Козлов В.И., Кузьмин В.А. и др. Динамика частотного спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля

и космических лучей. // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т.22. №6. С.1016-1018.

35. Кузьмин В.И., Козлов В.И. Динамика спектра флуктуаций межпланетного поля и галактических космических лучей во время возмущений солнечного ветра. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.48. №11. С.2146-2148.

36. Борисов Д.З., Козлов В.И., Самсонов И.С. и др. Анализ флуктуаций и токов галактических космических лучей во время прохождения высокоскоростных потоков солнечного ветра. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.48. N11. С.

37. Стародубцев С.А., Транский И.А., Веригин М.И. и др. Флуктуации интесивности космических лучей и межпланетного магнитного поля в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т.36. N2. С.134-138.

38. Алексеенко В.В., Сборщиков В.Г., Чудаков А.Е. Микровариации интенсивности космических лучей и электрическое поле атмосферы. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.46. N11. С.2152-2154.

39. Крымский Г.Ф. Исследования по физике космических лучей. // Первичное космическое излучение и механизмы ускорения космических лучей. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1985. С.119-133.

40. Vainikka E., Torsti J.J. Valtonen E. et al. Spectral Analysis of the Forbush Decrease of July 13, 1982. // Proc. 19 ICRC. USA. 1985. Vol.5. P.242-245.

41. Козлов В.И. Результаты прогноза и диагностики возмущений межпланетной среды в апреле – июле 1982 г. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. Ноябрь 1982. С.21-25.

42. Sakai T., Kato M. A Relation Between the Short Time Variations of Cosmic Rays and Geomagnetic Field Change. // Proc. 19 ICRC. USA. 1985. Vol.5. P.266-269.

43. Козлов В.И., Борисов Д.З., Туголуков Н.Н. Метод диагностики межпланетных возмущений по исследованию флуктуаций космических лучей и его реализация в системе автоматизации научных исследований в Полярной Геокосмофизической Обсерватории Тикси. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.48. N11. С.2228-2230.

44. Antonova V.P., Zusmanovich A.G. Frequency Spectra of Short-Period Variations of Cosmic Rays. // Proc. 19 ICRC. 1985. Vol.5. P.278-280.

45. Kozlov V.I., Tugolukov N.N., Vashenyuk E.V. Galactic Cosmic Ray Pulsation and 160-min Variations Research. // Proceed. XXI ICRC. Adelaide. 1989. Vol.6. P.396-399.

46. Thomson D.J., Lanzerotti L.J., Maclennan C.G. Time Series Analysis of Low Energy Interplanetary Charged Particle Fluex and Interplanetary Magnetic Field Data // Proceed. XXIV ICRC. Roma-Italy.1995. Vol.4. P.435–438.

47. Thomson D.J., Maclennan C.G., Lanzerotti L.J. Propogation of Solar Oscillations Through the Interplanetary Medium. // Nature. 1995. Vol.376. P.139-144.

48. Ladbury R. Is the Answer Blowing in the Solar Wind? // Physics Today. 1995. September. P.17-18.

49. Крымский Г.Ф. Вариации космических лучей и межпланетная среда. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т.33. N11. С.1858-1869.

50. Крымский Г.Ф. Короткопериодические вариации космических лучей. // Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1973. С.249-266.

51. Козлов В.И. Происхождение пульсаций космических лучей. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т.26. N2. С.204-208.

52. Дорман Л.И., Либин И.Я., Юдахин К.Ф. Возможная интерпретация изменения формы спектра мощности флуктуаций космических лучей перед возмущениями межпланетной среды. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.26. N2. 1986. С.204-208.

53. Berezhko E.G., Kozlov V.I., Kuzmin A.I. et al. Cosmic Ray Intensity Micropulsations Assosiated with Disturbances of Electromagnetic Conditions in the Heliosphere. // Proceed. XX ICRC. Moscow. 1987. Vol.4. P.99-102.

54. Бережко Е.Г. и Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т.52. №12. С.2361-2363.

55. Бережко Е.Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей. // Письма в Астрономический журнал. 1990. Т.16. N12. С.1123-1132.

56. Бережко Е.Г., Бревнова И.А., и Стародубцев С.А. Спектр флуктуаций интенсивности космических лучей в цикле солнечной активности. // Письма в Астрономический журнал. 1993. Т.19. N8. С.749–752.

57. Козлов В.И. О турбулентных пульсациях магнитного поля в ударных волнах. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т.21. N 6. С. 1115–1117.

58. Либин И.Я. Флуктуации космических лучей. // Космические лучи и гелиоклиматология. Серия «Космические лучи». Москва. МАОК. 2012. Т. 28. С. 132-162.

Глава 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ.

«Великие прорывы в науке обычно связаны с новыми методами*, а не с новыми доктринами…. Наука расцветает тогда, когда она свободно пользуется всеми подручными средствами, не ограниченными предвзятыми предписаниями, чем должна быть наука. Всякий раз, когда появляются новые средства, рождаются новые неожиданные открытия, потому что воображение Природы несравненно богаче нашего воображения».*

Фримен Дайсон. «Ученый как бунтарь», в кн. «МОЗГ МАТЕМАТИКА» (Давид Рюэль). Москва – Ижевск. 2012. Стр. 170.

3.1 Метод корреляционно-спектрального анализа.

Причинная взаимосвязь различных явлений, множественность факторов, обуславливающих вариации космических лучей, – все это позволяет рассматривать изучаемое явление как проявление определенных закономерностей и случайных воздействий или помех /1/. В полной мере это относится и к изучению флуктуаций космических лучей в возмущенные периоды, когда нестационарность процесса наиболее выражена. Приведение данных к стационарному (в смысле, средних значений) виду заключается в исключении низкочастотных трендов, обусловленных временными профилями форбуш-понижений и вспышек СКЛ. Только после этого можно пользоваться существующими методами анализа стационарных процессов. В случае необходимости к стационарному ряду можно применять избирательные фильтры для выделения отдельных спектральных компонент. Следовательно, на первом этапе исследование флуктуаций космических лучей сводится к задаче фильтрации данных, которая имеет свои особенности.

Известно, что один из способов фильтрации состоит в перестройке временной функции, сводящейся к умножению исходной временной реализации на весовую функцию с последующим усреднением. Преобразованная линейным фильтром исходная гармоническая функция также является гармонической с той же частотой, но с новой амплитудой и фазой. Выбор передаточной функции фильтра в виде четной функции оставляет фазу неизменной. Фильтрация определяется как /2/:

$$y_i = \sum_{j=-m}^{m} h_i x_{i+j};\ \ h_j = \delta_{oj} - \left(1/2(m+1)\right)\cdot\left(1+\cos j\pi/(m+1)\right);$$

$\delta_{oj} = 0$, при $j \neq 0$;

$\delta_{oj} = 1$, при $j = 0$;

здесь x_i , i=1...N – исходный ряд; y_i – отфильтрованный.

В результате фильтрации остаются высокочастотные составляющие с периодами $T < m+1$, или частотами $f > 1/(m+1)$. При этом используются только гармоники, находящиеся на линейном участке частотной характеристики.

Исключив тренды в данных, далее применим метод спектра мощности. Предположим, что наши данные являются реализацией стационарного эргодического процесса $x_1, x_2, \ldots x_n$. Оценка автокорреляционной функции процесса по данной реализации имеет вид:

$$R_i = (1/(N-m)) \cdot \sum_{i=1}^{N-m} x_i x_{i+m};\ m = 0,\ 1,\ \ldots,\ M,$$

где $M < N$.

Оценка спектральной плотности процесса выражается формулой /3/:

$$P_k = (2/M) \cdot \sum_{i=1}^{M} R_i \cos(ik\pi/M);\ k = 1 \ldots N,$$

где R_i – корреляционная функция.

Доверительные интервалы для преобразования P_k определяются из соотношения /4/:

$$P_S = S(\omega) \cdot \chi^2/\gamma\ ,$$

здесь $S(\omega)$ – средняя спектральная плотность, приравненная к плотности «белого шума»; $\gamma = (2n - 0.5)/\tau$ – число степеней свободы; χ^2 – выбирается по числу степеней свободы γ; $n = N - m$ есть длина исходного ряда N (за вычетом длины высокочастотного фильтра m). Длина исходного ряда составляет, в нашем случае, 1 сутки (288 пятиминутных значений). Величина сдвига корреляционной функции $\tau = 72$, число степеней свободы $\gamma = 13$ для каждого из доверительных уровней 90, 95 и 99%.

3.2 Нелинейная фильтрация случайной компоненты

Расчет спектра мощности возможен по формуле /5/:

$$P'_k = (4/N) \cdot \left[\left(\sum_{i-1}^{N} x_i \cos ik\pi/N \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N} x_i \sin ik\pi/N \right)^2 \right]$$

Известно, что оценка P_k с точностью до постоянного множителя эквивалентна оценке P'_k. С целью улучшения отношения сигнал/шум, предварительно вычисляется автокорреляционная функция R_i от

исходного ряда x_i. Следовательно, применяя преобразование P'_k к R_i а не к исходному ряду x_i мы, в силу эквивалентности оценок, используем *повторную* корреляцию. Повторная же корреляция, как отмечается в работе /6/, в еще большей степени уменьшает роль малых (относительно основной ω_o) гармоник исходного ряда. Возведение амплитуд в квадрат при преобразовании P'_k позволяет с наибольшей точностью определять гармоники с наибольшей амплитудой, т.е. надежнее выделять главные особенности процесса, что и требуется для классификации частотных спектров.

Предложенный алгоритм, улучшая отношение сигнал/шум, работает как *адаптивный*, настраиваемый на максимум в спектре избирательный фильтр. Поскольку спектр мощности рассчитывается в данном случае не по исходному ряду $N = 288$, а по корреляционной функции с числом точек $\tau = 72$, расчет спектров мощности по P'_k дает кроме того экономию счетного времени, что немаловажно в случае экспресс-анализа флуктуаций. Сравним уровень помех в процессах до и после кореляционного преобразования. Оценка наиболее проста в дискретном случае, когда последовательные значения анализируемой функции представляют собой сумму значений гармонической функции $A\cos\omega_0 t$ в точках отсчета и ошибки n_k. Причем, значения ошибки в различные моменты времени являются независимыми случайными величинами с одинаковой дисперсией σ.

В итоге, уровень шума в исходном ряде $x_k = A_0 \cos\omega_0 k + n_k$ составит /6/:

$$\alpha_x \approx 2\sigma^2 / A_0^2 .$$

Уровень шума после корреляционного преобразования:

$$\alpha'_x \le (8\alpha_x / s)\cdot(1 + \alpha_x / 8) ,$$

где S – интервал обработки. При длине $S \gg 8$ уровень шума после процедуры нелинейной фильтрации шумовой составляющей:

$$\alpha'_x << \alpha_x .$$

В случае оценки P'_k уровни значимости A, B и C вычисляются следующим образом /5/:

$A = 2{,}3 \times P_s$ – для 90% доверительного уровня ($N = \tau$),
$B = 3 \times P_s$ – для 95% --- // ---,
$C = 4{,}6 \times P_s$ – для 99% --- // ---,

где $P_s = 4\sigma^2/N$ – уровень шума, σ- дисперсия, $N = \tau$ – длина корреляционной функции $R_i(\tau)$ исходного ряда x_i, подвергнутого линейной и нелинейной фильтрации.

Наиболее трудный случай подавления, когда мощность помехи максимальна на частоте Найквиста, т.е. на частоте отсчета исходных данных. Именно эта ситуация приведена на рис 3.1 а. Амплитуды спектральных линий превышают как 90%, так и 99% доверительные уровни. После нелинейной фильтрации (рис.3.1 б) из пяти спектральных линий с амплитудами, превышающими 90% доверительный интервал, значимой осталась единственная 54 гармоника (период $T \approx 13$ мин).

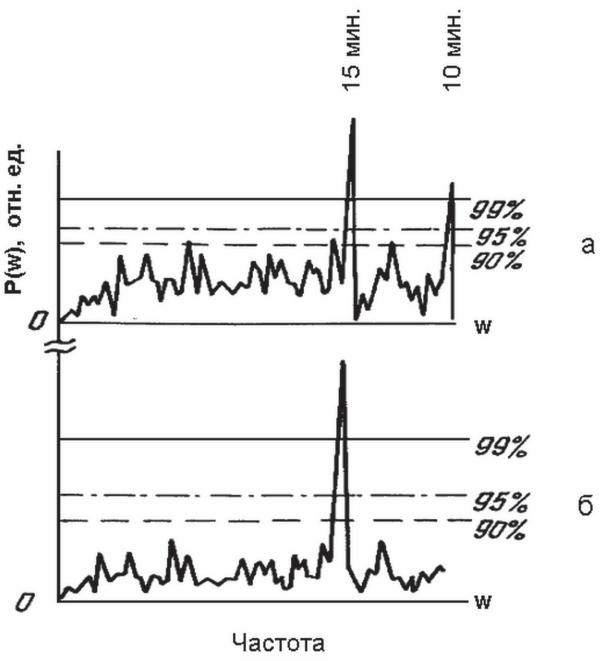


Рис. 3.1. Результаты нелинейной фильтрации «шума» на частоте Найквиста (б) в исходном сигнале (а). По оси ординат – спектры мощности анализируемого сигнала. По оси абсцисс – частоты. Показаны доверительные уровни 90%, 95% и 99%

3.3 Модификация спектрально-временного анализа

По определению спектральная плотность выражается формулой:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

Интегрирование в принципе может быть выполнено в пределах от $-\infty$ до текущего времени t. Величина $S(\omega)$, являющаяся функцией не только частоты, но и времени, носит название текущего спектра. Введение понятия текущего спектра значительно расширяет круг спектральных представлений. Это понятие перекидывает мост между частотным и временным описанием явления. В дальнейшем появилась потребность в сближении частотной и временной точек зрения; в результате возникает еще одно понятие – «мгновенный» спектр /7/.

Мгновенный спектр может быть дан в следующем виде:

$$S_T(\omega,t)=\int_{t-T}^{t} x(t)e^{-j\omega t}dt,$$

т.е. мгновенный спектр определен как спектр отрезка процесса длительностью T, непосредственно предшествующего моменту t. В этом определении мы имеем дело со «скользящим» интегрированием: интервал интегрирования имеет постоянную длину, но перемещается по оси времени**.** Двумерное, спектрально-временное представление определяется как /8/:

$$Y(\omega,t)=(1/\pi)\int_0^{\infty} H[(\lambda-\omega_i)/\omega_i]S(\lambda)e^{i\lambda t}d\lambda,\ \ S(\lambda)=\int_0^{T} U(t)e^{-i\lambda t}dt,$$

здесь t – время; ω – круговая частота; $U(t)$ – анализируемая функция; $S(\lambda)$ – ее спектр; $H(\omega)$ – фильтрующее ядро; $Y(\omega,t)$ – комплексная функция. Предварительно проводится операция по устранению трендов, и только после этого применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Фильтрация осуществляется набором узкополосных фильтров:

$$H=H[(\lambda-\omega_i)/\omega_i],$$

задаваемых формулой:

$$H(x)=\exp\left(-\alpha x^2\right),$$

где параметр α управляет разрешением по времени и частоте. Совокупность значений амплитуд $\lg Y(\omega_i,t)$ и дает двумерное представление сигнала на плоскости (ω,t). Впервые метод спектрально-временного анализа для исследования наблюдаемой динамики спектра флуктуаций ГКЛ был применен в работе /9/. Существенным недостатком расчета по алгоритму спектрально-временного или СВАН-анализа является высокий уровень шума, особенно в высокочастотной области спектра. Наиболее простой способ подавления шумовой составляющей процесса – обрезание спектра со стороны высоких частот. При этом, естественно, теряется и полезная информация о высокочастотных пульсациях, если они реально существуют. В этой связи, для изучения динамики спектров мощности флуктуаций ГКЛ нами применялся модифицированный спектрально-временной анализ, когда СВАН-карты (сванограммы) рассчитывались с использованием описанной выше процедуры шумопонижения, т.е. расчета спектра по алгоритму P'_k с указанием уровней значимости амплитуд спектральных линий. В этом его отличие от традиционного СВАН-анализа.

Спектр мощности выводится на экран монитора в виде строки символов через каждый часовой сдвиг длины реализации. Символьное представление спектра определяется следующим образом. Пусть A – 90% уровень значимости, B – 95%, C – 99%. Если амплитуда спектральной линии $X < A$, то указывается «пробел», если $A < X < B$ – минус, если $B < X < C$ – плюс, при $X > C$ – звездочка. При этом, спектры мощности сванограмм рассчитываются по оценке P'_k (см. рис. 3.1 б в п. 3.2). Динамика спектров мощности флуктуаций ГКЛ, которая началась задолго до начала форбуш-понижения 25–26 апреля 1984 г. показана на рис. 3.2. Момент начала форбуш-понижения отмечен вертикальной стрелкой. Сванограмма наглядно иллюстрирует динамику спектра флуктуаций как до начала эфф. Форбуша, так и непосредственно во время понижения интенсивности ГКЛ.

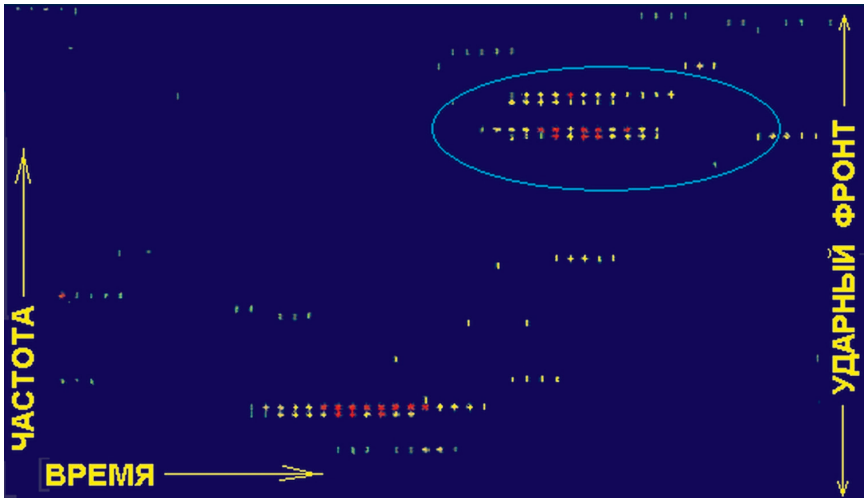


Рис. 3.2. Амплитудно-частотно-временная динамика спектра флуктуаций ГКЛ – эффект «Гало» в космических лучах перед фронтом ударной волны. Вертикальная стрелка по оси ординат показывает направление увеличения частоты сигнала. Горизонтальная стрелка по оси абсцисс указывает направление времени. Амплитуда представлена степенью «почернения» символа «мгновенной» амплитуды на фиксированной частоте.

3.4. Степень частичной детерминированности как вероятность /10/.

Известно, что определение понятия случайности основано на системе соглашений. Например, алгоритмическая теория вероятности

отождествляет случайность с алгоритмической сложностью /11/, а в теории частично-детерминированных процессов случайность трактуется как непредсказуемость /12/. Сложность определяется как наименьшая длина алгоритма, переводящего одну последовательность чисел в другую. Если длина алгоритма $l(N)$ при $N \to \infty$ остается конечной, т.е. если $l(N)/N \to 0$, при $N \to \infty$, то последовательность объявляется алгоритмически простой и, стало быть, неслучайной. Подобная операция тестирования на всевозможные алгоритмы практически неосуществима, так как концепция алгоритмической сложности принципиально требует предельного перехода $N \to \infty$.

С другой стороны, экспериментатору трудно признать последовательность (процесс) случайной, если ее алгоритм известен, хотя и сложен. И, это очень важно, имеется едва ли преодолимая трудность, связанная с наличием шумов при измерениях. При физических измерениях производится, как правило, фильтрация (дискриминация) шумов, иначе объектом измерения будут шумы, а не исследуемый процесс. При алгоритмическом подходе, если его приложить к измерениям, различие между шумом и измеряемым процессом не проводится. В итоге, даже при относительно простом алгоритме самого исследуемого процесса смесь «сигнал + шум» приобретает сложность шума.

В той части, которая касается выявления динамических (детерминированных) закономерностей в исследуемом процессе, логика эксперимента ближе к концепции частичной детерминированности /10/:

$$R(\tau) = \frac{\{y(t) \cdot z(t)\}}{[\{y(t) \cdot y(t)\}\{z(t) \cdot z(t)\}]^{1/2}},$$

где $\tau = t - t_0$ – время, прошедшее после начала наблюдения, а фигурные скобки означают операцию сравнения наблюдений $y(t)$ с модельным процессом $z(t)$. При таком сравнении предполагаются начальные условия:

$$z(t^0) = y(t^0).$$

Благодаря этому при $\tau = 0$ степень детерминированности равна 1 независимо от того, как определена операция сравнения. Равенство $R = 1$ отвечает полной детерминированности (полной предсказуемости) наблюдаемого процесса $z(t)$. В противоположность этому вариант $R = 0$ интерпретируется как полная случайность (непредсказуемость). Значения $0 < R < 1$ описывают частичную детерминированность. Интервал, в течение которого степень детерминированности R превышает определенный уровень, например $R > 1/2$, характеризует время

детерминированного поведения или, что то же самое, время предсказуемости $\tau_{\max} = \tau_{пред}$.

В оригинальных работах /10,12/ в качестве операции сравнения была выбрана операция статистического усреднения произведения $y(t)\cdot z(t)$: $\{y(t)\cdot z(t)\} = \langle y(t)z(t)\rangle$, так что степень детерминированности R представляет собой коэффициент корреляции $y(t)$ и $z(t)$. Статистическое усреднение можно скомбинировать с временным интегрированием:

$$\{y(t)\cdot z(t)\} = \int_{t^0}^{t^0+\tau} \langle y(t)z(t)\rangle dt$$

и тогда мера $R(t)$ характеризует не локальное, а интегральное на всем временном отрезке сходство между наблюдением и прогнозом.

Концепция частичной детерминированности формализует фактически уже существующие отношения между экспериментатором и экспериментальным материалом. Экспериментатор выдвигает те или иные гипотезы $z(t)$ и проверяет на них экспериментальные данные $y(t)$. Существенно, что ни одна модель $z(t)$ не может претендовать на бесконечное время предсказания, и поэтому для любых физических процессов:

$$\tau_{\max} = \tau_{пред} < \infty .$$

Благодаря этому имеется возможность несколько по иному взглянуть и на алгоритмический подход:

Во-первых, бессмысленно подвергать процесс испытанию на бесконечно длинные тесты, достаточно ограничиться реальными, конечными временами $\tau < \tau_{пред}$;

Во-вторых, оценивать сходство наблюдения $y(t)$ не со всем мыслимым множеством гипотез, а только с гипотезами, имеющимися у экспериментатора;

В-третьих, что очень важно, концепция частичной детерминированости радикально решает проблему шумов, всегда присутствующих в наблюдении $y(t)$. Это связано с тем, что операция сравнения (статистического усреднения произведения) включает в себя и фильтрацию. Удельный вес тех компонентов наблюдения $y(t)$, которые обязаны своим происхождением шумам, при длительном накоплении с весом $z(t)$ уменьшается, в том числе и тех компонентов $y(t)$, которые не согласуются с принятой моделью $z(t)$. Поэтому многократное накопление данных позволяет выделить полезный сигнал. В этом суть метода наложения эпох, используемого и в данной работе. В алгоритмическом же подходе шумы не подвергаются осмысленной фильтрации. С этими

существенными дополнениями концепция частичной детерминированности может рассматриваться как развитие алгоритмического подхода применительно к реальным объектам исследования /12/.

Концепция частичной детерминированности оказывается весьма гибкой и универсальной. Для демонстрации этой гибкости ниже будет показано, что при определении операции усреднения произведения $<y(t)z(t)>$, как числа совпадений между значениями $y(t)$ и $z(t)$ степень детерминированности $R(t)$ превращается в эмпирическую вероятность /10/.

Чтобы убедиться в этом, произведем дискретизацию отсчетов как по времени, так и по величине: значения y и z берутся с дискретностью ε. Определим операцию сравнения $<yz>$, как число ε-совпадений между y и z в пределах коридора шириной ε. Его можно выразить как число событий A, состоящих в том, что разность $(y - z)$ по модулю не превышает $\varepsilon/2$:

$$\{y \cdot z\} = n_A(\tau), \text{ где } A: |y - z| < \varepsilon/2.$$

Если ввести индикаторную функцию I_A, определенную соотношением:

$$I_A(S) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

то число ε-совпадений $n_A(\tau)$ на интервале $[t^0, t^0 + n\Delta t]$ выразится суммой:

$$\{y(t) \cdot z(t)\} = n_A(\tau) = \sum_{S=1}^{n} I_A(S), \ \tau = n\Delta t$$

Поскольку при $y \subset z$ всегда $I_A(s) = 1$ и $(yy) = (zz) = n$, степень детерминированности $R(\tau)$ превращается в отношение числа совпадений $n_A(\tau)$ к общему числу отсчетов n за время $\tau = n\Delta t$:

$$R(\tau) = n_A(\tau)/n = \sum_{S=1}^{n} I_A^S / n = \omega_n(\varepsilon)$$

Это отношение представляет собой относительную частоту совпадений между y и z в пределах коридора ε, т.е. эмпирическую вероятность P. В частном случае, если модельное значение постоянно $z = z^*$, то величина $R(\tau)$ представляет собой просто относительное время (относительную частоту) пребывания наблюдаемой величины $y(t_s)$ в ε-окрестности фиксированной величины z^*:

$$R(\tau) = \omega^* = \omega\left(\left|y - z^*\right|\right) < \varepsilon / 2$$

Несмотря на существование непосредственной связи $R(\tau)$ с выборочной вероятностью P величина R, как мера сходства между y и z, обладает все же некоторой дополнительной гибкостью, которая состоит в том, что значения:

$$z_s = z(t_s) = z(t^o + s\Delta t),$$

в процессе сравнения могут меняться вместе с изменением наблюдаемой величины $y_s = y(t_s) = y(t + s\Delta t)$. Очевидно, что здесь заложена возможность адаптации способов верификации.

Важно отметить, что получение последовательных значений наблюдаемой величины y_s совсем не обязательно связано с отсчетами, которые берутся в разные моменты времени. Мы могли бы получить n значений y_s , если бы один и тот же сигнал передавался по m независимым каналам**.** При этом под независимыми каналами понимаются такие, в которых действуют независимые помехи. Очень важно, что способ образования этих каналов не играет никакой роли с точки зрения существа метода /7/.

Вопрос об «истинной случайности» может обсуждаться только в рамках тех или иных соглашений. При этом желательно иметь количественные критерии истинности. Это относится и к теоретико-множественному подходу, и к алгоритмической теории вероятности, и к обсуждаемой здесь теории частичной детерминированности. В рамках этой теории, случайность наблюдаемого процесса выступает как относительное свойство, проявляющееся при сравнении с модельным процессом. Не указав класс предсказательных моделей, невозможно отличить детерминированное (предсказуемое) от случайного (непредсказуемого). Об «истинной», «настоящей» случайности здесь можно говорить лишь условно, имея в виду ход процесса за пределами горизонта предсказуемости $\tau_{\lim}$: при $\tau > \tau_{\lim}$ наступает полная непредсказуемость поведения системы ($R \to 0$) на множестве всех мыслимых моделей.

Взгляд с позиций предсказуемости может оказаться весьма конструктивным при попытках определить понятие шума. Очевидно, что определение шума легче сформулировать, рассуждая «от противного»: если процесс допускает предсказание на основании какого-либо алгоритма, то его можно вычесть (скомпенсировать), и тогда он перестанет быть шумом, помехой. Следовательно, шум – это процесс, для которого мы не имеем предсказательной модели. В частности, динамический хаос становится шумом при $\tau > \tau_{\det}$, тогда как при $\tau < \tau_{\det}$ он хотя бы частично предсказуем и в этом смысле перестает быть шумом. В интервале $\tau_{\text{corr}} \le \tau \le \tau_{\det}$ корреляции между значениями процесса уже расцепились,

но детерминированное описание еще не потеряло силу, поскольку корреляции между прогнозом (моделью) и наблюдением еще не распались. Детерминированное описание имеет своей целью предсказывать мгновенные и локальные значения процесса (или поля), что удается в пределах области детерминированности. Кинетический же подход с самого начала ориентирован на получение средних характеристик.

Метеорология раньше других естественных наук обнаружила, что долгосрочные предсказания имеют предел, обусловленный локальной неустойчивостью динамических процессов в атмосфере. Именно в метеорологии были открыты странные аттракторы /13/, углубленный анализ которых подвел нас к пониманию существования принципиальных пределов предсказуемости. На примере предсказания погоды отчетливо выявились принципиальные преимущества динамического прогноза перед статистическими методами, основанными на прямолинейном корреляционном принципе типа $y(t_o+\tau) \approx y(t_o)$, т.е. по известному принципу – «завтра будет как сегодня» или на более изощренных оценках авторегрессионного типа. Анализ хаотического поведения динамических систем с позиций теории частично детерминированных процессов, которая основана на отождествлении случайности с непредсказуемостью, позволяет сделать следующие выводы /10/:

1. В рамках представлений о частичной детерминированности, динамический хаос – частично детерминированный процесс с ограниченным временем детерминированного (предсказуемого) поведения τ_{det}. С этой точки зрения термин «детерминированный хаос» правильно было бы заменить на «частично-детерминированный» хаос.

2. Степень детерминированности $R(\tau)$ существенно зависит от уровня шумов в системе и от выбранной модели, тогда как степень когерентности (коэффициент автокорреляции) от уровня шумов практически не зависит. Время детерминированного поведения может быть увеличено как за счет снижения шумов, так и за счет улучшения предсказательной модели или, иными словами, за счет уменьшения «шумов незнания».

3. Степень когерентности (коэффициент автокорреляции) динамического хаоса выступает как наихудшая оценка степени детерминированности, реализуемая при условии, что в качестве модели используется значение наблюдаемого процесса в предшествующий момент времени. Вследствие этого время детерминированного поведения, как правило, заметно превышает время автокорреляции: $\tau_{\text{det}} > \tau_{\text{corr}}$.

4. Детерминированное описание динамических систем на ограниченных интервалах времени $\tau < \tau_{\text{det}}$ не противоречит возможности

статистического (кинетического) описания. Это позволяет говорить о сосуществовании детерминированного и кинетического описаний в интервале $\tau_{corr} < \tau < \tau_{det}$ и о *принципиальной* возможности предсказания поведения ряда систем, которые традиционно считаются стохастическими.

3.5 Степень детерминированности процесса в фазовом пространстве по оценке его корреляционной размерности.

*«Случайные феномены, рассматриваемые в их **коллективном** действии в большем масштабе, создают неслучайную закономерность».*

Гнеденко Б.В., Колмогоров А.Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин. М.: ГИТТЛ. 1949

Размерностные характеристики стохастического движения чрезвычайно важны с различных точек зрения. С одной стороны, они позволяют приблизиться к сути случайного, а с другой, весьма полезны для сугубо прикладных задач, связанных с обработкой сигналов (кодированием, распознаванием и т. д.). Действительно, с помощью традиционного анализа случайного сигнала (корреляционого, спектрального) обычно затруднительно что либо сказать о породившем его источнике. В частности, является ли сигнал шумовым в обычном смысле (т.е. невоспроизводимым с помощью алгоритма) или этот сигнал – продукт деятельности некоторой детерминированной системы, хотя бы и весьма сложной? Если же каким-то образом определить размерность этого сигнала, то проблему удается решить. Конечная размерность d означает, что данный сигнал в принципе можно воссоздать с помощью динамической системы порядка, не выше чем $2d+1$ /14/. Таким образом, значение размерности d дает оценку числа степеней свободы системы (среды). По мере возрастания размерности ($d \to \infty$) хаотический сигнал все более приближается к абсолютно случайному процессу. С этой точки зрения, источник, который мы привыкли считать случайным, можно рассматривать как движение динамической системы на странном аттракторе бесконечной размерности.

Идея обработки случайных сигналов с целью реконструкции свойств порождающих их источников были высказаны ранее Такенсом /15/. Принципиальный шаг в развитие этих идей, и их практическом воплощении был сделан в 1983 г. Грассбергером и Прокаччиа /16/. Ими было предложено всю диагностику строить на обработке конкретной временной последовательности исследуемой величины. Принято считать, что временная последовательность по единичной переменной

дает довольно ограниченную информацию. Как показано в /17/ временная последовательность обладает содержательной информацией – она носит следы всех других переменных участвующих в описании динамики системы. Это позволяет безмодельным способом идентифицировать некоторые ключевые особенности системы. Пусть наблюдаемая $x^k(t)$ рассматривается в дискретные моменты времени t, $t+\tau$,..., $t+k\tau$, $t+(n-1)\tau$. Эти значения $x^k(t)$ описывают координату точки в n-мерном пространстве, соответствующую моменту t. При изменении t мы получим в этом пространстве траекторию, воспроизводящую некоторое множество. При должном выборе τ можно ожидать, что переменные $x^k(t)$ будут линейно независимы, что и требуется для построения фазового пространства. Это позволяет выйти за рамки одномерного пространства исходной временной последовательности и развернуть динамику системы в многомерном фазовом пространстве, т.е. получить фазовый портрет системы, точнее, его проекцию на малоразмерном подпространстве размерности $n' < n$. Обозначим через x_i точку фазового пространства с координатами $x_o(t_i)$,..., $x_{n-1}(t_i + (n-1)\tau)$. Так устанавливается начало отсчета x_i для всех имеющихся данных и, следовательно, можно вычислить расстояние $|x_i - x_j|$ от этой точки до остающихся $N-1$ точек. Это позволяет сосчитать число точек в фазовом пространстве отстоящих от x_i на расстоянии $|x_i - x_j|$не превышающем некоторую заданную величину r. Повторяя этот процесс для всех значений i, можно вычислить:

$$C(r) = \left(1/N^2\right) \sum_{i,j=1;i\neq j}^{N} \theta\left(r - \left|x_i - x_j\right|\right)$$

где Θ – функция Хевисайда:

$\Theta(x) = 0$ при $x < 0$

$\Theta(x) = 1$ при $x > 0$.

Отклонение $C(r)$ от нуля служит мерой влияния точки x_i на положение других точек. Поэтому $C(r)$ и определяется как интегральная корреляционная функция. Зафиксируем достаточно малое ε и воспользуемся им в качестве своеобразного метра для зондирования структуры аттрактора. Если последний представляет собой линию то, очевидно, число пробных точек, расстояние от которых до заданной точки не превышает r должно быть пропорционально $\sim r/\varepsilon$. Если же аттрактор представляет собой поверхность, то число таких точек должно быть пропорционально $\sim(r/\varepsilon)^2$. В общем случае, если аттрактор представляет собой d-мерное многообразие, то число точек должно быть пропорционально $(r/\varepsilon)^d$.

Иными словами, размерность аттрактора d дается наклоном зависимости $\ln C(r)$ от $\ln r$ в определенном диапазоне r:

$\ln C(r) = d \ln r$.

В итоге, имеем следующий алгоритм:

1. Исходя из имеющейся временной реализации, построить ряд интегральных корреляционных функций $C_n(r)$ для каждого возрастающего значения размерности исходного фазового пространства n.

2. Получить наклон d вблизи начала координат для всех $C_n(r)$ и определить как этот результат изменяется с увеличением n, т.е. найти зависимость $d(n)$.

3. Если величина d в зависимости от n выходит на плато выше некоторого n', то представленная данной временной последовательностью система должна иметь малоразмерный аттрактор. Вышедшую на насыщение величину d' и следует рассматривать как размерность (фрактальную, в общем случае) этого аттрактора. Значение n', выше которого происходит насыщение и представляет собой минимальное число переменных, необходимых для моделирования процесса соответствующего даному аттрактору размерности d'.

Ниже, представлены результаты контрольного расчета по определению корреляционной размерности временного ряда чисел полученного на выходе генератора пуассоновского распределения. Тестовая проверка на качество генерации сначала статистическими методами показала, что данный числовой ряд соответствует распределению Пуассона на уровне значимости 98%. Далее, было проведено тестирование контрольного ряда методом корреляционно-спектрального анализа. Длина реализации составляла $N = 2500$ исходных значений. Число сдвигов автокорреляционной функции составляет $\tau = 100$. Как и следовало ожидать, автокорреляционная функция представляет собой дельта-функцию при нулевом сдвиге, а максимумы амплитуды вариаций АКФ не превышают 95% уровень значимости. Спектр АКФ «плоский», характерный для случайного процесса близкого к «белому шуму».

Третий тестовый расчет проводился методом определения корреляционной размерности процесса. В соответствии с алгоритмом, изложенным выше, сначала строился ряд интегральных корреляционных функций $C_n(r)$ пуассоновского ряда (рис. 3.3а) и синусоидальной функции (рис. 3.4а) для каждого значения числа координат n задаваемого фазового пространства. Далее, определялся наклон $d(n)$ зависимости $C_n(r)$ в окрестности начала координат (для первых 3 точек) всех кривых (рис. 3.3б и рис. 3.4б). Корреляционная размерность контрольного пуассоновского распределения монотонно растет вместе с размерностью задаваемого пространства. Напротив, корреляционная размерность для периодического процесса (синусоиды, в данном случае), уже при $n = 3$ выходит на плато (рис. 3.4б).

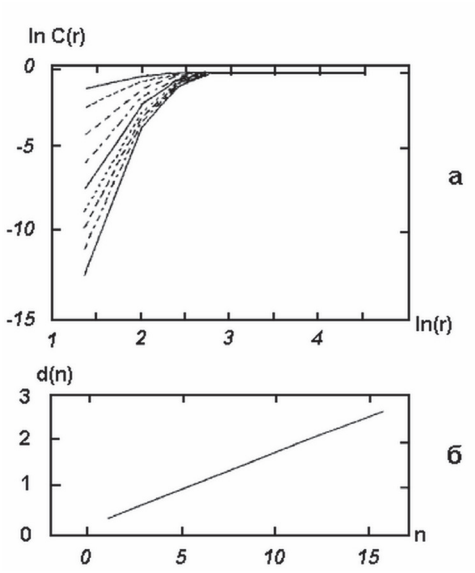


Рис. 3.3. Результаты расчета интегральной корреляционной функции $C_n(r)$ для случайного (пуассоновского) ряда – а. Иллюстрация монотонной зависимости корреляционной размерности $d(n)$ для случайного ряда – б, где n – размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства

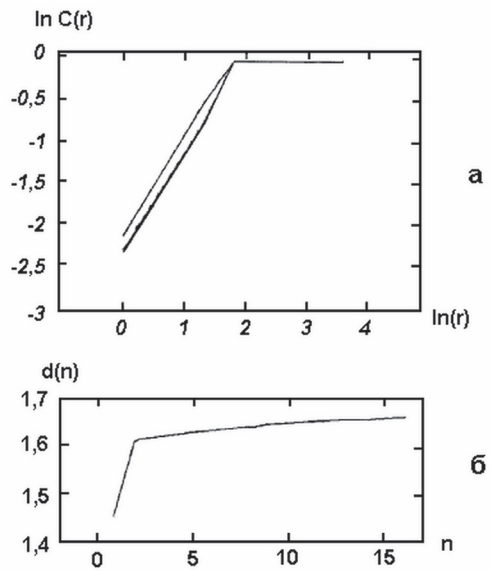


Рис. 3.4. Результаты расчета интегральной корреляционной функции $C_n(r)$ для гармонического (синусоида) сигнала – а. Иллюстрация низкой и конечной величины корреляционной размерности $d(n)$ для регулярного, неслучайного сигнала. Выход корреляционной размерности на плато достигается уже при $n = 3$ (б), где n – размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства

Наверное ни одно явление не вызвало столь широкого интереса и в то же время бурных дискуссий и протиречивых утверждений среди физиков, математиков и инженеров, как явление турбулентности. Один из главных вопросов, почему ламинарное течение стало неупорядоченным и как эта неупорядоченность сказывается на средних характеристиках явления. Главное при этом понять, происходит ли запутывание, перемешивание элементов жидкости в результате, например, действия неконтролируемых пульсаций набегающего на тело потока, либо в результате неустойчивостей присущих самому течению. Эти вопросы принципиальны для любой турбулентности, независимо от ее «ведомственной» принадлежности – гидродинамической, плазменной и т.д. Другими словами речь идет о фундаментальной проблеме: каким

способом нелинейное поле (произвольной природы) переходит в неупорядоченное, случайное движение и как это движение описывать? /18/.

Естественные представления о малых возмущениях, нарастающие в результате развития нелинейной неустойчивости не могли объяснить переход к турбулентности. Согласно анализа малых колебаний в рамках уравнений Навье-Стокса, для течения вообще не существует критического числа Рейнольдса при котором бы ламинарное течение становилось бы неустойчивым. В то же время экспериментаторы прекрасно знают, что при $Re \geq 5000$ это течение турбулизуется. Подобные «неудачи» линейной теории заставили многих сомневаться в самой возможности применения детерминированных уравнений Навье-Стокса для описания турбулентных течений. Возникло убеждение (Карман, Тейлор), что подобно движению газов, турбулентность можно понять и истолковать лишь на основе статистического подхода. Эта точка зрения подкреплялась тем, казалось бы, очевидным обстоятельством, что при достаточно большом значении числа Рейнольдса число степеней свободы участвующих в движении столь велико, что описание течения возможно лишь в среднем /18/.

Первые попытки объяснить неупорядоченное, хаотическое течение с чисто динамических позиций были предприняты Ландау /19/ и Хопфом /20/. Их модели, одинаковые по смыслу, реализуют идею о последовательном усложнении течения за счет развития целой иерархии неустойчивостей с несоизмеримыми временными масштабами. Гипотеза Ландау-Хопфа сыграла большую роль в становлении идей о динамической природе турбулентности, хотя сами модели (предложенные пять десятилетий назад) и оказались неадекватными задаче. Тем не менее, сама догадка о том, что развитие турбулентности определяется последовательным (по числу Рейнольдса) возбуждением новых степеней свободы течения, оказалась правильной /18/.

Принципиальное изменение представлений о природе турбулентности (и природе случайного вообще) произошло после открытия и проникновения во все области научного знания феномена динамического хаоса – случайного поведения полностью детерминированных систем. Математическим образом случайного движения динамической системы служит стохастическое множество траекторий в соответствующем фазовом пространстве – странный аттрактор. Странный аттрактор – притягивающее множество траекторий, среди которых все (или почти все) являются неустойчивыми (седловыми) – может возникнуть после небольшого числа бифуркаций в фазовом пространстве даже весьма простых течений. Математическим образом хаотических колебаний является аттрактор Лоренца /13/. Наиболее распространенные сценарии

перехода к хаосу в простых ситуациях – разрушение квазипериодических движений (механизм, из-за которого не может реализоваться модель перехода к турбулентности Ландау-Хопфа). Далее – перемежаемость и бесконечная последовательность удвоений периода (известный сценарий эволюции развитой турбулентности Фейгенбаума /21/). Алгоритм каскадного процесса хаотизации по сценарию Фейгенбаума представлен отображением вида:

$$x_{n+1} = 4rx_n(1 - x_n),$$

при условии $0 \le x \le 1$ и $0 \le r \le 1$, где r – управляющий параметр.

Последовательность бифуркаций представлена графически зависимостью $x(r)$ на рис. 3.5 /22/. $X = 0$ является устойчивой неподвижной точкой. Иначе говоря, для достаточно малого значения параметра r итерации x_n сходятся к $x = 0$ независимо от начального условия x_0. При значениях параметра $0{,}6 \le r \le 0{,}75$ имеется одно устойчивое решение, т.е. динамический режим является стационарным (бифуркации отсутствуют), с периодом $T = 2^n = 1$ (число бифуркаций $n = 0$). Если управляющий параметр $r \ge 0{,}75$, то после переходного режима x осциллирует между двумя значениями. В этом случае, вместо устойчивого режима с периодом $T = 1$, соответствующего одной неподвижной точке, у системы имеется устойчивый цикл с периодом $T = 2$ (для номера бифуркации $n = 1$). При дальнейшем увеличении параметра происходит уже 2 бифуркации с 4 устойчивыми состояниями, т.е. периодом $T = 4$ и т.д.

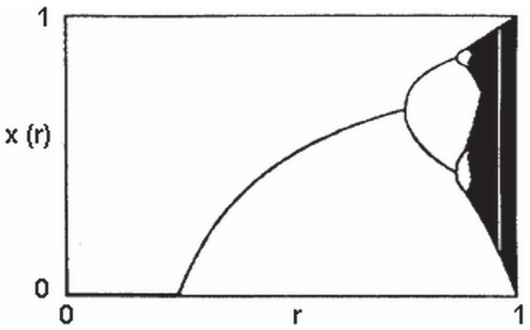


Рис. 3.5. Эволюция развитой турбулентности по сценарию Фейгенбаума: для достаточно малого значения параметра r итерации x_n сходятся к $x = 0$ независимо от начального условия x_0. При значениях параметра $0{,}6 \le r \le 0{,}75$ имеется одно устойчивое решение, т.е. динамический режим является стационарным (бифуркации отсутствуют). Если управляющий параметр $r \ge 0{,}75$, то после переходного режима x осциллирует между двумя значениями. При дальнейшем увеличении параметра происходит уже 2 бифуркации с 4 устойчивыми состояниями, т. е. периодом $T = 4$ и т.д.

Спектральные характеристики числа состояний для 2 бифуркаций и далее, при

значениях управляющего параметра $r_1 = 0{,}85$; $r_2 = 0{,}89$; $r_3 = 0{,}99$ и $r_4 = 0{,}9999$ приведены на рис. 3.6. Видно, что спектр числа состояний уже при значениях управляющего параметра $r = 0{,}9999$ близок к спектру шумоподобного процесса. Особенно наглядной становится картина хаотизации процесса по сценарию Фейгенбаума на языке корреляционной размерности (рис. 3.7). На этом рисунке представлена зависимость величины корреляционной размерности $d_r(n)$ от числа координат задаваемого фазового пространства при различных значениях параметра r. Очевидно, что по мере увеличения управляющего параметра r, плато на зависимости $d_r(n)$ размывается и стремится в пределе к виду характерному для пуассоновсого распределения или к идеальному «белому шуму».

О применимости хаотической динамики к описанию возникновения турбулентности теперь можно судить не только по характеру бифуркаций течения предшествующих возникновению беспорядка но,

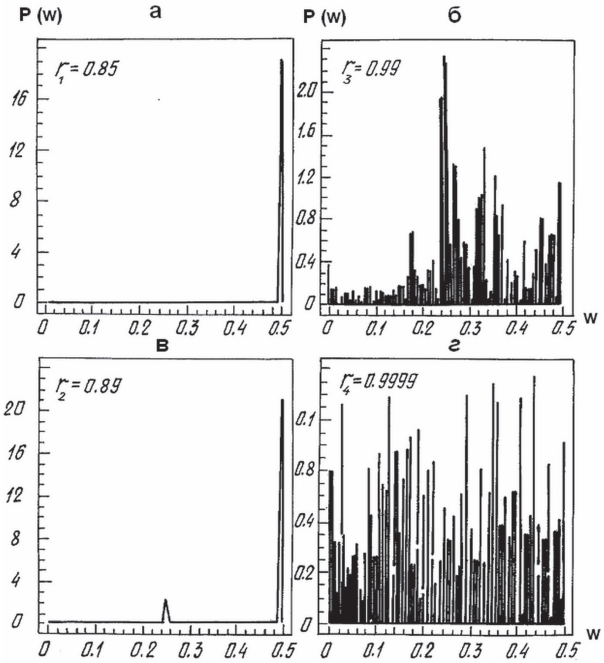


Рис. 3.6. Спектральные характеристики числа состояний при значениях управляющего параметра $r_1 = 0{,}85$; $r_2 = 0{,}89$; $r_3 = 0{,}99$ и $r_4 = 0{,}9999$. Спектр числа состояний уже при значениях управляющего параметра $r = 0{,}9999$ близок к спектру шумоподобного процесса

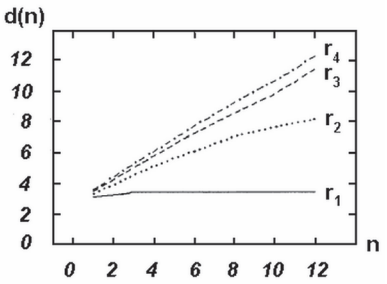


Рис. 3.7. Зависимость величины корреляционной размерности $d_r(n)$ от числа координат задаваемого фазового пространства n при различных значениях параметра r. По мере увеличения управляющего параметра r, плато на зависимости $d_r(n)$ размывается и стремится в пределе к виду характерному для пуассоновсого распределения или к идеальному «белому шуму»

кроме того, и потому, что непосредственно по наблюдаемым данным удается восстановить странный аттрактор за точкой перехода /18/! Эксперименты, убеждаемые в реализуемости для определенных видов течений сценариев перехода к хаосу, предсказываемых динамической теорией и, кроме того, прямое восстановление структуры аттракторов за критической точкой побудили исследователей попытаться определить на основе представлений динамического хаоса природу последующего развития турбулентности по мере увеличения надкритичности.

Высказанная еще Ландау и Хопфом идея о том, что с ростом числа Рейнольдса число степеней свободы течения вовлекаемых в турбулентное движение должно возрастать, была проверена в лаборатории. Если действительно реальное турбулентное течение описывается динамической системой, то число степеней свободы этой системы можно оценить, определив в эксперименте размерность, в частности, описанным выше методом Такенса и Грассбергера-Прокаччиа. Непосредственные измерения размерности турбулентного движения показали, что развитие турбулентности представляет собой постепенное вовлечение в турбулентное движение все новых и новых степеней свободы. Можно утверждать, делает далее вывод автор работы /18/, что размерность турбулентного движения коррелирует с числом структур (или мод) взаимодействующих друг с другом. И, наоборот, при конечной и низкой величине корреляционной размерности конечно и число мод, что соответствует детерминированной структуре (см. «окна порядка» на диаграмме Фейгенбаума рис. 3.5 /23/).

Резюме к главе 3

3.1 Предложена модификация процедуры СВАН-анализа с увеличенным отношением сигнал/шум благодаря использованию адаптивной фильтрации с нелинейным подавлением шумовой компоненты процесса.

3.2 На базе концепции о частично-детерминированных процессах указывается на принципиальную возможность прогноза поведения традиционно стохастических систем на интервале времени динамического их описания $\tau_{\text{corr}} < \tau < \tau_{\text{det}}$. Максимальное значение коэффициента взаимной корреляции измеряемой величины и ее модельного представления на указанном интервале времени определяется как эмпирическая вероятность прогноза измеряемой величины. Отмечается, что успешность прогноза в большей степени зависит от удачного выбора модели процесса.

3.3 Степень детерминированности исследуемого процесса предлагается определять для повышения надежности результатов, по меньшей мере, 3 методами: корреляционно-спектральными, статистическими (проверка статистических гипотез), и методами топологической динамики по оценке корреляционной (фрактальной) размерности.

Литература к главе 3

1. Дорман Л.И., Лузов А.А. Вариации космических лучей как совокупность причинных явлений и случайных процессов. // Космические лучи. М.: Наука. 1967. N8. С. 275-284.

2. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1972. Т.2. С. 47-54.

3. Дорман Л.И., Лузов А.А. Получение информации о параметрах вариаций космических лучей методами теории случайных процессов. // Космические лучи. М.: Наука. N8. 1967. С. 285-304.

4. Любарский А.Н. Методы исследования статистической и частотно-временной структур гелиогеофизических и гидрометеорологических характеристик. // Обзорная информция ВНИИ ГМИ МЦД. Сер. метеорология. Вып.5. Обнинск. 1980. С. 31.

5. Базилевская Г.А., Красоткин А.Ф., Охлопков В.П. и др. Поиски короткопериодических флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере. // Препринт N 166. М.: ФИАН. СССР. 1970. 20 с.

6. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука. 1965. 210 с.

7. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физ.мат.лит. 1962. 165 с.

8. Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф. и др. О спектрально временном анализе колебаний. // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. Вычислительная сейсмология. М.: Наука. 1973. Вып.6. С. 236.

9. Козлов В.И. О турбулентных пульсациях магнитного поля и космических лучей в ударных волнах. // Тезисы докладов VII Европейского симпозиума по космическим лучам. Ленинград. 1980. С. 23.

10. Кравцов Ю.А. Случайность и предсказуемость динамического хаоса. // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука. 1989. С. 276.

11. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука. 1987. С.232.

12. Kravtsov Yu.A., Etkin V.S. Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. // Harwood Acad. Publ. New York. 1984. Vol.3. P. 1411.

13. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow. // J. Atmos. Sci. 1963. Vol.20. N1. P. 130-141.

14. Айманова Г.К., Демченко Б.И., Макаренко Н.Г. Прикладные методы топологической динамики. 2. Численный анализ хаоса. // Препринт Астрофизического Института им. В.Г. Фесенкова N90-03. 1990. С. 52.

15. Takens F. Dynamical Systems and Turbulence. // Berlin a.o.: Springer. 1981. P. 3661.

16. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of Strange Attractors. // Phys. Lett. 1983. Vol.50. N5. P. 346-349.

17. Пригожин И.А. Познание сложного. М.: Мир. 1989. 321с.

18. Рабинович М.И. Нелинейная динамика и турбулентность. // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука. 1989. С. 50-60.

19. Ландау Л.Д. К проблеме турбулентности. // ДАН СССР. 1944. Т.44. N4. С. 339-342.

20. Hopf E.A. Mathematical Example Displaying the Features of Turbulence. // Commun. Pure Appl. Math. 1948. Vol.1. P.303-322.

21. Feigenbaum M.J. Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformation. // J. Stat. Phys. 1978. Vol.19. P. 25-39.

22. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Часть1, 2. М.: Мир. 1990.

23. Козлов В.И. Флуктуации космических лучей в межпланетном пространстве. // Автореферат докт. диссертации. Иркутск – Якутск. ИСЗФ- ИКФИА. 2000. 23 стр.

Глава 4. ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

4.1 Результаты спектрально-временного анализа.

Впервые, явно выраженные пучки частиц или коррелированные флуктуации были обнаружены в 1972 г. в известных августовских событиях /1/ (рис. 4.1). На рис. 4.2 представлены результаты корреляционного-спектрального анализа 5-мин данных нейтронного монитора б. Тикси за 3–5 августа 1972 г. По оси ординат отложен спектр мощности флуктуаций в относительных единицах рассчитанный по алгоритму P'_k с нелинейной фильтрацией шумовой составляющей процесса (см. п. 3.2). В верхней части

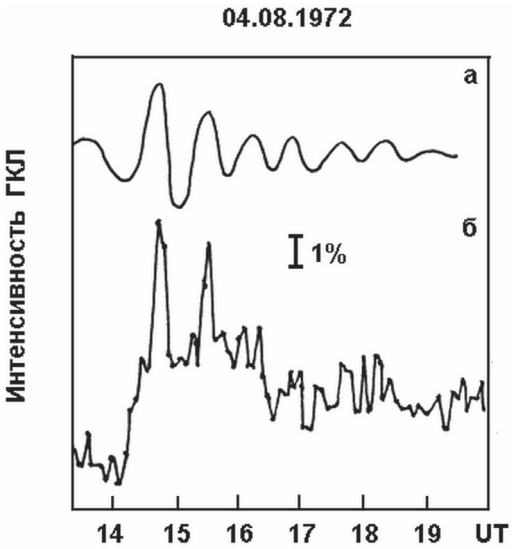


Рис. 4.1. Пример коррелированных флуктуаций во время вспышки 4 августа 1972 г. – (а). Исходные значения интенсивности галактических космических лучей по 5-минутным данным б. Тикси – (б). По оси абсцисс – мировое время в часах.

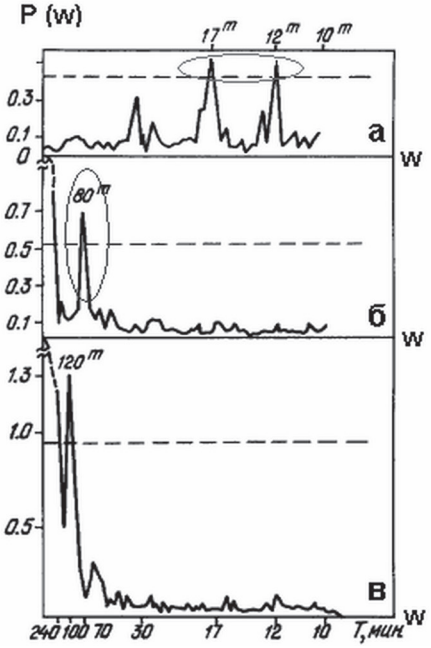


Рис. 4.2. Динамика спектра флуктуаций интенсивности галактических космических лучей в событии 3–5 августа 1972 г. по 5-мин. данным б. Тикси. По оси ординат – мощность спектра флуктуаций в относительных единицах. По оси абсцисс – периоды вариаций в минутах. В верхней части рисунка – спектр мощности за 3 августа 1972 г., т.е. в течение суток предшествующих эфф. Форбуша (а). Далее, спектр мощности флуктуаций непосредственно во время эфф. Форбуша от 4 августа (б). Внизу – спектр флуктуаций за 5 августа (в). Показан 90%-ный уровень значимости флуктуаций.

рисунка приведена шкала периодов флуктуаций. Пунктирной линией нанесен 99% доверительный уровень. Сверху вниз приведены спектры мощности за 3, 4 и 5 августа, соответственно. Динамика спектра высокочастотных флуктуаций ГКЛ наиболее выражена во время анизотропного предповышения интенсивности ГКЛ с 3 на 4 августа 1972 г. Если 03.08.72 г. в спектре мощности присутствуют значимые короткопериодические вариации с периодами 12–17 мин, то в возмущенный период 4–5 августа короткопериодические вариации практически отсутствуют. При этом, на предпонижении 4 августа регистрируется вариация с периодом $T \approx 80$ мин, а во время главной фазы эффектов Форбуша доминирует более низкочастотная вариация с периодом $T \geq 120$ мин. Результаты подобного анализа для 13 событий приведены на рис. 4.3 /2/. Динамика спектра мощности флуктуаций ГКЛ с увеличением числа анализируемых событий подтвердилась: она заключается в усилении высокочастотной части спектра флуктуаций космических лучей до эффекта Форбуша (рис. 4.3б) с последующим смещением максимума спектра в низкочастотную область в начале форбуш-понижения (рис. 4.3в). Флуктуаций ГКЛ в геомагнитно-спокойные периоды существенно не отличаются и находятся на уровне «шума» (рис. 4.3а).

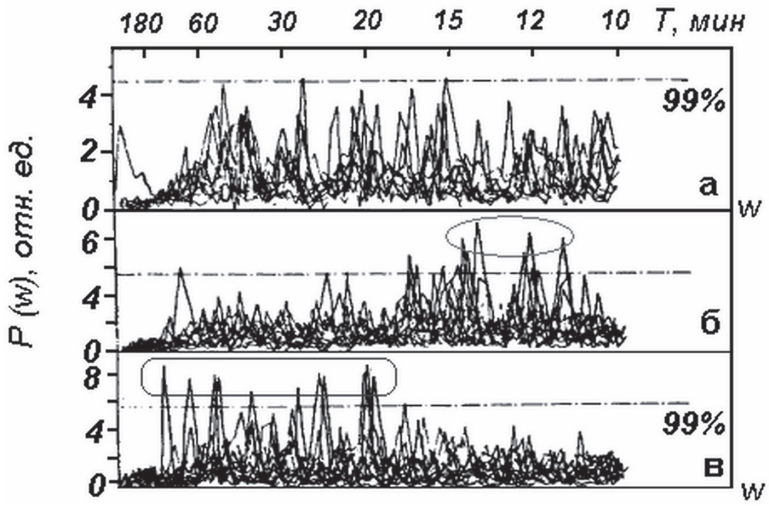


Рис. 4.3. Результаты анализа динамики спектра флуктуаций космических лучей методом наложения эпох для 13 событий эфф. Форбуша с амплитудой не менее 5%. В верхней части рисунка – спектры мощности в относительных единицах регистрируемые в геомагнитно-спокойные периоды (а). Ниже – спектры мощности в течение суток предшествующих эфф. Форбуша (б) и непосредственно во время эфф. Форбуша (в). Показан 90%-ный уровень значимости флуктуаций

Анализ электромагнитной обстановки 13 анализируемых событий, отнесенных к нестационарным возмущениям солнечного ветра, показывает, что форбуш-понижения в указанных событиях имеют сложный, обычно двухступенчатый профиль и, в большинстве случаев, сопровождаются значительным (десятки гамм) увеличением напряженности ММП, SSC, двойными скачками K_p-индекса и скорости солнечного ветра. Как показано в /3,4/ сложный, часто двухступенчатый профиль эффектов Форбуша может образоваться в результате прохождения поршневых ударных волн. Свойства взрывных волн отличаются от свойств волн взрывного происхождения. Главной особенностью поршневых волн является их двухфронтовая структура. На переднем фронте возмущения имеется область относительного сжатия среды и, соответственно, магнитного поля. В результате этого напряженность магнитного поля может значительно превысить те значения, которые она достигает в теле взрывных волн. Такое поведение магнитного поля приводит, в свою очередь, к следующим особенностям модуляции космических лучей.

На рис. 4.4 в произвольном масштабе показаны примеры поведения рассчитанной интенсивности космических лучей при прохождении поршневой ударной волны /3/. Верхняя кривая соответствует случаю сферической симметрии, а две нижние – относятся к ассиметрическому выбросу газа из Солнца. Изломы кривых соответствуют моментам прохождения фронтов ударной волны. В качестве единицы времени взято время прохождения переднего фронта. Возрастания интенсивности космических лучей,

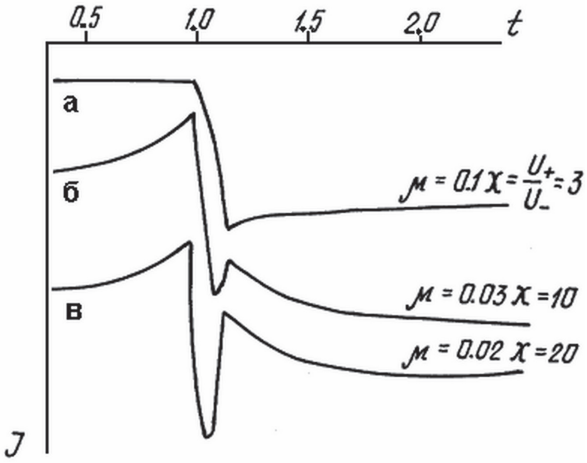


Рис. 4.4. Двухступенчатый профиль эфф. Форбуша образованный прохождением поршневой ударной волны. Верхняя кривая соответствует случаю сферической симметрии, две нижние – случаи ассиметричного выброса газа из Солнца. Изломы кривых соответствуют моментам прохождения фронтов ударной волны. В качестве единицы времени взято время прохождения переднего фронта. Понижение между фронтами связано с расширением вещества, которое хотя и мало, но эффективно благодаря малой величине коэффициента диффузии μ /3/

наблюдаемые на фронтах, связаны с «нагребанием» космических лучей к фронту. Понижение между фронтами связано с расширением вещества, которое хотя и мало, но эффективно благодаря малой величине коэффициента диффузии.

Сравнение модели с наблюдениями космических лучей в августе 1972 г. показывает (рис. 4.5 /4/), что расчетная кривая имеет более медленные возрастания в окрестности фронтов, нежели экспериментальная. Возможно, это объясняется тем обстоятельством, что коэффициент диффузии уменьшается перед ударными волнами. Вообще, в зависимости от поведения коэффициентов переноса, между фронтами может наблюдаться либо минимум интенсивности, либо плато. Иначе говоря, необходимо учитывать тонкую структуру фронта ударной волны /4/.

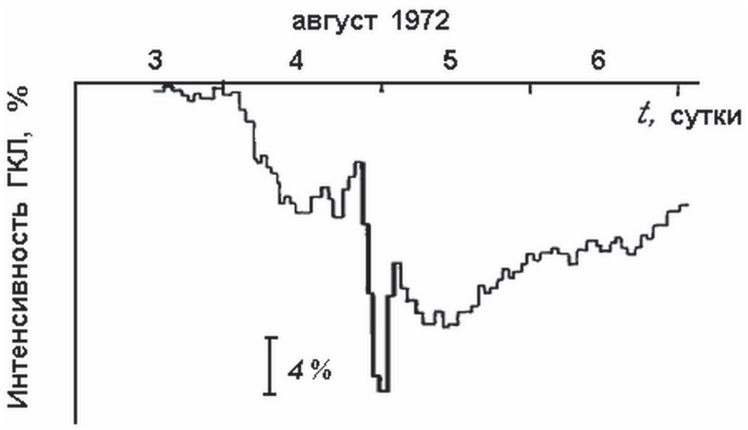


Рис. 4.5. Экспериментальные значения профиля интенсивности космических лучей непосредственно во время эфф. Форбуша 4–5 августа 1972 г. имеют более выраженный характер, нежели расчетные данные по модели. Это объясняется тем обстоятельством, что коэффициент диффузии значительно уменьшается перед ударными волнами /4/

Практическая реализация автоматизированной системы корпускулярной оперативной диагностики (АСКОД) в Полярной Геокосмофизической Обсерватории (ПГО) бухты Тикси позволила впервые провести радиационный мониторинг среды в режиме реального времени /5-9/. Результаты спектрально-временного анализа (СВАН-анализа) флуктуаций ГКЛ в виде СВАН – карты для события 26–27 апреля 1984 г. показаны на рис. 4.6. Сваграмма рассчитывалась по пятиминутным данным нейтронного монитора б. Тикси за период 20–27 апреля 1984 г. с шагом 6 ч по шкале времени. В левой части сваграммы даны: год, день и час конца текущих суток, затем частотный спектр в

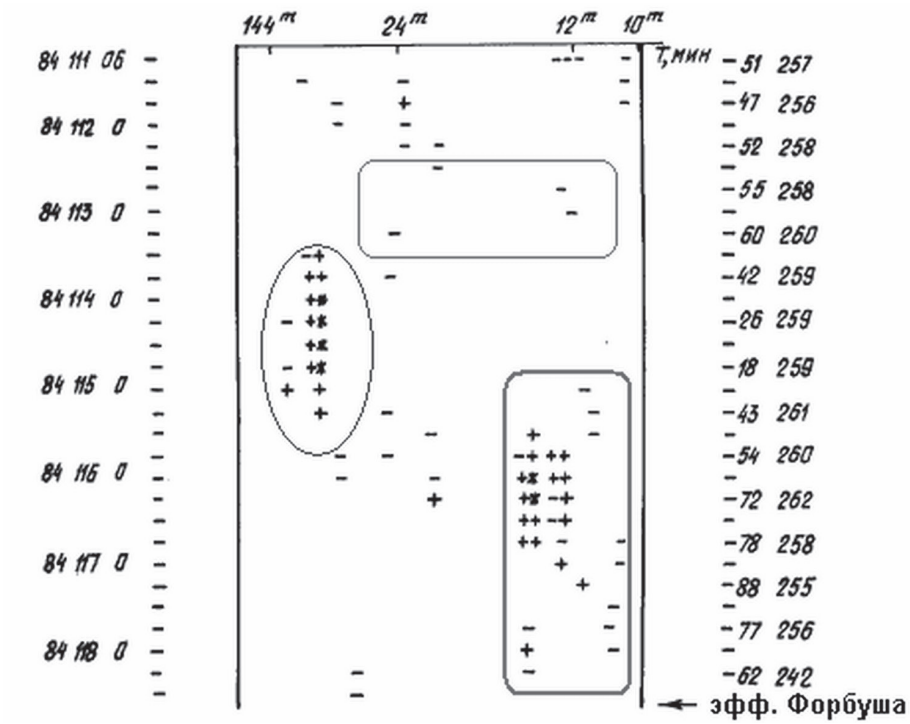


Рис. 4.6. Спектрально-временной экспресс-анализ 5-мин. значений интенсивности космических лучей в апреле 1984 г. со сдвигом длины реализации по шкале времени на интервал 6 час. По оси ординат – шкала времени (год – день года – час). По оси абсцисс – шкала периодов вариаций в минутах. В правой части рисунка приведены среднесуточные значения индекса мерцаний и интенсивности космических лучей. Стрелкой, в нижней правой части рисунка отмечен момент начала эффекта Форбуша 26 апреля 1984 г. Амплитуда флуктуаций представлена символически: большей амплитуде соответствует большая степень почернения

виде строки символов значимости амплитуд. Наличие пробела указывает на отсутствие амплитуд с уровнем значимости, превышающим 90%. Знак минус отражает наличие амплитуд в интервале значимостей 90% < P < 95%, плюс – в интервале 95% < P < 99%. Звездочка соответствует уровню значимости P > 99%. Процедура шумоподавления, как и следовало ожидать, существенно снижает уровень помех. Благодаря этому, сигнал с 21 на 22 апреля (на графике, с 112-го на 113 день) выделен на уровне значимости 90% < А < 95% (символ «-») и, главное, на чистом от помех фоне. Во время второго усиления высокочастотных флуктуаций с 25 на 26 апреля (со 116-го на 117 день), сигнал проявляется на больших (99%) уровнях значимости и динамика более выражена.

В дальнейшем, данные прямых измерений параметров солнечного ветра подтвердили факт прохождения 21–27 апреля орбиты Земли крупномасштабного возмущения. Так с 21 на 22 апреля было зарегистрировано увеличение скорости солнечного ветра до 500-600 км/с. С 24 на 25 апреля наблюдалось радиоизлучение II типа и SSC. С 25 на 26 апреля модуль ММП достигал 20–25 нТл, а южная компонента $B_z \approx 10$ нТл. 26 апреля также было зарегистрировано радиоизлучение II и IV типов /10/.

Известно, что метод корреляционного приема сигналов от пары разнесенных станций позволяет существенно уменьшить уровень помех. Это подтверждается расчетами /8/. Для иллюстрации этого, на рис 4.7 приведены результаты взаимного спектрального анализа коррелированных флуктуаций по данным нейтронных мониторов Тикси и Апатиты (во время эффектов Форбуша 13–15 июля 1982 г.). По оси ординат отложена взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды вариаций в минутах. Указан 99% – ный уровень значимости. На рис.4.8 приведена суммарная картина для 5 форбуш-понижений: 9-13 июля, 19–25 ноября, 6–7 декабря, 9-10 декабря и 15–17 декабря 1982 г. /9/. Было проведено наложение кросс-спектров отдельно за те сутки, когда были зарегистрированы флуктуации интенсивности ГКЛ до эффектов Форбуша (рис. 4.8а) и во время форбуш-понижений (рис. 4.8б).

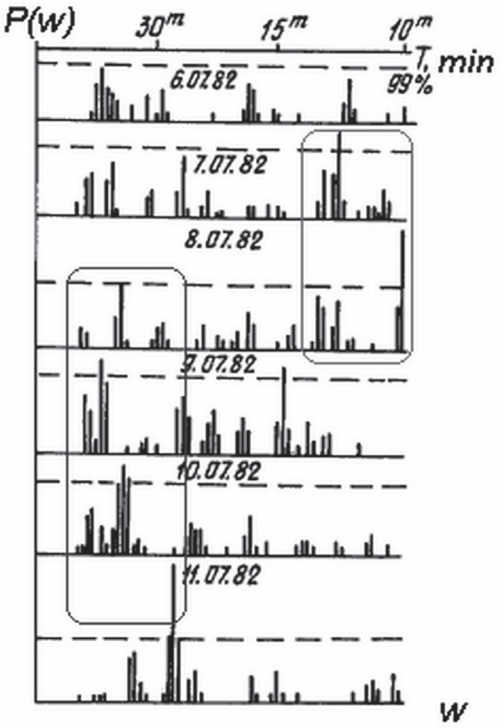


Рис. 4.7. Результаты кросс-спектрального анализа коррелированных флуктуаций по 5-мин данным нейтронных мониторов б. Тикси и ст. Апатиты во время эфф.Форбуша 13–15 июля 1982 г. По оси ординат отложена взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды вариаций в минутах. Указан 99%-ный уровень значимости

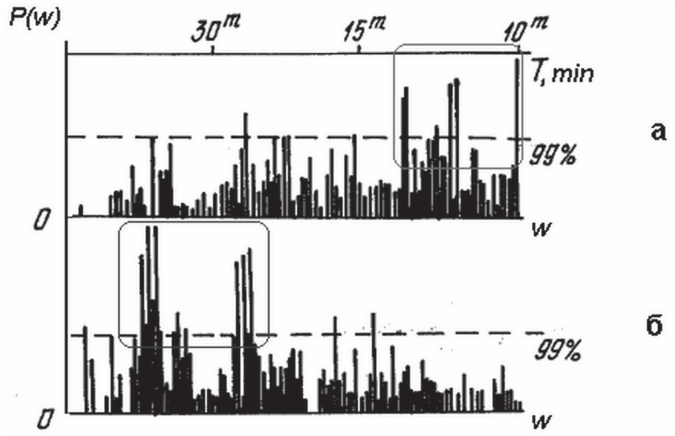


Рис. 4.8. Динамика кросс-спектров отдельно за те сутки, когда были зарегистрированы флуктуации интенсивности ГКЛ в течение суток до начала эфф. Форбуша (а) и кросс-спектры во время форбуш-понижений. По оси ординат – взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды вариаций в минутах. Указан 99%-ный уровень значимости флуктуаций

4.2. Возможные источники наблюдаемой динамики.

Для решения вопроса о происхождении коррелированных флуктуаций ГКЛ наблюдаемых во время эфектов Форбуша представляет интерес исследование широтной (или энергетической) зависимости амплитуд пульсаций ГКЛ. На рис. 4.9а приведен спектр мощности флуктуаций космических лучей с 1-15.08.72 г. расчитанный по кросс-корреляционной функции часовых данных нейтронных мониторов б. Тикси и ст. Иркутск. Видно, что в спектре мощности доминирует гигантская пульсация интенсивности ГКЛ с периодом T≈7ч наблюдаемая с 4 на 5 августа. Взаимный спектр мощности флуктуаций по данным этих же станций за период с 6-15 августа показан на рис. 4.9b. В данном случае исключен возмущенный период 4-5 августа 1972 г. Семичасовая пульсация во взаимном спектре за 6-15 августа отсутствует. Частотный спектр имеет вид характерный для геомагнитно-спокойных периодов.

То, что семичасовая осцилляция изотропна по долготе, следует из результатов взаимного корреляционно-спектрального анализа часовых данных полярных станций Алерт-Тикси и среднеширотных станций Шварцморе-Якутск за 3-5 августа 1972 г. /11,12/. Как видно на рис. 4.10, значимый максимум во взаимном спектре мощности приходится на вариацию с периодом T≈7час. Достоверность наличия семичасовой осцилляции подтверждена нами независимым расчетом, проведенным методом теории цепных дробей /13/.

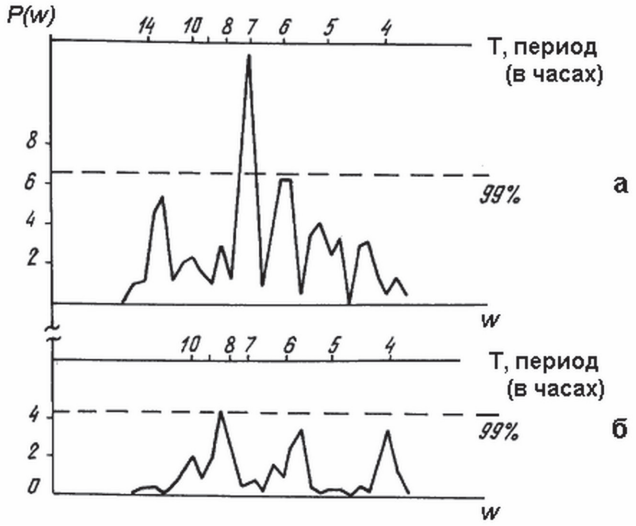


Рис. 4.9. Спектр мощности флуктуаций космических лучей с 1–15.08.72 г. рассчитанный по кросс-корреляционной функции часовых данных нейтронных мониторов б. Тикси и ст. Иркутск. В спектре мощности доминирует гигантская пульсация интенсивности ГКЛ с периодом $T \approx 7$ ч наблюдаемая с 4 на 5 августа. По оси ординат – взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды вариаций в часах. Указан 99%-ный уровень значимости флуктуаций

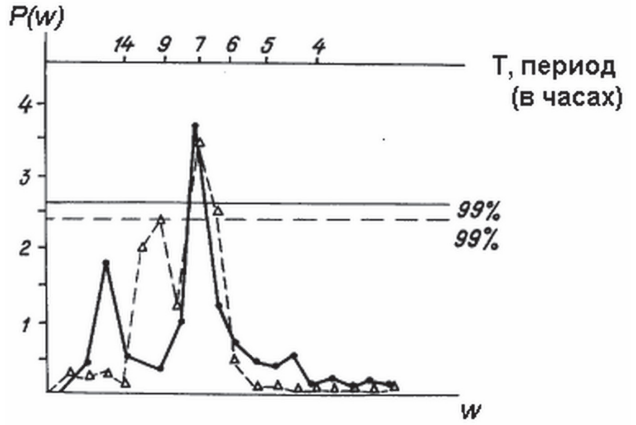


Рис. 4.10. Результаты взаимного корреляционно-спектрального анализа часовых данных полярных станций Алерт – Тикси и средне-широтных станций Швартцморе – Якутск за 3–5 августа 1972 г. Значимый максимум во взаимном спектре мощности приходится на вариацию с периодом $T \approx 7$ ч. По оси ординат – взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды вариаций в часах. Указан 99%-ный уровень значимости флуктуаций

Изучение зависимости амплитуды семичасовой вариации от энергии проводится ниже по часовым значениям тиксинского и якутского наземного и подземного комплексов. На рис. 4.11 в логарифмическом масштабе показана зависимость амплитуды семичасовой вариации от энергии. Верхняя точка нанесена по данным измерений интенсивности ГКЛ б. Тикси с учетом атмосферного обрезания, соответствующего энергии $\varepsilon \sim 1$ ГэВ. Следующая точка – по часовым данным нейтронного монитора ст. Якутск. Далее, точки соответствующие 0 и 7 м в.э. якутского подземного комплекса. Как видно из рисунка, амплитуда семичасовой пульсации с ростом энергии уменьшается по закону $A(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-1}$.

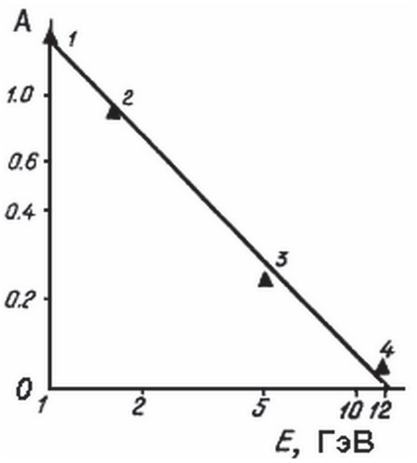


Рис. 4.11. Зависимость (в логарифмическом масштабе) амплитуды семичасовой вариации от энергии. Верхняя точка нанесена по данным измерений интенсивности космических лучей б. Тикси с учетом атмосферного обрезания, соответствующего энергии $\varepsilon \sim 1$ ГэВ. Следующая точка – по часовым данным нейтронного монитора ст. Якутск. Далее, точки соответствующие 0 и 7 м в.э. якутского подземного комплекса

В июле 1982 г. по данным измерений б. Тикси были обнаружены аналогичные гигантские пульсации интенсивности ГКЛ с периодом $T \approx 10$ ч (рис. 4.12). Пульсации с близким периодом были выявлены в этом событии по данным якутского наземного и подземного комплекса /14/. При этом, амплитуда пульсаций также уменьшалась с ростом энергии. Изучение широтной (энергетической) зависимости пульсаций ГКЛ показало, что амплитуды гигантских пульсаций увеличиваются с ростом широты (или уменьшением энергии). Если бы пульсации ГКЛ были обусловлены изменениями геомагнитного порога, то в этом случае амплитуда пульсаций должна уменьшаться с ростом широты (уменьшением энергии), что противоречит полученной зависимости (рис. 4.11). Кроме того, незначительность влияния изменения геомагнитного порога для б. Тикси и ст. Алерт, где амплитуда пульсаций максимальна, исключают магнитосферный вклад в наблюдаемые квазипериодические вариации интенсивности ГКЛ. То, что флуктуации барометрического давления не могут быть ответственны за пульсации интенсивности ГКЛ указывалось ранее в /15/. На это указывают и результаты расчетов кросс-спектрального анализа вариаций интенсивности ГКЛ и атмосферного давления для 10 часовой пульсации в событии 13-15 июля 1982 г. (рис. 4.13).

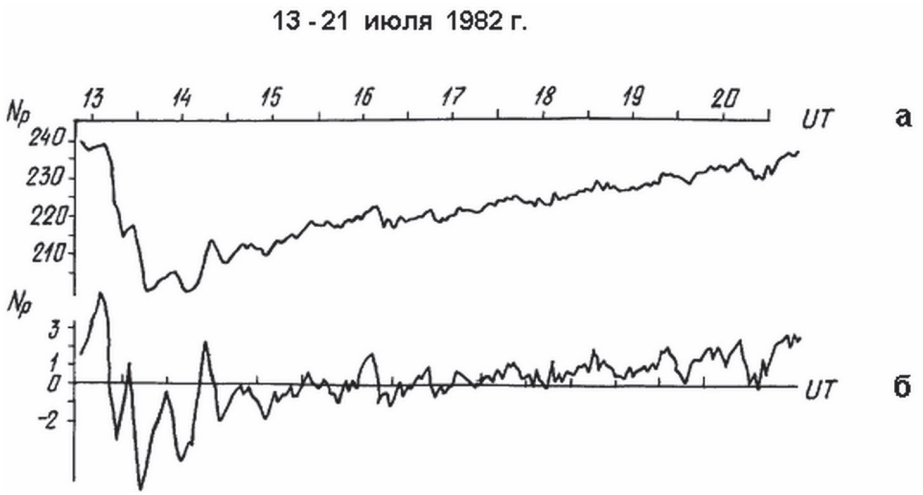


Рис. 4.12. Гигантские пульсации интенсивности космических лучей с периодом $T \approx 10$ час. по данным якутского подземного (a) и наземного (b) комплекса в событии 13–14 июля 1982 г. /14/. С уменьшением энергии измеряемых частиц, амплитуда пульсаций увеличивается

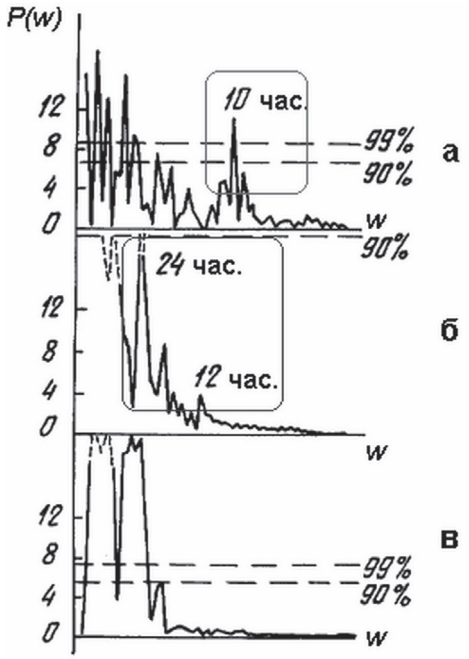


Рис. 4.13. Результаты кросс-спектрального анализа вариаций интенсивности космических лучей и атмосферного давления для 10 часовой пульсации в событии 13–15 июля 1982 г.

4.3. Совместный анализ флуктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля.

Ниже, приведены результаты взаимного корреляционно-спектрального анализа флуктуаций интенсивности космических лучей по данным измерений б. Тикси и магнитного поля по результатам прямых измерений на Explorer-33 /16/ во время регистрации межпланетной ударной волны 18 декабря 1978 г. сопровождавшейся понижением интенсивности ГКЛ. Анализировались исправленные на давление 5-мин данные нейтронного монитора б. Тикси. На рис. 4.14 пунктиром показаны временные профили интенсивности космических лучей (шкала справа) и магнитного поля (шкала слева) за 18-19 декабря 1978 г. Уже из временных зависимостей исследуемых кривых видны явно выраженные пульсации напряженности магнитного поля. Это указывает на магнитозвуковой характер колебаний в окрестности фронта ударной волны, обнаруженных сначала по флуктуациям космических лучей /2, 11, 17/. Это подтверждается результатами совместного корреляционно-спектрального анализа данных космических лучей и межпланетного магнитного поля (рис. 4.15).

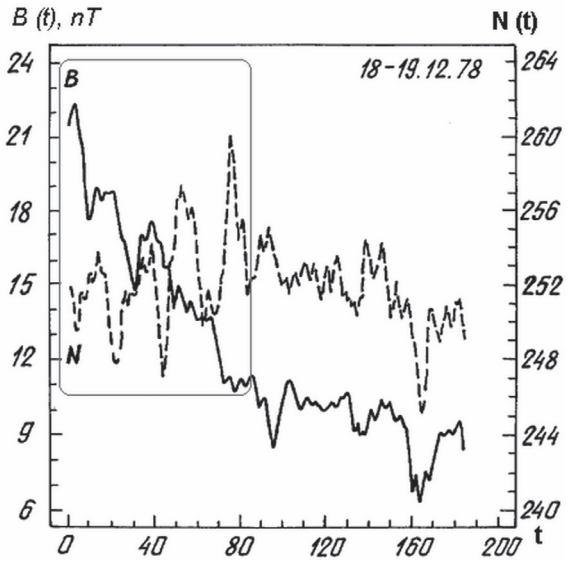


Рис. 4.14. Временные профили интенсивности космических лучей (пунктирная кривая, шкала справа) и магнитного поля (сплошная кривая, шкала слева) за 18–19 декабря 1978 г. Явно выраженные пульсации регистрируются в обоих параметрах. По оси абсцисс – относительная шкала времени в минутах

На рис. 4.16 представлены результаты спектрально-временного анализа (СВАН) флуктуаций интенсивности ГКЛ и напряженности межпланетного магнитного поля на примере события 8-10 июня 1968 г. По оси абсцисс показаны периоды флуктуаций в минутах, по оси ординат – время. Относительные амплитуды флуктуаций выводятся на печать в виде СВАН-карт и определяются плотностью поля СВАН-карты, в данном случае – плотностью штриховки. Максимальная степень почернения соответствует 99% доверительному уровню. Стрелки на оси

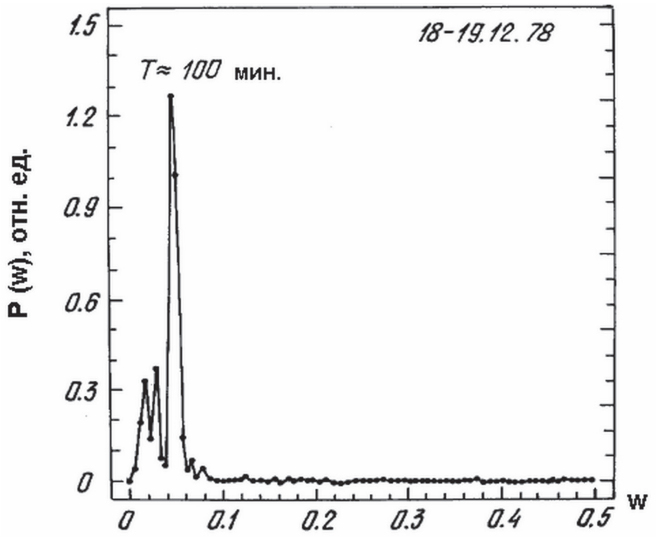


Рис. 4.15. Результаты совместного корреляционно-спектрального анализа флуктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля в событии 18-19 декабря 1978 г. По оси ординат – кросс-спектр мощности в относительных единицах, по оси абсцисс – частота флуктуаций. Общей, для обоих анализируемых параметров является явно выраженная пульсация с периодом ~100 мин.

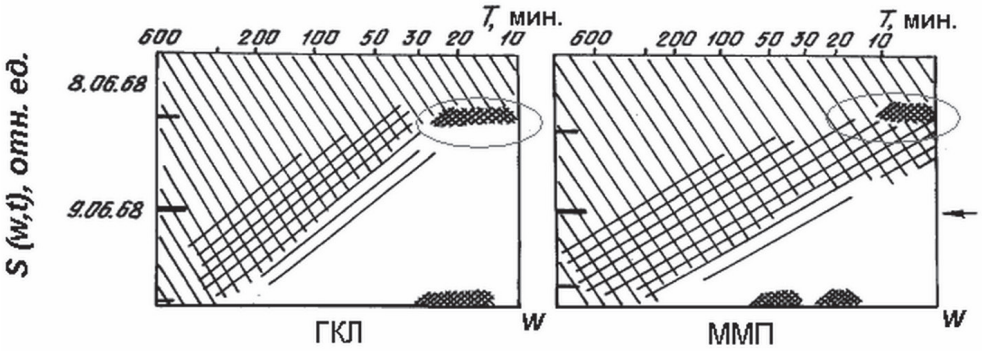


Рис. 4.16. Результаты спектрально-временного анализа (СВАН) флуктуаций интенсивности космических лучей и напряженности межпланетного магнитного поля в событии 8–10 июня 1968 г. По оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды флуктуаций в минутах, по оси ординат – время. Относительные амплитуды флуктуаций выводятся на печать в виде СВАН-карт и определяются плотностью поля СВАН-карты, в данном случае – плотностью штриховки. Максимальная степень почернения соответствует 99% доверительному уровню. Стрелки на оси времени, в правой части рисунка, указывают момент начала форбуш-понижения

времени, в правой части рисунка, указывают момент начала форбуш-понижения. Динамика спектра флуктуаций космических лучей дана в *левой* части рисунка. В середине 8 июня 1968 г. наблюдаются мерцания интенсивности ГКЛ в интервале 10–20 мин. Мерцания регистрируются до начала эффекта Форбуша отмеченного стрелкой в начале 9 июня. Высокочастотная часть флуктуаций ГКЛ максимальная перед форбуш-понижением, практически отсутствует в конце 8 и начале 9 июня, т.е. непосредственно во время эффектов Форбуша. Восстановление высокочастотной области спектра происходит через сутки, в середине 9 июня. Причем, присходит не только восстановление, но и усиление высокочастотных флуктуаций. Подобное усиление типично для приближающегося фронта межпланетного возмущения. Действительно, в данном событии наблюдалось двухступенчатое форбуш-понижение: первое – в начале 9 июня, второе – в конце 10 июня. Оба всплеска, в середине суток 8 и 9 июня предшествуют понижениям интенсивности ГКЛ 9 и 10 июня.

Полученные выше результаты подтверждается прямыми измерениями магнитного поля на космических аппаратах. На рис. 4.16 справа, представлена СВАН-карта спектра флуктуаций напряженности межпланетного магнитного поля (ММП). Усиление высокочастотной (5-10 мин) части спектра флуктуаций магнитного поля приходится также на середину суток 8 и 9 июня 1968 г. Область регуляризации магнитного поля, или «каверна» в спектре магнитных неоднородностей, обнаруживается также как и в интенсивности ГКЛ за ударной волной, на стадии понижения интенсивности ГКЛ. Наличие динамики и в спектре флуктуаций космических лучей и в спектре магнитных флуктуаций указывает на связь динамики спектра мерцаний космических лучей с динамикой спектра колебаний напряженности межпланетного магнитного поля, т.е. магнитозвуковых колебаний /17/.

Установленная ранее в /18/ связь энергии случайного магнитного поля с отношением поперечного коэффициента диффузии к продольному коэффициенту позволяет провести анализ степени неоднородности магнитного поля в возмущенный период из наблюдаемой динамики частотных спектров флуктуаций ГКЛ и ММП. Увеличение мощности высокочастотных колебаний напряженности межпланетного магнитного поля в окрестности фронта ударной волны соответствует усилению энергии турбулентного магнитного поля. Это согласуется с выводом о сжатии вещества и поля на ведущем фронте поршневой волны /3/.

Наблюдаемое за ударной волной, на стадии понижения интенсивности ГКЛ, смещение максимума частотного спектра флуктуаций в низкочастотную область спектра, т.е. уменьшение энергии турбулентного

магнитного поля, означает практически отсутствие мелкомасштабных ($\sim 10^{10}$ см) магнитных неоднородностей за поршневыми ударными волнами («каверна»). Эти результаты и позволили сделать вывод об «увеличении масштаба турбулентности» /19/ или регулярности магнитного поля в области «следа» за ударной волной /20/, см. также /21/.

Корреляционно-спектральный анализ 30-сек. данных магнитного поля до и после прохождения фронтов 16 межпланетных ударных волн был проведен в /22/. Частотные спектры вычислялись по 8-часовым интервалам как с той, так и с другой стороны фронта. Эти данные дают удовлетворительное частотное разрешение и достаточны для получения статистически значимых выводов. Подобным образом были получены спектры мощности флуктуаций поля в диапазоне 4×10^{-4}-$1{,}6\times10^{-2}$ Гц ($1^m < T < 1^h$). Спектры представлены законом f^{α}. Анализ показателя наклона спектра α в областях до и после фронта ударных волн привел авторов /22/ к выводу о том, что для y и z – компонент, а также напряженности ММП показатель α за фронтом увеличивается в 60–40% случаев и уменьшается меньше, чем в 10% случаев. Следовательно, за фронтами возмущений максимальны амплитуды вариаций с большими периодами.

Это согласуется как с нашим выводом об увеличении масштаба турбулентности за ударной волной (эффект недовосстановления спектра мелкомасштабных неоднородностей), так и с аналогичным выводом американских исследователей /23/ об обнаружении за турбулентной оболочкой («sheath») ударной волны магнитного облака («magnetic cloud») с регулярным полем. Аналогичный «след» был обнаружен по укручению показателя частотного спектра радиомерцаний на флуктуациях электронной плотности n_e /24/. Как отмечают далее авторы /24/, спектр турбулентности остается более крутым по сравнению с невозмущенными условиями еще некоторое время после прохождения фронта. По нашим данным, время «жизни» подобного «следа» в спектре мелкомасштабных магнитных неоднородностей $t \leq 1$сут. В ряде исследований по анализу связи структуры понижений интенсивности ГКЛ со структурой магнитного облака отмечается относительная регулярность магнитного поля за турбулентной оболочкой ударных волн /25,26/. При этом подчеркивается, что турбулентная оболочка ответственна за начало форбуш-понижения, а магнитное облако с регулярным полем – за главную фазу эффекта Форбуша.

4.4. Структура ударных волн и распространение солнечных космических лучей.

На основе анализа временных зависимостей интенсивности протонов во вспышках СКЛ можно судить о свойствах межпланетного поля

и магнитных неоднородностях, рассеивающих космические лучи. Так как энергетический спектр СКЛ существенно мягче спектра ГКЛ, то для анализа тонкой структуры крупномасштабных возмущений солнечного ветра целесообразно воспользоваться анализом распространения вспышек СКЛ. В этом случае, вспышки солнечных частиц используются как своеобразные «зонды» состояния межпланетной среды. Анализировались пятиминутные данные нейтронного супермонитора ст. Дип-Ривер во время регистрации вспышек СКЛ за период 1960-1972 гг.

Применение диффузионного приближения к 9 вспышкам космических лучей показало, что результаты можно представить в виде двух групп данных /27/. Вспышки 28.01.67, 18.11.68, 25.02.69, 24.01.71 и 01.09.71 (I группа) – достаточно хорошо описываются диффузионными кривыми. Примеры применения модели анизотропной диффузии к вспышкам первой группы 12.11.60 (первый максимум) и 25.02.69 показаны на рис. 4.17а. Напротив, вспышки 12.11.60 (2 максимум), 15.11 60, 18.07.61, и 04.08.72 (II группа) – плохо описываются диффузионными кривыми (рис. 4.17b). Видно, что экспериментальные значения интенсивности космических лучей во вспышках II группы по сравнению со вспышками I группы неудовлетворительно описываются диффузионными кривыми.

Дальнейший анализ заключался в нахождении спектров мощности флуктуаций космических лучей для всех 9 вспышек. Результаты расчетов представлены на рис. 4.18 откуда следует, что частотные спектры флуктуаций во вспышках разделились также на два класса. Спектры I класса (рис 4.18а) характеризуются широким диапазоном частот незначительных амплитуд, а спектры II класса (рис. 4.18б) напротив, неравномерным распределением по частоте. Так, во время вспышки 12.11.60 г. наблюдаются вариации с периодами $T \approx$ 100 и 35 мин, 15.11.60 г.– $T \approx$ 55 мин, 4.08.72 г.– $T \approx$ 70-80 мин. Осцилляторный характер структуры возмущения в событии 4–5 августа 1972 г. подтверждается и результатами анализа токов космических лучей (рис. 4.19 /28/).

Характерно, что вспышки обладающие спектрами II класса (наличие выделенных частот) плохо описываются в диффузионном приближении. И наоборот, вспышки, характеризующиеся широким диапазоном частот, описываются диффузионными кривыми достаточно хорошо. Вышеизложенное позволяет заключить, что искажение диффузионного хода вспышек второй группы обусловлено наличием квазипериодических колебаний интенсивности СКЛ. Эти вспышки произошли во время мощных форбуш-понижений интенсивности ГКЛ, сопровождающихся ударными волнами и магнитными бурями. Это дает основания утверждать, что наблюдаемые пульсации обусловлены осцилляторной

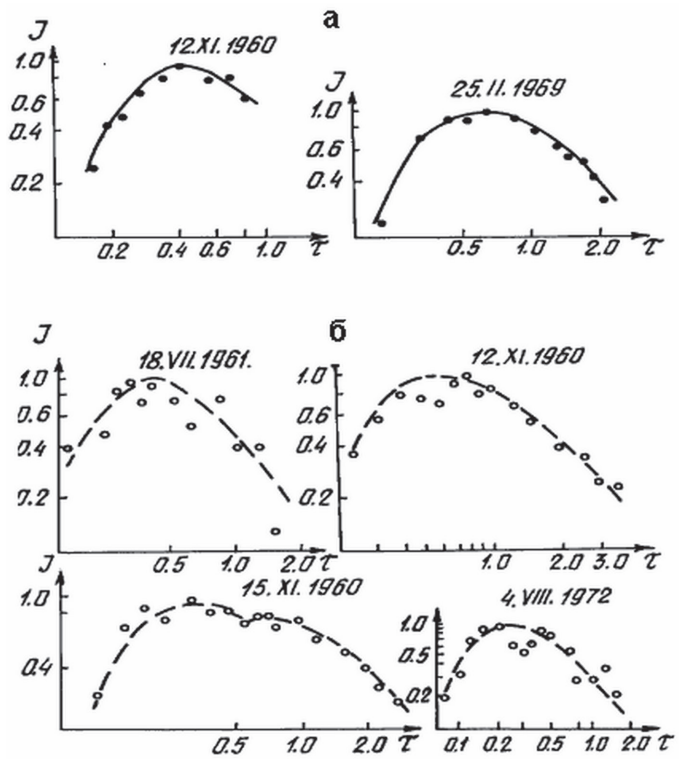


Рис. 4.17. Пример удовлетворительного описания моделью анизотропной диффузии вспышек первой группы 12.11.60 (первый максимум) и 25.02.69, показан в верхней части рисунка (а). Результат неудовлетворительного описания (б) той же моделью анизотропной диффузии вспышек второй группы: 12.11.60 (2 максимум), 15.11 60, 18.07.61, и 04.08.72

структурой межпланетных ударных волн. Напротив, вспышки I группы наблюдались в геомагнитно-спокойных условиях, по крайней мере, за 2–3 сут до или после SSC. Таким образом, недиффузионный характер распространения СКЛ вспышек II группы обусловлен как макро-, так и тонкой структурой межпланетных ударных волн.

Отличительной особенностью спектров вспышек второй группы является практически отсутствие высокочастотной части спектра, которая полностью восстанавливается за характерное время $\tau \geq 1$ сут после прохождения ударной волны. Эти данные также указывают на существование следа с регулярным полем за ударной волной. Верхняя оценка размера области следа при средней скорости солнечного ветра 600 км/с дает величину порядка ~1 а.е. В этих случаях следует ожидать увеличения анизотропии СКЛ. Это означает, что в случае вспышек СКЛ,

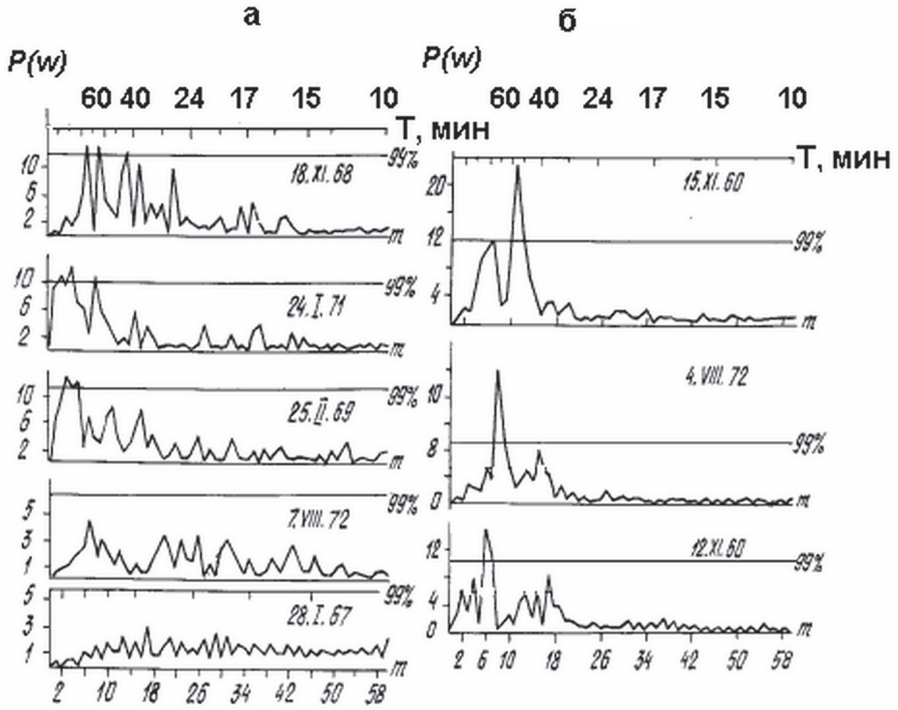


Рис. 4.18. Результаты расчетов спектров мощности вспышек I класса (а) и II класса (б). Спектры I класса, характеризуются широким диапазоном частот незначительных амплитуд. Для спектров II класса, напротив, характерно – неравномерное распределение по частоте: во время вспышки 12.11.60 г. наблюдаются вариации с периодами T ≈ 100 и 35 мин, 15.11.60 г. – T ≈ 55 мин, 4.08.72 г. – T ≈ 70–80 мин

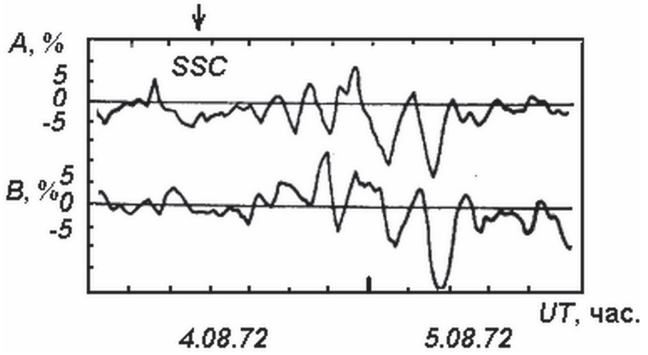


Рис. 4.19. Осцилляторный характер структуры возмущения в событии 4–5 августа 1972 г. по результатам анализа поведения компонент тока (A и B) космических лучей в это время /28/

когда фронт ударной волны уже прошел Землю, но Земля продолжает еще находиться в следе за фронтом, время достижения максимумов интенсивности СКЛ должно быть мало.

Это и наблюдается для вспышек 04.05.60, 20.07.61 и 18.11.68 гг. Во время вспышки 04.05.60 г. отсутствовали рассеивающие центры для частиц. Это следует как из анизотропии потока в максимуме и на спаде вспышки, так и из очень быстрого достижения максимума вспышки (≈7 мин) по сравнению с ранее наблюдаемыми вспышками /29/. Отличительными особенностями возрастания вспышки 04.05.60 г., отмечается в /29/, является малая продолжительность (≈1 час) явления и резкая анизотропия потока частиц. Это показывает, что в окрестности Земли частицы почти не подвергались рассеиванию. Сдвиг направления максимальной интенсивности на 55±5° к западу от Солнца показывает, что между Солнцем и Землей имелось в этот момент регулярное спиральное магнитное поле. Вывод о регулярном магнитном поле за ударной волной подтверждается как анизотропным характером возрастаний интенсивности СКЛ, так и необычным для солнечных частиц жестким энергетическим спектром во время вспышек 15.11.60 г. и 18.07.61 г. произошедших на фазе минимума и восстановления форбуш-понижения /29/.

Анизотропный характер возрастания СКЛ регистрируемых за ударными волнами подтверждается и данными наблюдений вспышек СКЛ от 24.09.77 и 07.05.78 гг. Обе вспышки зарегистрированы на стадии восстановления интенсивности ГКЛ после эффекта Форбуша. В работе /30/ отмечается быстрое нарастание и резкий спад интенсивности солнечных частиц для вспышки 24.09.77 г. Возрастание интенсивности для вспышки 07.05.78 г. достигло максимума менее чем за 20 мин. Спад интенсивности также был очень быстрым, а все возрастание длилось не более 3 час. Оценка величины транспортного пробега для рассеяния дает величину $\lambda \approx 0.15$ а.е., что предполагает высокую степень анизотропии /31/. Анизотропный характер возрастаний интенсивности СКЛ и необычный для солнечных частиц относительно жесткий энергетический спектр во вспышках произошедших в минимуме и на стадии восстановления эффекта Форбуша объясняется следующим образом. Из зависимости транспортного пробега от энергии (или от ларморовского радиуса) в отсутствии и при наличии регулярного поля следует, что коэффициент диффузии поперек регулярного поля остается малым до более высоких энергий, чем при изотропной диффузии. Поэтому модуляция космических лучей, полем имеющим регулярную составляющую, должна иметь более жесткий энергетический спектр по сравнению с изотропным случаем, в соответствии с выводом работы /32/.

Перераспределение и захват СКЛ ловушкой на макро- и тонкой структуре поршневой ударной волны /33/ и, напротив, быстрое распространение СКЛ в регулярном магнитном поле за ударной волной является важным для целей прогноза солнечно-протонных событий. Это дополняет прогноз, когда существующие методы прогноза “не работают” /34/. В случае недиффузионного распространения, утверждается в /34/, точность прогнозируемых значений интенсивности не улучшается при увеличении числа измерений. В работе /35/, указывается на сильное влияние межпланетных ударных волн на характеристики потоков протонов в окрестности Земли. Для объяснения наблюдений, в работе обсуждается возможный эффект транспортировки солнечных протонов фронтами ударных волн. Это подтверждается и данными прямых измерений солнечных протонов на космических аппратах /25,26/.

4.5 О механизме образования макро- и тонкой структуры эффектов Форбуша.

Если через межпланетную среду проходит ударная волна, то разогрев среды приведет к увеличению скорости звука и к значительному сжатию магнитного поля звуковыми волнами $\alpha \approx 1$ /36, 37/. Сжатие магнитного поля звуковыми волнами приведет, к увеличению амплитуды вариаций интенсивности ГКЛ. В поршневых волнах относительное сжатие вещества и поля между фронтами превышает те значения, которые она достигает в теле взрывных волн /38-40/. Как показывают расчеты /38-40/, магнитное поле между фронтами значительно усиливается. Поэтому можно говорить о «магнитной пробке» в теле ударной волны распространяющейся вместе с ударной волной по невозмущенному солнечному ветру с магнитным полем B_0. Пробочное отношение $\eta = B_{max}/B_0$ вследствие указанного усиления может быть больше, чем его предельное значение, достигаемое для простых ударных волн /38/: $\eta \geq \eta_{\max} = \gamma + 1/\gamma - 1$. Как оценки, так и наблюдения показывают, что пробочное отношение может достигать значения $\eta \approx 10$. Такие пробки способны эффективно отражать заряженные частицы, с последующей коллимацией в ММП отражаемых частиц – механизм появления пучков частиц космических лучей. Если считать, что пробка уже сформировалась и магнитное поле является регулярным, то накопление частиц в районе пробки приведет к резкой анизотропии давления. В самом деле, пробка будет действовать как решето: удерживать частицы с большими питч-углами и, напротив, пропускать частицы космических лучей имеющие малые питч-углы /41/. При удалении ударной волны от Солнца объем области модуляции растет, а так как пробка не пропускает часть частиц с большими питч-углами, то в области за пробкой возникает разрежение

(форбуш-понижение), которое уменьшается при удалении от пробки (фаза восстановления) вследствие втекания частиц через боковую поверхность области. Фаза понижения интенсивности ГКЛ объясняется увеличением эффективности действия пробки по мере прохождения ударной волны через орбиту Земли. Это согласуется с данными, приведенными в /42/.

Привлекательность механизма модуляции Крымского Г.Ф. в том, что данный механизм позволяет объяснить как макро- так и тонкую структуру форбуш-понижений интенсивности ГКЛ, одновременно. События, обусловленные действием поршневых волн, могут быть описаны лишь моделями, не обладающими сферической симметрией. Анализ же показал, что все виды движений среды могут встречаться одинаково часто /3/.

Резюме к главе 4

4.1. Получены первые экспериментальные доказательства действия механизма *группового* поведения частиц в окрестности «магнитных «пробок» на ударных волнах.

4.2. Выявлена характерная *динамика* флуктуаций космических лучей наблюдаемая в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

4.3. За ударной волной обнаружен «*след*» с регулярным магнитным полем. Эффект «увеличения масштаба турбулентности» /19/, проявляющийся в недовосстановлении мелкомасштабных неоднородностей за ударной волной, подтверждается анизотропным характером вспышек СКЛ с относительно жестким спектром, регистрируемых в минимуме и на стадии восстановления эффектов Форбуша.

Литература к главе 4

1. Kozlov V.I., Kuzmin A.I., Krymsky G.F. et al. Cosmic Ray Variations With Periods Less Than 12 Hours. // Proc. 13-th ICRC. Denver. 1973. Vol.2. P. 939-942.

2. Kozlov V.I. On the Degree of Magnetic Field Inhomogeneity of Piston Shock Waves. // Proc. Phys. Solariterr. Potsdam. 1978. No.9. P. 57-62.

3. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Шафер Г.В. и др. Модели ударных волн и наблюдаемые свойства форбуш-эффектов. // В сб. : Исследования по космофизике и аэрономии. Изд. ЯФ СО АН СССР. Якутск. 1975. С.58-68.

4. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Козлов В.И. и др. Явления в космических лучах в августе 1972 г. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т.37. N6. С.1205-1211.

5. Козлов В.И., Борисов Д.З., Туголуков Н.Н. Метод диагностики межпланетных возмущений по исследованию флуктуаций интенсивности космических лучей и его реализация в системе автоматизации научных исследований в Полярной Геокосмофизической Обсерватории Тикс. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.48. N11. С. 2228.

6. Козлов В.И. Ранняя диагностика межпланетных возмущений по регистрации модуляции мерцаний космических лучей. // Доклад на международном семинаре: Трехмерное распределение и флуктуации космических лучей в солнечной системе. Болгария. 1985. 20 с.

7. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений. Якутск.: ЯНЦ СО РАН. 1993. 164с.

8. Козлов В.И. Результаты прогноза и диагностики возмущений межпланетной среды в апреле-июле 1982 г. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. Ноябрь 1982. С. 21-25.

9. Козлов В.И. Результаты эксперимента по прогнозу и диагностике эфф. Форбуша в июле-декабре 1982 г. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. Август 1983. С. 5-6.

10. Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Солнечные протонные события. Каталог 1980-1986 гг. // Материалы Мирового Центра Данных «Б». Отв. Ред. Ю.И. Логачев. М. 1990.

11. Козлов В.И. Взаимосвязь возрастаний интенсивности космических лучей 4-5 августа 1972 г. с динамикой спектра неоднородностей межпланетного магнитного поля. // Исследования по космофизике и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1975. С. 49-61.

12. Kozlov V.I. A Structure of Solar Wind Disturbances of Cosmic Ray Short-Term Variations. // Proc. 15-th ICRC. Plovdiv. 1977. Vol.4. P. 329-334.

13. Козлов В.И., Мурашев Ф.П. Выделение скрытых периодичностей в интенсивности космических лучей методами теории цепных дробей. // Исследования по космофизике и аэрономии. Космические лучи и солнечно-земная физика. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1975. С. 127-137.

14. Kuzmin A.I., Mamrukova V.P., Prichodko A.N. Cosmic Ray Intensity Decrease in July 1982. // Proc. 18 ICRC. India. Bangalore. 1983. Vol.3. P. 202-205.

15. Owens A.I., Jokipii J.R. A Relation Between Cosmic Ray Fluctuations, Gradient and Diffusion Coefficient. // Proc. 13 ICRC. Denver. USA. 1973. Vol.2. P. 777-782.

16. Каталог Кинга. МЦД – В. М.: Данные измерений ММП на Explorer-33.

17. Bezrodnykh I.P., Kuzmin V.A., Kozlov V.I. et al. Dynamic of power spectra fluctuation IMF and cosmic ray // Abstracts of Reports on Intern. Canad. Simp. Ottawa. 1981.

18. Алтухов А.М., Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И. Динамические эффекты в космических лучах. // Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1973. С. 198-248.

19. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Козлов В.И. и др. Явления в космических лучах в августе 1972 г. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т.37. N6. С. 1205-1210.

20. Козлов В.И. О структуре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций космических лучей. // Автореферат канд. дисс. М.: МГУ. 1981. 20 с.

21. Туголуков Н.Н., Козлов В.И. Связь мерцаний интенсивности космических лучей с параметрами солнечного ветра. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т.31. N4. С.715.

22. Bavassano B., Mariani F., Ness N.F. Pioneer-8 Observation of 16 Interplanetary Shock Waves Observed in 1968. // J. Geophys. Res. 1973. Vol.78. N22. P. 4535-4546.

23. Burlaga L., Sittler E., Mariani F. et al. Magnetic Loop Behind Interplanetary Shock: Voyager, Helios and IMP 8 Observations. // J. Geophys. Res. 1981. Vol.86. P. 6673-6684.

24. Woo R., Armstrong J.W. Observations of the Electron Density Spectrum Near the Sun During Spectral Broadening Transient. Solar Wind Seven. // Proc. 3 COSPAR Colloq. Goslr. 16-20 Sept. 1991. Oxford etc. 1992. P. 583-586.

25. Sanderson T.R., Beeck J., Marsden R.G. et al. Cosmic Ray, Energetic Ions and Magnetic Field Characteristics of a Magnetic Cloud. // Proc. 21 ICRC. Adelaide. 1990. Vol.6. P. 255-258.

26. Sanderson T.R., Beeck J., Marsden R.G. et al. A study of the Relation Between Magnetic Clouds and Forbush-decreases. // Proc. 21 ICRC. 1990. Adelaide. Vol.6. P. 251-254.

27. Козлов В.И., Филиппов А.Т. Обнаружение осцилляторной структуры межпланетных ударных волн по данным вспышек космических лучей. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1976. С.6-9.

28. Чирков Н.П., Григорьев В.Г., Козлов В.И. и др. О регулярной структуре ударной волны в конце 4 августа 1972 г. // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1976. С. 5-6.

29. Кузьмин А.И., Крымский Г.Ф., Скрипин Г.В. и др. Космические лучи в июле 1961 г. // Космические лучи и вопросы космофизики. М.: Изд-во АН СССР. 1964. С. 153-159.

30. Переяслова Н.К. События солнечных космических лучей в сентябре 1977 г., их прогноз и связь с комплексом гелиогеофизических явлений. // IX Ленинградский семинар по космофизике. Л.: ЛИЯФ. 1978. С. 262-272.

31. Боровков Л.П., Вашенюк Э.В., Лазутин Л.Л., и др. Солнечные протоны в стратосфере и на поверхности Земли 7 мая 1978 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т.19. N3. С. 552-554.

32. Кузьмин А.И. Вариации космических лучей и солнечная активность. М.: Наука. 1968. 158 с.1

33. Козлов В.И. Тонкая структура ударных волн и распространение солнечных космических лучей. // Препринт ИКФИА N8. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1976. 22 с.

34. Мирошниченко Л.И., Петров В.М. Динамика радиационных условий в космосе. // М.: Энергоатомиздат. 1985. С. 112-113.

35. Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I., Struminsky A.B. The Influence of Interplanetary Shocks on Solar Protons Measured in the Stratosphere. // Adv. Space Res. 1994. Vol.14. No.10. P. 717-723.

36. Крымский Г.Ф. Вариации космических лучей и межпланетная среда. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т.33. N11. С. 1858-1869.

37. Крымский Г.Ф. Короткопериодные вариации космических лучей. // Рапределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1973. С. 249-266.

38. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде. // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. N2, С. 196-200.

39. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты. // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. N3. С. 407-410.

40. Крымский Г.Ф., Транский И.А. Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. // Динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1973. С. 154-198.

41. Крымский Г.Ф., Елшин В.К., Ромащенко Ю.А. и др. Магнитные пробки в ударных волнах и их роль в ускорении частиц. // Связь физических процессов в ионосфере и магнитосфере Земли с параметрами солнечного ветра. Якутск.: ЯФ СО АН СССР. 1977. С. 27-49.

42. Kamoldinov S.M. et al. The Influence of Magnetic «Corks» upon the Galactic Cosmic Ray Distribution. // Proc. 14 ICRC. Munchen. 1975. Vol.3. P. 838-843.

Глава 5. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ

5.1 Средние характеристики частотного спектра флуктуаций.

Для выявления закономерности в поведении частотных спектров флуктуаций ГКЛ нами было проведено усреднение исследуемых индексов и параметров солнечного ветра методом наложения эпох. Анализировались 11 событий регистрации ударных волн в 1978-1982 гг. Исследуемый период характерен наиболее полным набором измеряемых параметров, притом с высоким качеством измерений: 12.11.78 г., 25.04.79 г., 06.06.79 г., 06.07.69 г., 06.10.79 г., 19.12.80 г., 10.08.81 г., 11.11.81 г., 01.03.82 г., 13.07.82 г., 24.11.82 г.

За день t_o выбран день начала форбуш-понижений интенсивности ГКЛ. Спектры мощности рассчитывались для каждого из 11 событий за 14 дней до и 5 дней после дня t_o. Далее, среднесуточные спектры суммировались и усреднялись по 11 событиям. На рис. 5.1а слева приведены в относительных еденицах усредненные таким образом частотные спектры флуктуаций ГКЛ за «-4», «-2», «t_o» и «+2» дни. По оси ω отложена равномерная шкала частоты, представляющая собой величину обратную периоду флуктуаций. Максимальная частота (частота Найквиста) $\omega_H = 0{,}5$ соответствует двум временным точкам пятиминутных значений интенсивности, т.е. минимальному периоду $2\Delta t$ = 10 мин.

Если в «-4» день относительно дня t_o спектр практически плоский, то в «-2» день увеличена мощность высокочастотного участка спектра. В день t_o присходит смещение максимума в низкочастотную область спектра, а в последующие дни «+1» и «+2» низкочастотные гармоники – доминируют. О характере распределения максимумов в спектрах мощности можно судить по результатам распределения амплитуд гармоник спектра на кумулятивной функции нормального распределения, отнормированной к прямой линии. Результаты анализа приведены в средней части рис. 5.1b. По оси ординат отложены значения кумулятивной функции распределения амплитуд в процентах, по оси абсцисс – значения амплитуд гармоник в относительных единицах. Амплитуды гармоник спектра мощности за «-4» день удовлетворительно аппроксимируются прямой нормального распределения. Напротив, максимальные значения амплитуд высокочастотных гармоник в «-2» день выходят за пределы прямой нормального распределения (аномальные точки увеличены). Это подтверждается и результатами расчетов доверительных уровней для спектров в «-2», t_o и в «+2» дни (см. рис. 5.1а).

Ниже проводится формализация динамики частотного спектра флуктуаций космических лучей двумя различными способами. Сначала применяется процедура определения показателя наклона спектра

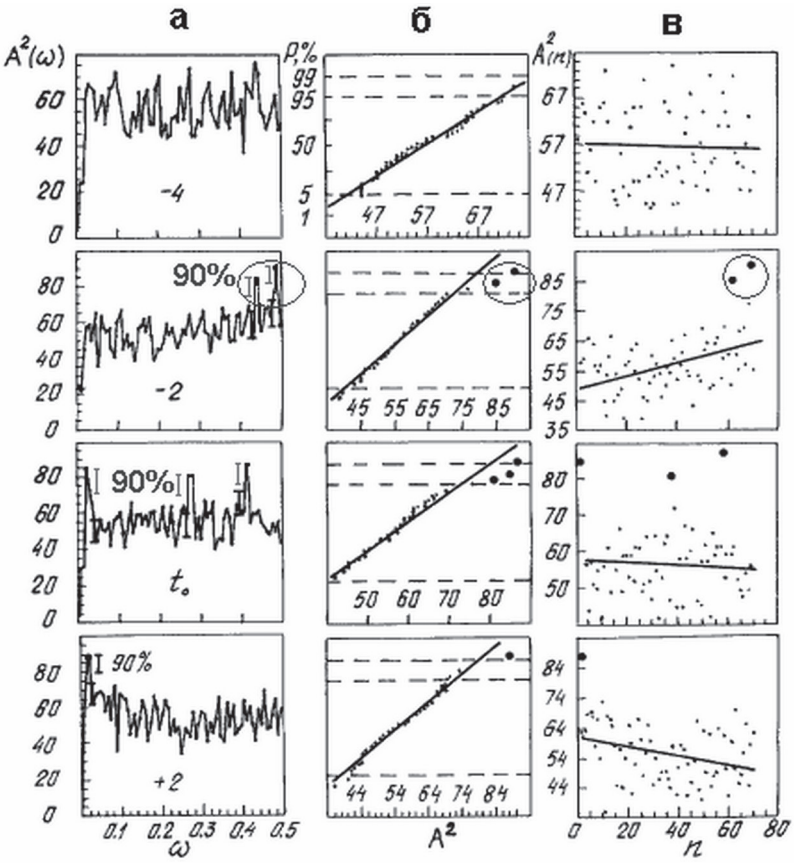


Рис. 5.1. Результаты анализа спектров мощности флуктуаций космических лучей в 11 событиях ударных волн 1978–1982 гг. методом наложения эпох относительно «нулевого» дня «t_o» – день регистрации ударной волны. Приведены средние (по 11 событиям) спектры мощности за «-4», «-2», «t_o» и «+2» дни, соответственно (а). По оси ω отложена равномерная шкала частоты, представляющая собой величину обратную периоду флуктуаций. В средней части рисунка (б), представлены результаты распределения амплитуд гармоник спектра на кумулятивной функции нормального распределения, отнормированной к прямой линии. Показатели наклона спектров мощности, определенные способом наименьших квадратов, приведены в правой части рисунка (в)

известным способом наименьших квадратов. Таким образом, определяются параметры тренда для каждого спектра. Графики трендов для анализируемых спектров показаны в правой части рис. 5.1в. Динамика показателя наклона спектров очевидна. Если для «-4», t_o и «+2» дней показатели отрицательны, то в «-2» день тренд положителен.

5.2 Введение спектрально-временного индекса мерцаний.

«…Именно в процессе математического исследования человек воистину начинает видеть красоту математики… В эти мгновения ярким светом озаряется часть колоссальной логической структуры и нашему взору, наконец, открывается некоторая доля смысла, ***скрытого*** *в природе вещей»*

Давид Рюэль. «МОЗГ МАТЕМАТИКА». М.-Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2012 г. Стр. 133.

Формализация спектров мощности флуктуаций новым способом достигается введением спектрально-временного индекса мерцаний. Пусть $A_1, A_2, ... A_n$ – амплитудный спектр. С целью вычисления инверсионного индекса число инверсий для начала полагаем $I = 0$. Далее, сравниваем A_i с A_{i+1}, где $i = 1,2,...N$-1; При $A_i < A_{i+1}$ увеличиваем I на 1, в противном случае I не изменяется. Максимальное значение (I_{max}) для натурального ряда чисел (амплитуд спектра, в данном случае) есть выражение для биномиального коэффициента:

$$I_{max} = C_n^2 = N!/\ 2!(N\text{-}2)!\ .$$

В этом случае $A_i < A_{i+1}$. Естественно, что для обращенного натурального ряда чисел (условных гармоник с $A_i > A_{i+1}$) число инверсий нулевое: $I_{min} = 0$. Для реальных спектров: $I_{min} < I < I_{max}$. После нормировки инверсионного индекса на его максимальное значение имеем выражение для индекса мерцаний с нулевым средним:

$$I_i = (2I_i/I_{max}) - 1.$$

Из этого выражения следует, что при $I_{min} = 0$, $\mu_{min} = -1$, при $I = I_{max}$ $\mu_{max} = 1$, т.е. μ_i-индекс будет распределен в интервале [-1,1].

Ниже, на рис. 5.2 приведены результаты тестирования вновь введенного индекса мерцаний на модельных рядах. В качестве контрольного ряда моделирующего спектр «белого шума» выбран спектр мощности (график *P(w)* в верхнем, правом углу рис. 5.2) от дельта-функции (график *X(t)* в верхнем, левом углу рис. 5.2). Поскольку в широком диапазоне частот амплитуды гармоник «белого шума», практически, равны между собой, то спектральный индекс мерцаний $\mu = 0$. Это, по определению, калибровочный «нуль» индекса мерцаний. Для случая, когда амплитуды гармоник увеличиваются по мере увеличения частоты, можно взять спектр гармоники с минимально возможным периодом («частотой Найквиста»). Результаты представлены в средней части рис. 5.2. Этот

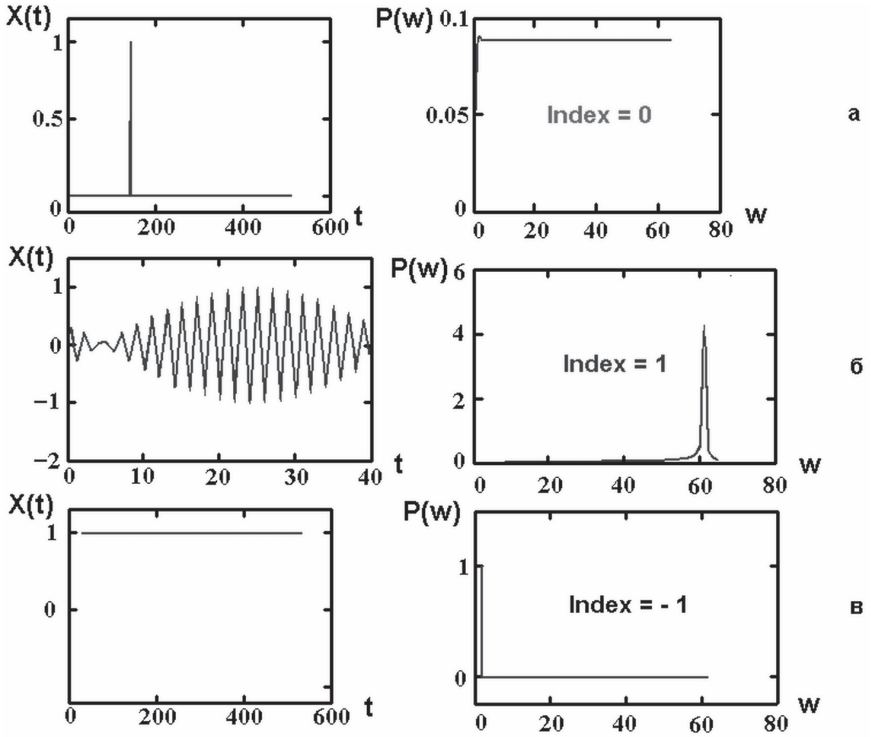


Рис. 5.2. Тестовый расчет индекса мерцаний для «белого шума» или спектра мощности от дельта-функции: в верхней части рисунка. Расчет индекса мерцаний для случая спектра мощности от гармоники с минимально возможным периодом («частотой Найквиста»): в средней части рисунка. Этот идеальный случай соответствует максимально возможному значению спектрального индекса мерцаний $\mu_{max} = 1$. Предельный случай минимально возможного значения индекса мерцаний соответствует спектру мощности, взятому от «константы» (нижняя часть рисунка). В этом (альтернативном предыдущему) случае, в спектре мощности доминирует гармоника на «нулевой частоте», индекс мерцаний которой минимален и равен $\mu_{min} = -1$

идеальный случай соответствует максимально возможному значению спектрального индекса мерцаний $\mu_{max} = 1$. Предельный случай минимально возможного значения индекса мерцаний соответствует спектру мощности, взятому от «константы» (нижняя часть рис. 5.2). В этом (альтернативном предыдущему) случае, в спектре мощности доминирует гармоника на «нулевой» частоте, индекс мерцаний которой минимален и равен $\mu_{min} = -1$. Таким образом, для реальных спектров μ_i-индекс будет распределен в интервале [-1,1].

5.3 Количественное описание динамики частотного спектра флуктуаций.

Ниже, рассчитаны спектральные индексы мерцаний ГКЛ для всех суточных спектров, начиная с «-14» дня по «+5» день включительно. На рис. 5.3 инверсионные спектральные индексы мерцаний (I_i) сопоставляются с рассчитанными ранее показателями наклона b_i спектров (пунктирная кривая) для каждых суток соответственно. Идентичность сравниваемых кривых, полученных различными способами, очевидна. Коэффициент взаимной корреляции (ВКФ) $R \approx 0.96$ при числе пар коррелируемых точек $n = 20$ указывает на высокую степень согласия результатов расчетов а, следовательно, и на надежность введенного инверсионного индекса мерцаний. Существенным достоинством введенного индекса мерцаний является возможность единообразного описания как сплошных (шумоподобных), так и дискретных спектров наблюдаемых, как правило, в окрестности фронтов ударных волн, а также постоянство доверительных уровней значимости индекса мерцаний (в данном случае, 95% – точечная линия на рис. 5.3) при фиксированном числе гармоник спектра. Периодическая структура ВКФ указывает на явно выраженную, квазинедельную периодичность вариаций индекса мерцаний ГКЛ с периодом $T \approx$ 4±1 сут.

Важно отметить, что понижение размерности трехмерного динамического спектра в обычную (двумерную) числовую последовательность индекса мерцаний ГКЛ позволяет применять к последовательности чисел все известные методы анализа временных рядов, в том числе, и метод наложения эпох (рис. 5.4). График индекса мерцаний (μ_i) за 15 сут до начала эфф. Форбуша в интенсивности ГКЛ (N_p), в день t_0 и за последующие 5 сут после дня t_0, показан в верхней части рис. 5.4 для 11 событий 1978–1982 гг. Часовые значения всех приведенных величин усреднены до полусуточных средних значений. Над графиками даны минимальные и максимальные значения приведенных величин. Видно, что перед усредненным эфф. Форбуша (точнее, в «-3»±1 день) значение индекса мерцаний максимально (зачерненная область). Далее, приведены результаты анализа семи параметров солнечного ветра: концентрации плазмы солнечного ветра n, напряженности магнитного поля B, скорости солнечного ветра V, дисперсии напряженности поля σ_B, B_z-компоненты ММП, K_p-индекса геомагнитной возмущенности и D_{st}-вариации.

Из сопоставления интенсивности ГКЛ с указанными параметрами следует, что «усредненный» эфф. Форбуша совпадает по времени с максимальными величинами V, B, K_p-индекса, что и следовало ожидать. Минимум D_{st}-вариации и B_z-компоненты также достигается в день t_0.

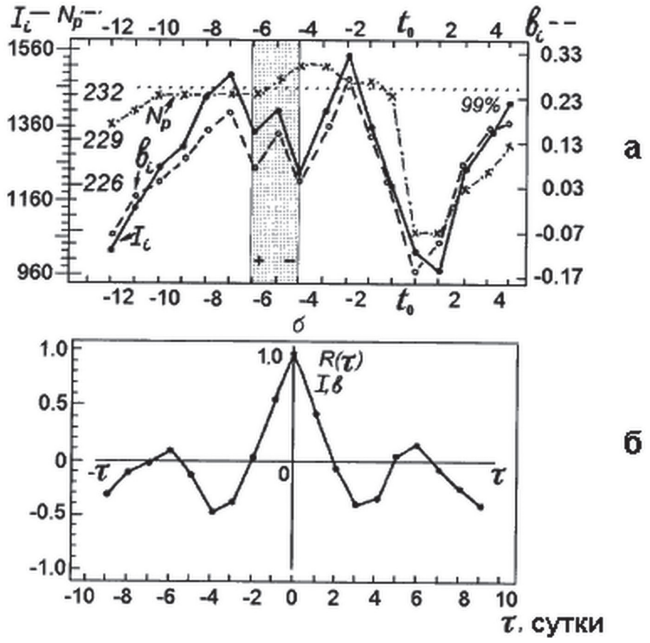


Рис. 5.3. Метод наложения эпох для среднесуточных значений индекса мерцаний космических лучей, относительно того же «нулевого» дня «t_o». В верхней части рисунка (а), проведено сопоставление спектральных индексов мерцаний Ii космических лучей с показателями наклона b_i спектров (пунктирная кривая) и интенсивности космических лучей N для каждых (условных) суток, соответственно. В нижней части рисунка (б), дан расчет кросс-корреляционной функции $R(\tau)$ спектрального индекса I_i и показателя спектра b_i

Исключение составляют концентрация плазмы n и дисперсия поля σ_B, максимумы которых опережают максимумы V, B, K_p и минимумы D_{st}-вариации и B_z-компоненты поля. Это означает, что турбулентная оболочка опережает магнитное облако с относительно регулярным полем. Из сопоставления индекса мерцаний космических лучей μ_i с анализируемыми параметрами видно, что максимум индекса мерцаний наблюдаемый в «-2» день регистрируется уже в достаточно возмущенных условиях ($n \approx 10$ см$^{-3}$, $B \approx 10$ нТл и $V \approx 400$ км/с).

Выше, в п. 3.4 рассматривался способ определения эмпирических вероятностей статистического «прогноза» посредством расчета коэффициентов взаимной корреляции между прогностическим индексом $z(t)$ и прогнозируемым параметром $y(t)$. Прогнозируемыми параметрами в нашем случае, являются понижения интенсивности ГКЛ, D_{st}-вариации во время форбуш-понижений, а также максимум значений K_p-индекса во

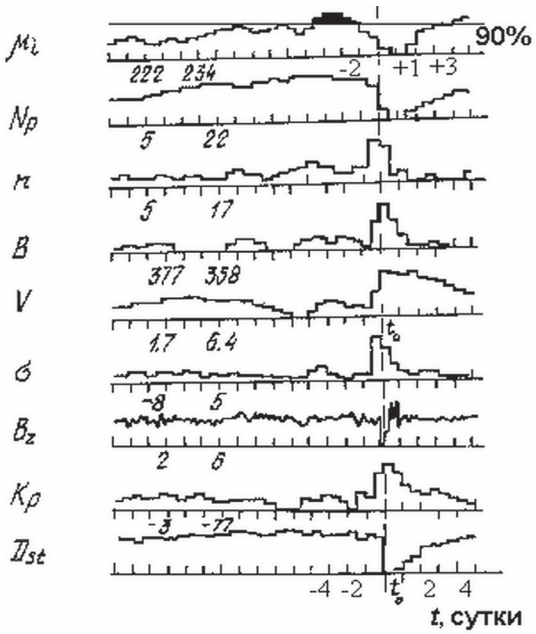


Рис. 5.4. Результаты метода наложения эпох для спектрального индекса мерцаний μ_i, интенсивности космических лучей N_p и параметров солнечного ветра: плотности плазмы n, напряженности магнитного поля B, ее дисперсии σ и южной компоненты поля B_z, скорости солнечного ветра V, а также индексов геомагнитной возмущенности (K_p и D_{st}-вариция), относительно «нулевого» дня регистрации ударной волны «t_0» в 11 событиях 1978–1982 гг. В верхней, левой части рисунка указан диапазон средних значений для каждого из приведенных выше параметров

время регистрации ударных волн. Увеличение статистики до 30 событий эфф. Форбуша сохранило, в целом, найденные значения эмпирических вероятностей. Значение эмпирической вероятности статистического «прогноза» ударных волн вызывающих эффекты Форбуша, сопровождающихся геомагнитными бурями, не менее 0.7. Графики коррелируемых параметров представлены на рис. 5.5. Сплошной кривой показаны среднесуточные значения интенсивности ГКЛ б. Тикси во время 30 эфф. Форбуша: 12.11.78 г., 25.04.79 г., 06.06.79 г., 06.07.79 г.,06.10.79 г., 19.12.80 г., 10.08.81 г., 11.11.81 г., 01.03.82 г., 13.07.82 г., 24.11.82 г., 04.11.86 г., 14.01.88 г., 21.02.88 г., 27.03.89 г., 14.04.89 г., 01.07.89 г., 10.08.89 г., 08.11.89 г., 28.11.89 г., 29.12.89 г., 30.03.90 г.. 28.07.90 г., 08.12.90 г., 24.03. 91 г., 25.04.91 г., 20.05.91 г., 13.06.91 г.. 28.10.91 г. Пунктирной кривой показаны среднесуточные средние индекса мерцаний, штрихпунктирной – значения K_p-индекса. Шкала интенсивности

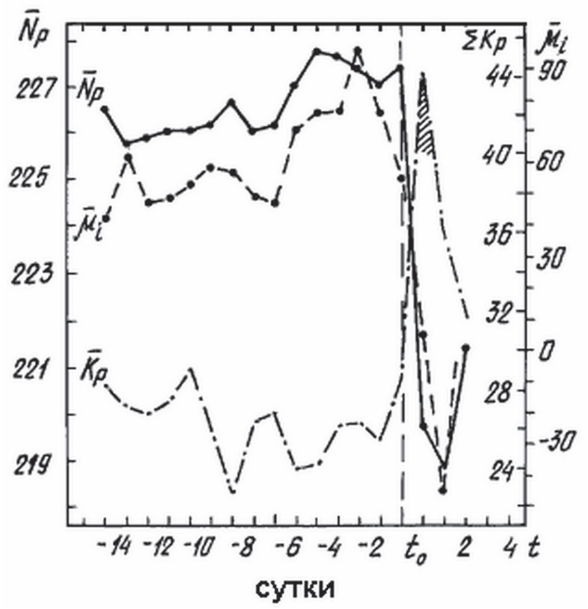


Рис. 5.5. Результат метода наложения эпох для спектрального индекса мерцаний μ_i – пунктирная линия (шкала справа), интенсивности космических лучей N_p – сплошная кривая (шкала слева), и индекса геомагнитной активности K_p – штрихпунктирная линия (шкала, в правой части рисунка), с увеличенной (до 30 событий) статистикой

космических лучей дана в левой части рисунка, справа – шкала индексов K_p и μ_i. Вертикальной пунктирной прямой отмечен день регистрации ударных волн – день t_o. Из представленных результатов видно, что при увеличении статистики рост индекса за двое суток перед эффектами Форбуша и магнитными бурями выявляется наиболее отчетливо. Штриховкой показано превышение уровня суточной суммы – $\sum K_p \geq 40$. Превышение данного уровня означает, как правило, регистрацию мировой магнитной бури.

5.4 Обнаружение структурной перестройки гелиосферного токового слоя в активный период.

На рис. 5.6 сопоставляются усредненные по 11 событиям 3-часовые значения скорости солнечного ветра V (штрих-пунктир), B_z-компоненты (сплошная кривая) и D_{st}-вариации (пунктир) с индексом мерцаний (точечная кривая), дополненным еще 19 событиями, всего 30 событий. Все данные сглажены по 3 точкам. Прежде всего, обращает на себя внимание факт одновременого изменения всех исследуемых параметров с момента прохождения в «-4» день границ секторов ММП.

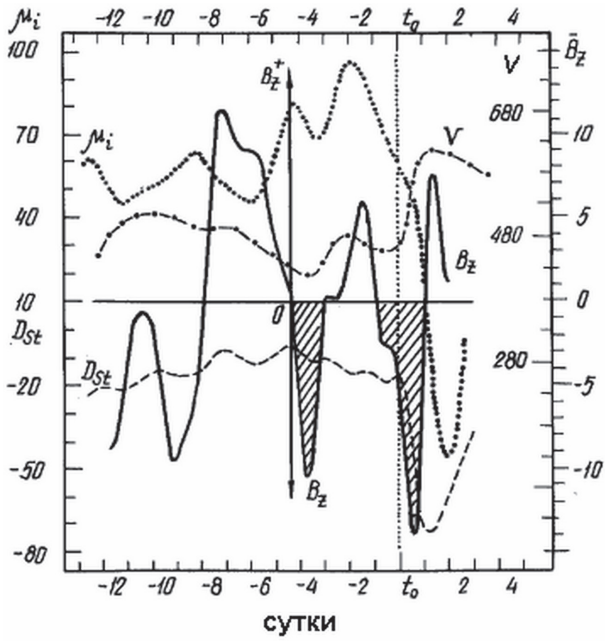


Рис. 5.6. Средние, по 11 событиям, 3-часовые значения скорости солнечного ветра V (штрих-пунктир), B_z-компоненты (сплошная кривая) и D_{st}-вариации (пунктир) с индексом мерцаний μ_i (точечная кривая), дополненным еще 19 событиями, всего 30 событий. В момент прохождения в "-4" день условной границы сектора ММП, все параметры изменяются одновременно: прекращается падение скорости солнечного ветра и начинается ее возрастание, начинается предпонижение" в D_{st}-вариации

В этот период прекращается падение скорости солнечного ветра и начинается ее возрастание, что обычно также указывает на пересечение границ секторов ММП /1/. С момента прохождения секторной границы начинается «предпонижение» и D_{st}-вариации (рис. 5.6).

После завершения роста интенсивности ГКЛ на границе сектора, наблюдается предпонижение интенсивности космических лучей вплоть до эфф. Форбуша в день «t_0» (рис. 5.3). Заметим, что перед ростом интенсивности ГКЛ на границе сектора также начинается увеличение индекса мерцаний. Значимые значения индекса мерцаний достигаются за 1-2 дня (в «-7» день) до прохождения границы сектора (с «-6» на «-5» дни) и также за 2 суток (в «-2» день) до регистрации ударной волны и эфф. Форбуша в день t_0.

При увеличении числа форбуш-понижений до 30 событий, местоположение максимума индекса мерцаний в «-2» день сохраняется. Важно отметить, что увеличение статистики до 30 событий повысило

значимость вариаций спектрального индекса мерцаний до ≈ 99%. Это следует из результатов тестирования по критерию χ^2. При сумме $\sum \chi_i^2 = 16{,}459$ с 6 степенями свободы, приведенное значение $P \approx 1\%$ (для гипотезы о нормальном распределении индекса мерцаний $\chi_0^2 = \sum \chi_i^2 / d > 1$) и, следовательно, гипотеза о случайном характере распределения индекса не может быть принята.

Проявление границ секторов гелиосферного токового слоя (ГТС) и в интенсивности и в индексе мерцаний ГКЛ совершенно естественно. Из данных спутниковых измерений следует, что на границе секторов ГТС флуктуации плотности плазмы и магнитного поля – максимальны (см. рис. 5.7 /2/). В работах /3,4/ отмечается, что максимум отношения газокинетического давления к магнитному (параметр β) достигается также и в окрестности ГТС, т. е. аналогично тому, что обычно наблюдается на фронтах ударных волн. Ранее в работе /5/, указывалось, что слоистая структура ММП из множества тангенциальных разрывов наблюдается в большинстве случаев пересечения секторных границ ГТС. При этом корреляционный масштаб магнитной структуры ММП L~10^{-2} а. е. (~10^{11} см) соответствует временному интервалу T = 10–15 мин.

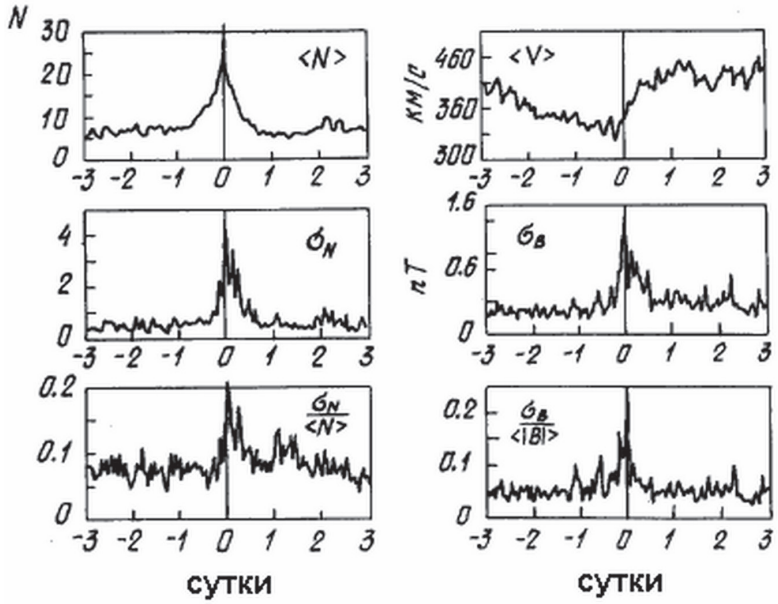


Рис. 5.7. Поведение плотности плазмы солнечного ветра, ее дисперсии и нормированной дисперсии в окрестности границы сектора межпланетного магнитного поля (в левой части рисунка). Справа – поведение скорости солнечного ветра, дисперсии напряженности магнитного поля и ее нормированной дисперсии /2/

На рис. 5.8 представлены результаты корреляционно-спектрального анализа вариаций параметров солнечного ветра. В кросс-корреляционной функции присутствует значимая вариация с периодом $T \approx 4$ сут. Величина коэффициента корреляции плотности плазмы и напряженности магнитного поля $R(\tau) \approx 0.6$ при числе коррелируемых точек $N = 50$ соответствует уровню значимости не менее 99%. На ударной волне коэффициент корреляции, естественно, возрастает до величины $R \approx 0.9$. Значения коэффициентов корреляции (при нулевом сдвиге τ) согласуются с их значениями на ударных волнах. С другой стороны, это подтверждает достоверность вариаций временного хода параметров солнечного ветра и до регистрации ударной волны. Таким образом, обнаруженная нами волна активности в индексе мерцаний отражает, очевидно, квазипериодическую осцилляцию ГТС с периодом $T = 4 \pm 1$ сут., которая завершается ударной волной.

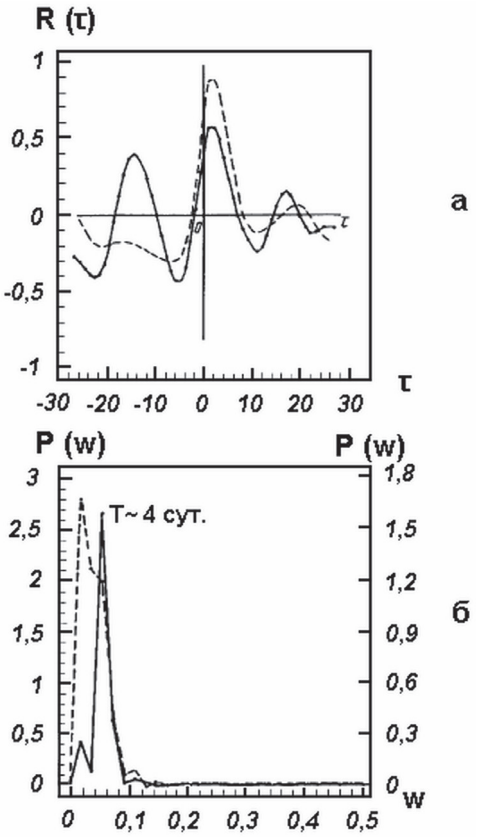


Рис. 5.8. Результаты корреляционно-спектрального анализа вариаций параметров солнечного ветра. Во взаимном спектре плотности плазмы и напряженности магнитного поля в окрестности ударной волны, доминирует квазинедельная вариация с периодом $T \approx 4$ сут.

Полученные результаты согласуются с известным «эффектом локализации ударных волн и солнечных вспышек» в область проекции ГТС на диск Солнца /6/. Это согласуется и с эффектом концентрации солнечных вспышек к секторным границам ММП /7/. Авторами работы /8/ сделан вывод о том, что события солнечных энергичных частиц (SEP-события) связанные с CME-событиями, имеют тенденцию появляться в активных областях лежащих в основании шлемовидных стриммеров формирующих гелиомагнитный экватор.

В работе /9/ отмечается также, что сильные флуктуации солнечной активности тесно связаны с появлением мощных групп пятен,

которые концентрируются около секторных границ фоновых магнитных полей. Установлено, что существует связь между возникновением флуктуаций солнечной активности или их экстремумами и началами перестроек секторной структуры фоновых магнитных полей. Показано, что вероятность неслучайной связи перестроек секторной структуры с экстремумами флуктуаций солнечной активности P = 0,84. Анализ показал, что 80% сильных флуктуаций солнечной активности с уровнем значимости не менее 0,97 предшествует перестройкам, так что экстремум флуктуаций солнечной активности с точностью ±1 оборот Солнца совпадает с началом перестройки секторной структуры магнитного поля /9/.

Известно, что ГТС образуется там, где потоки солнечного ветра, переносящие магнитные поля противоположной полярности, сходятся в одной точке над магнитозамкнутыми областями короны. Последние видимы как длинные тонкие струи коронального шлема. В настоящее время признано, что эти же длинные тонкие струи шлема являются местонахождением главных временных разрывов короны, так называемых корональных выбросов массы – СМЕ. Они рассматриваются как возмущения стационарной корональной глобальной структуры – ГТС /9/. Результаты, полученные в /10/, согласуются с тем, что корональный струйный пояс окружающий ГТС, является местом постоянной переходной области, которая отклоняет токовый слой от его средней ориентации. В работе /11/ также делается вывод о физической связи СМЕ с распадом крупномасштабных магнитных структур. Установлено, что количество СМЕ, являющихся источником ударных волн и магнитных облаков, увеличивается при распаде крупномасштабных магнитных полей на ветви спада солнечной активности. В исследуемом цикле солнечной активности (СА) это, прежде всего, периоды 1982 г. и 1991 г. с глубокими понижениями интенсивности ГКЛ, а также период 1972 г. Это подтверждается и другими данными.

Так в работе /12/ сделан вывод, что временной ход наклона магнитного диполя Солнца в цикле СА показывает наличие вариаций в 1982-1984 гг. – локальное увеличение наклона диполя на фоне его уменьшения к минимуму СА. Анализ гистограмм частоты пересечения землей ГТС указывает на наличие максимума в бине с максимумом наклонения (80-90°). Это означает, что пересечения ГТС на 1 а.е. чаще всего должны быть сильно наклонены. В работе /13/ проанализировано 75 случаев пересечений ГТС по данным ИСЗ. Эти пересечения сопоставлены с наклоном нейтральной линии относительно экватора. Показано, что наибольшие значения плотности плазмы и магнитного поля в ГТС достигаются при наибольших углах наклона.

Исследование связи между локальным наклоном ГТС и интенсивностью космических лучей по данным измерений на космических аппаратах IMP, Voyager, Pioneer показало сильную корреляцию между ними /14/. Подобное изучение проведенное в работе /15/ привело авторов к выводу об уменьшении интенсивности ГКЛ с ростом угла наклона ГТС или, другими словами, об увеличении угла наклона ГТС в периоды понижений интенсивности ГКЛ. Кроме того, наклон ГТС проявляется в регистрации B_z-компоненты ММП при пересечении Землей ГТС /16/.

Вариации ГТС во вспышечно-активный период регистрируются как осцилляции B_z-компоненты, плотности плазмы и магнитного поля. В индексе мерцаний ГКЛ они проявляются как волна структурной перестройки ГТС, начинающаяся с уменьшения периода вариаций индекса мерцаний от рекуррентного (25-27 сут) периода до 13-15 сут и, далее, до 5±1 сут, сопровождающаяся ударными волнами и эфф. Форбуша /17,18/**.** Этот вывод в значительной степени подтверждается результатами ряда исследований приведенных ниже.

Статистический анализ наблюдений 277 межпланетных ударных волн показал что, ударные волны отклоняются от оси вспышки и коллимируются в ГТС. При этом, они имеют достаточно узкое гауссовское распределение частоты появления с максимумом внутри ГТС. Более того, ударные волны оказываются наиболее геоэффективными, когда Земля и источник вспышки располагаются по одну сторону от ГТС /19/. Все это позволило авторам работы /19/ сделать вывод о том, что ГТС способствует распространению ударных волн вдоль токового слоя и препятствует распространению поперек ГТС. Кроме того, по данным прямых измерений зарегистрированы случаи, когда скорость ударной волны может даже немонотонно возрастать (на $R > 20–40\ R_0$). Это связано с условиями распространения фронта ударной волны в пределах ГТС, что и приводит к эффекту локальной куммуляции энергии волны и к росту скорости фронта /20/. В работе /21/, тот же автор отмечает, что ударная волна придет к магнитосфере раньше, а ее интенсивность будет выше в том случае, когда Земля находится в окрестности секторной границы ММП. Более того, исследуя геоэффективность ГТС в работе /22/ прямо утверждается, что пересечение Землей ГТС является необходимым условием регистрации отрицательной компоненты поля B_z и генерации геомагнитной активности непосредственно ГТС. Не исключена и возможность генерации ударной волны в результате нелинейного процесса укручения волны активности ГТС в возмущенный период /17/. На возможность развития своеобразной «гелиосферной суббури» указывается и в работе /23/.

5.5 Масштабно-инвариантные свойства динамики флуктуаций космических лучей.

В последнее годы, пристальное внимание ряда исследователей обращено на изучение структуры эффекта Форбуша. Результаты четырех групп исследователей (российской, американской, итальянской и японской) сводятся, в частности, к выявлению двухступенчатой структуры форбуш-понижений, но интерпретация ее различна.

По представлениям итальянской группы /24/, двухступенчатость объясняется наличием на классическом профиле эффекта Форбуша анизотропного возрастания интенсивности космических лучей длительностью от 5-20 час («peak»). Японская группа /25/ обнаруживает в последнее время анизотропное предпонижение интенсивности за 1-2 сут до главной фазы эффекта Форбуша. Временной профиль предпонижения зависит от местного времени и широты станции наблюдения.

Двухступенчатый профиль эффекта Форбуша российской группой /26/ впервые был выявлен при анализе события 4-5 августа 1972 г. Было показано, что следует различать, как тонкую (квазипериодическую) структуру, так и макроструктуру (двухступенчатость) эффекта Форбуша. При этом область с развитыми пульсациями ГКЛ или «турбулентная переходная область», по нашей терминологии /27/, разделяет предпонижение и главную фазу эффекта Форбуша, с последующей за ней областью «следа» с регулярным магнитным полем.

На основе данных прямых измерений параметров солнечного ветра «американская группа» независимо пришла к выводу об обнаружении турбулентной оболочки («sheath») ударной волны ответственной за предпонижение интенсивности ГКЛ. Кроме того, ими же была выявлена и область с регулярным полем («magnetic cloud»), которая ответственна за главную фазу эффекта Форбуша /28/. Результаты «американской группы» согласуются, в целом, с нашими представлениями о природе двухступенчатости форбуш-понижений. Ряд авторов /29/ также отмечают двухфазный характер эффекта Форбуша, обусловленный, по их мнению, модулирующими свойствами, как турбулентной области, так и магнитным облаком разделенными тангенциальным разрывом. Тем не менее, структура эффекта Форбуша не сводится только к двухступенчатой. В целом ряде наиболее мощных событий, например, в марте и апреле 1991 г. наблюдается сложная структура форбуш-понижений, а в июне того же года регистрируется многоступенчатая структура эффекта Форбуша.

Для количественного изучения вариаций индекса мерцаний ГКЛ в первом квартале 1991 г., высокочастотная часть вариаций с периодом $T \approx 4$ сут была исключена (рис. 5.9а). Видно, что в относительно

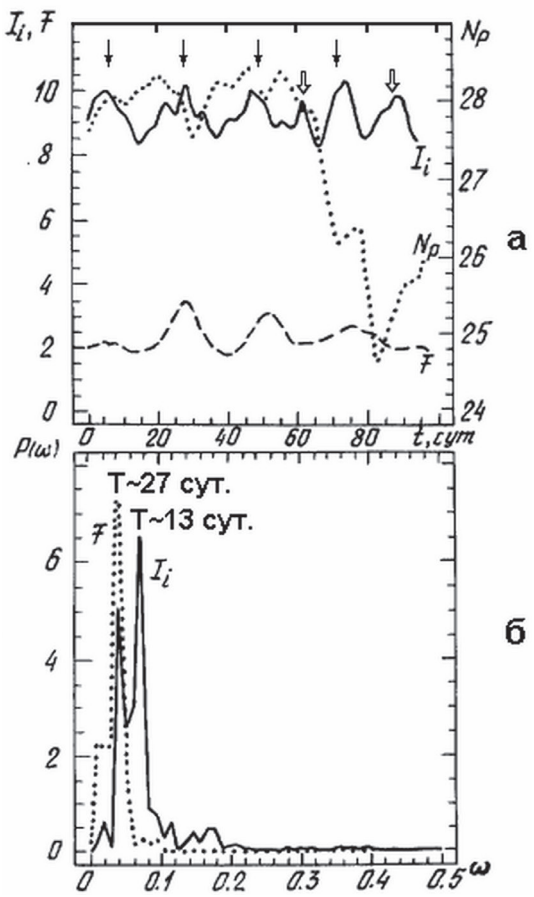


Рис. 5.9. Интенсивность космических лучей – точечная кривая, индекс мерцаний космических лучей – сплошная линия и поток радиоизлучения – пунктирная кривая в марте 1991 г. (а). Спектры анализируемых вариаций за тот же период (б): индекса мерцаний – сплошная кривая, и потока радиоизлучения – точечная кривая. В индексе мерцаний присутствуют обе вариации: 13–14 и 27 суток

спокойный период в индексе мерцаний (на 95% уровне значимости) наблюдается квазипериодичность с периодом $T \approx 27$ дней (как и для потока радиоизлучения F). В возмущенный период, т.е. начиная с марта месяца 1991 г., огибающая амплитуд вариаций индекса имеет уже вдвое меньший период T = 13–14 сут. Это подтверждается результатами спектрального анализа вариаций индекса мерцаний и потока радиоизлучения F (рис. 5.9б). Начиная же с апрельского события и далее, доминирует квазипериодическая вариация с $T \approx 4$ сут (см. рис. 5.10 – 5.11). Достаточно очевидно, что максимум огибающей 4-суточной волны предшествует эффекту Форбуша в обоих событиях, т.е. огибающая 4-сут волны описывает макроструктуру эффекта Форбуша (усредненный, «классический профиль» форбуш-понижения), а сами вариации индекса прописывают его тонкую структуру. Следовательно, динамика флуктуаций ГКЛ сохраняется как для эффекта Форбуша в целом, так и для элементов его структуры. Подобие динамики в «большом» и «малом» представляет собой, по сути, самоподобие или масштабную инвариантность динамики спектра флуктуаций космических лучей в исследуемом интервале масштабов понижений интенсивности ГКЛ /30/.

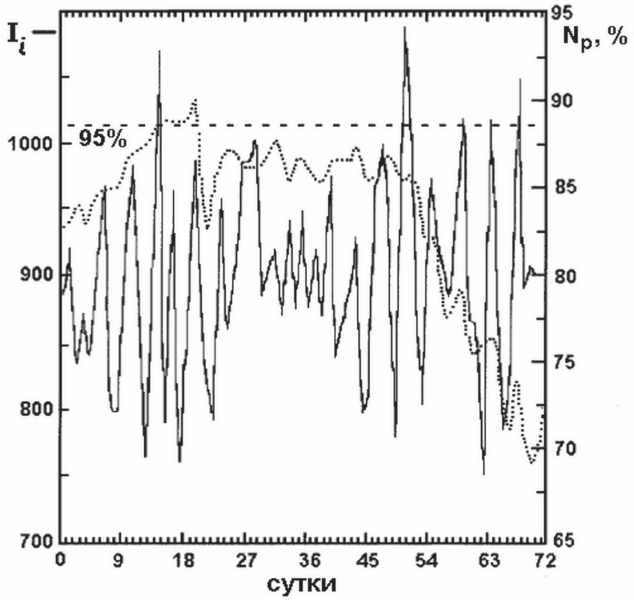


Рис. 5.10. Тонкая структура понижений интенсивности космических лучей с характерным казинедельным периодом T ≈ 4 суток во время форбуш-понижений в апреле и июне 1991 г. Точечная линия – интенсивность космических лучей. Сплошная кривая – индекс мерцаний. Указан 95%-ный уровень значимости

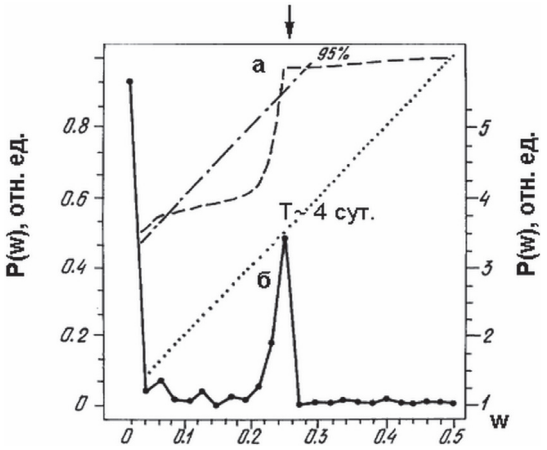


Рис. 5.11. Взаимный спектр индекса мерцаний и интенсивности космических лучей в интегральном (а – пунктирная кривая) и традиционном представлении (б – сплошная линия). В интегральном представлении взаимного спектра показан 95%-ный уровень значимости. В обоих случаях доминирует явно выраженная осцилляция с периодом T ≈ 4 сут.

Квази-недельная волна активности в индексе мерцаний ГКЛ отражает реальные вариации параметров солнечного ветра с периодом $T \approx 4$ сут (рис. 5.12). Это подтверждается результатами расчета взаимных корреляционных функций индекса мерцаний, интенсивности ГКЛ, дисперсии ММП, потока протонов с энергией ~1 МэВ и скорости солнечного ветра для экстремальной ситуации в марте-апреле 2001 г. (рис. 5.13).

Рис. 5.12 Квазипериодический характер параметров солнечного ветра в апрельских событиях 2001 г.: дисперсия, B_z-компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, поток протонов с энергией ~1 МэВ

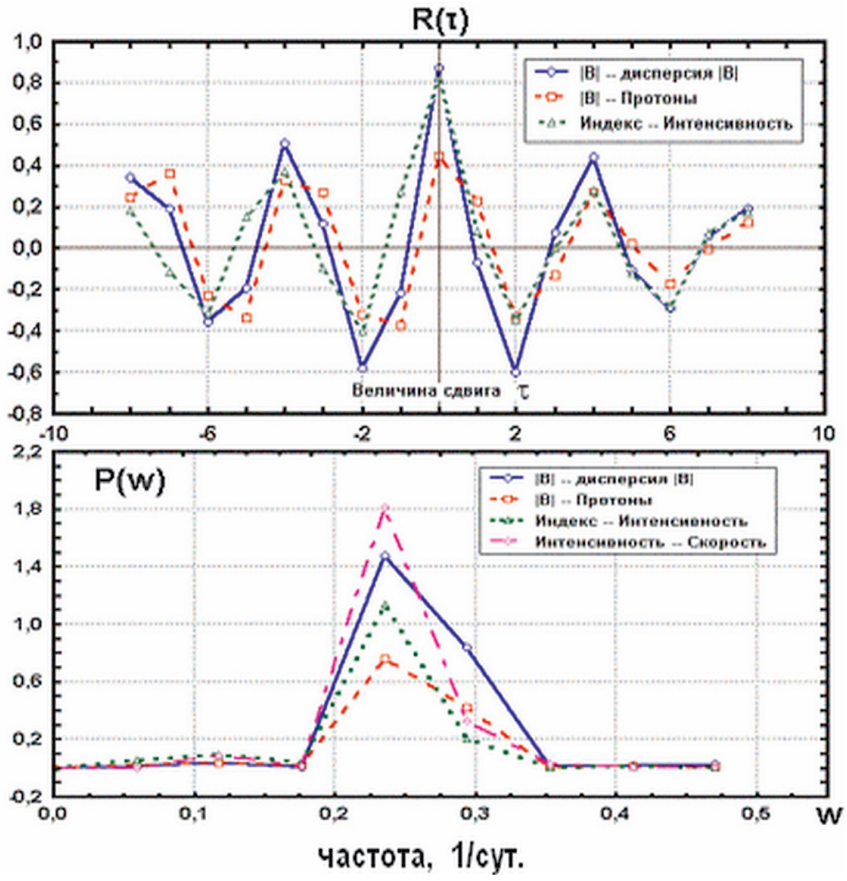


Рис. 5.13. Результаты расчета взаимных корреляционных функций (в верхней части рисунка) и спектров мощности (внизу) индекса мерцаний, интенсивности ГКЛ, дисперсии ММП, потока протонов с энергией ~1 МэВ и скорости солнечного ветра для экстремальных событий в марте-апреле 2001 г.

И во взаимной корреляционной функции анализируемых параметров и в кросс-спектре доминирует волна активности с квази-недельным периодом. То же самое имело место и в случае не менее экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 г. Если в геомагнитно-спокойный период в индексе мерцаний и параметрах солнечного ветра в начале октября регистрируется рекуррентная, 27-дневная вариация, то в последней декаде октября и в начале ноября доминирует та же квази-недельная вариация (рис. 5.14).

Таким образом, на фазе роста солнечной активности происходит структурная перестройка гелиосферного тового слоя, в результате чего

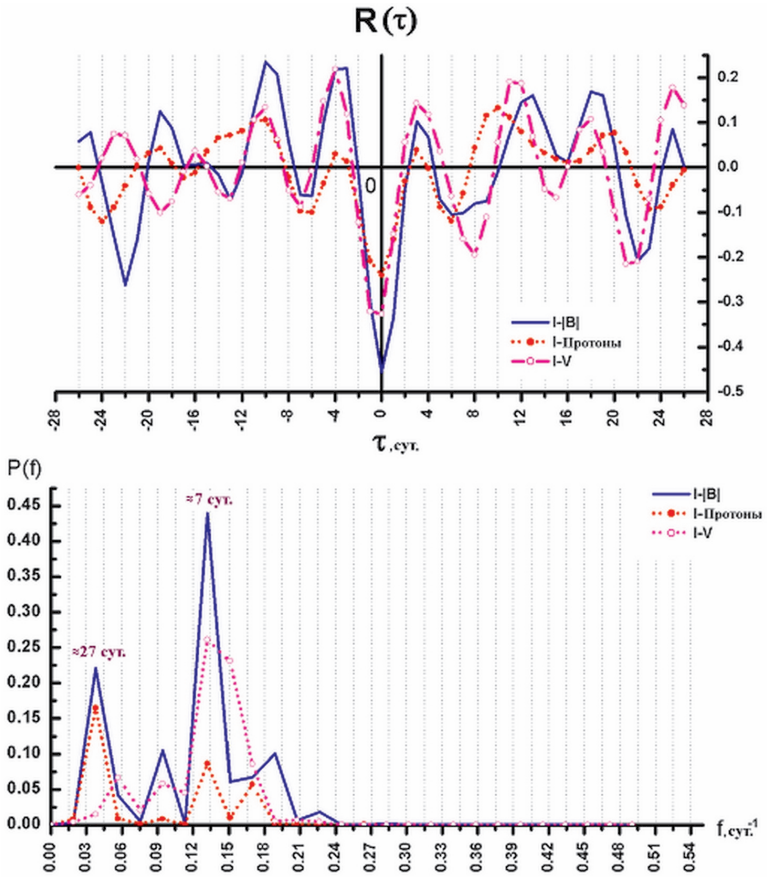


Рис. 5.14 Взаимные корреляционные функции (в верхней части рисунка) и спектры мощности (внизу) индекса мерцаний ГКЛ, дисперсии ММП, потока протонов с энергией ~1 МэВ и скорости солнечного ветра для экстремальных событий в марте-апреле 2001 г.

появляются более высокочастотные гармоники относительно основной – 27 суток. Подобная «волнистость» нейтральной линии раздела полярностей ГТС обусловлена вкладом квадрупольной компоненты магнитного поля /31/. Именно в этот период 27-дневная рекуррентность сменяется рекуррентностью в 13–14 суток и, далее, до квази-недельной волны активности, о которой говорилось выше в пп. 5.4. В этой ситуации, прогнозы, основанные на предположении стационарности режима истечения солнечного ветра, явно «не срабатывают». И потому, наиболее приемлемым оказывается адаптивный подход, основанный на

идеологии мониторинга. В данном случае, на мониторинге космических лучей, где мы, образно говоря, «держим руку на пульсе» Солнца.

Резюме к главе 5

5.1. Введен спектрально-временной индекс мерцаний космических лучей. В итоге, громоздкая трехмерная амплитудно-частотно-временная диаграмма динамического спектра флуктуаций ГКЛ сведена к *двумерной* числовой последовательности, а трудоемкая процедура определения показателя наклона спектра и доверительных интервалов к нему заменяется применением достаточно простого критерия наличия тренда в числовом ряде.

5.2. Установлено, что высокочастотный предвестник крупномасштабного возмущения регистрируется, как минимум, за двое суток *до начала* эффекта Форбуша. В начале эффекта Форбуша **(**день «t_o**»)** приходит смещение максимума в низкочастотную область спектра, а в последующие дни низкочастотные гармоники доминируют (область «*следа*» за ударной волной с регулярным магнитным полем).

5.3 Количественное описание динамики флуктуаций ГКЛ позволило выявить структурную *перестройку* гелиосферного токового слоя, проявляющуюся в изменении рекуррентного (27 сут.) режима до 14±1 сут. и, далее, до волны активности с околонедельным периодом $T \approx 4 \pm 1$сут.

Литература к главе 5

1. Зарецкий Н.С., Малыгина Л.М. Влияние секторной границы межпланетного магнитного поля на геомагнитную активность. // Геомагнетизм и вэрономия. 1983. Т.23. N6. С. 1037.

2. Huddleston D.E., Woo R., Neugebauer M. Density Fluctuations in Different Types of Solar Wind Flow at 1 AU and Comparison with Resalts from Doppler Scintillation Measurements Near the Sun. // J. Geophys. Res. 1995. Vol.100. N A10. P. 19951-19956.

3. Yermolaev Yu.I.Signatures of Solar Corona Large-Scale Structure and Phenomena in the Heliosphere as Observed at 1 AU on the Prognoz-7 Satellite. // European Geophysical Society. Ann. Geophys. Part III. Space & Planet. Sci. 1995. Suppl. III. Vol. 14. P. 740.

4. Yermolaev Yu.I. Transport of Mass, Momentum and Energy by Different Types of Solar Wind Streams. // Space & Planet. Sci. 1995. Suppl. III. Vol.14. P. 741.

5. Веселовский И.С. Гелиосферные электроджеты. // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т.34. N4. С. 45-51.

6. Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Филиппов М.А. Влияние гелиосферного токового слоя на формирование ударных волн, вызываемых солнечными вспышками. // Тез. док. Всесоюзной конференции: Физика Солнца. Алма-Ата. 1987. С. 51.

7. Коржов Н.П., Боровик Л.В. Некоторые особенности распределения солнечных вспышек относительно гелиосферного тового слоя. // Тез. док. Всесоюзной конференции: Физика Солнца. Алма-Ата. 1987. С. 52.

8. Perez Enriqez R., Mendoza B. The Role of Flares, CMEs and CME Shocks in the Generation of Solar Energetic Proton Events. // Sol. Phys. 1995. Vol. 160. N2. P. 353-362.

9. Hundhausen A.J. Coronal observations – getting to the bottom of the geliospheric current sheet. Abstr. AGU Fal. Meet. San Francisco. Calif. 1992. Dec. 7-11. 1992. // EOS. 1992. Vol.73. N43. Suppl. P.437.

10. Burton M.E., Crooker N.U., Siscoe G.L. et al. Heliospheric current sheet inclinations: Relability of Global-Scale Determinations at 1 AU.: Abstr. AGU Fal. Meet. San Fracisco. Calif. 1992. // Eos. 1992. Vol.73. N43. Suppl. P. 431.

11. Hundhausen A.J. Sizes and Locations of Coronal Mass Ejections: SMM Observations from 1980 and 1984-1989. // J. Geophys. Res. 1993. Vol.98. NA8. P. 13177-13200.

12. Ванярха Н.Я. Восстановление конфигурации ГТС по геомагнитным данным. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. N1. С.133-137.

13. Shodhan-Shah S., Crooker N., Hughes J. et al. Heliospheric Curents Sheet inclinations: Predictions from Coronal Field Maps; Abstr. AGU Fal. Meet. San Francisco. Calif. Dec. 7-11. 1992. // EOS. 1992. Vol.73. N43. P. 431.

14. Webber W.R.,Lockwood J.A. The Wavy Current Sheat and its Effect Cosmic Rays; Abstr. AGU Fal Meet. San Francisco. Calif. Dec.7-14. 1992. // EOS. 1992. Vol.73. N43. Suppl. P. 434.

15. Bieber J.W., Chen J., Matthaeus W.H. Long-term Variations of Interplanetary Magnetic Field Spectra With Implications for Cosmic Ray Modulation. // J. Geoph. Res. Vol.98. N. A3. P. 3585-3603.

16. Eselevich V.G., and Filippov M.A. An Investigation of the Geliospheric Current Sheet (HCS) Structure. // Planet. Space Sci. 1988. Vol.36. N.2. P.105-115.

17. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений. Якутск.: ЯНЦ СО РАН. 1993. 164с.

18. Козлов В.И. О связи предпонижений эффектов Форбуша с прохождением границ секторов гелиосферного токового слоя. // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т.59. N4.

19. Wei F.S. Influence of the Geliospheric Current Sheet on the Propogation of Flare-associated interplanetary shock waves. // Proc. 1 SOLTIP Simp. Prague. 1992. Vol.2. P. 294-305.

20. Eselevich V.G., Uralova S.V., Uralov A.M. On the Damping of Shocks in the Solar Wind. // Proc. 1 SOLTIP Simp. Prague. 1992. Vol. 1. P. 110-118.

21. Уралов А.М. Некоторые вопросы физики солнечных активных областей и теории распространения ударных волн в солнечном ветре и атмосфере Земли. // Автореферат докт. дисс. Иркутск. ИСЗФ. 1994. 21 с.

22. Blanca Mendoza and Roman Perez-Enriquez. The Geoeffectivness of the Heliospheric Current Sheet. // Proc. of Eighth International Symposium on STEP. Part 1. Japan. 1994. P. 25.

23. Romashets E.P. and Ivanov K.G. Model of SW-TD Interactions and ITS Application to Heliospheric Substorm Observations. // European Geophysical Society. Annales Geophysical. Part III. Space & Plan. Sci. 1995. Suppl. III Vol.14. P. 739.

24. Bavassano B, Felici A, Storini M. et al. Travelling Interplanetary Perturbations and Related Phenomena. // Proc. of the First SOLTIP Symp. Liblice, Czechoslovakia. 1991. Vol.2. P. 14-19.

25. Nagashima K., Fujimoto K., Sakakibara S. et al. Local-time-dependent Pre-IMF-Shock Decrease and Post-Shock Increase of Cosmic Rays, Produced Respectively by their IMF-collimated Outward and Inward Flows Across the Sock Responsible for Forbush Decrease. // Planet. and Space Sci. Vol.40. N8. 1992. P. 1109-1137.

26. Козлов В.И. Взаимосвязь возрастаний интенсивности космических лучей 4-5 августа 1972 г. с динамикой спектра неоднородностей межпланетного магнитного поля. // В сб.: Исследования по космофизике и аэрономии. Якутск.: ЯФ СО АН. СССР. 1975. С. 49-61.

27. Козлов В.И. О структуре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций интенсивности космических лучей // Автореф. канд. дисс. М. 1984. 20с.

28. Burlaga L., Sittler E., Mariani F. et al. Magnetic Loop Behind and Interplanetary Shock: Voyager, Helios and IMP & Observations. // J. Geophys. Res. 1981. Vol.86. P. 6673-6684.

29. Sanderson T.R., Beeck J., Marsden R.G. et al. Cosmic Ray, Energetic Ion and Magnetic Field Characteristics of a Magnetic Cloud. // Proc. 21 ICRC. Adelaide. 1990. Vol.6. P. 251-258.

30. Козлов В.И. Флуктуации космических лучей в межпланетном пространстве // Автореферат докт. диссертации. Иркутск – Якутск. ИКФИА – ИСЗФ. 2000. 23 стр.

31. Sunderson T.R., Appourchaux T., Hoeksema J.T., Harvey K.L. Observations of the Sun`s magnetic field during the recent solar maximum // J. Geophysical Res. 2003. V. 108. No. A1. P. 1035.

Глава 6. СКЕЙЛИНГОВЫЕ СВОЙСТВА ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ В ОКРЕСТНОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

6.1. Скейлинговые свойства динамики флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла

Сохранится ли обнаруженная во время форбуш-понижений динамика частотного спектра флуктуаций ГКЛ на больших интервалах усреднения, и каков, в общем случае, характер структуры понижений интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла? Ниже, представлены результаты спектрально-временного анализа флуктуаций интенсивности ГКЛ по 5-мин данным нейтронного монитора б. Тикси за два неполных 11-летних цикла солнечной активности № 21-22 (1980–1992 гг.). Длина реализации для расчета спектра мощности составляет 1 сут. Смещая суточную длину реализации по ходу времени на 1 час, получаем часовые значения индекса мерцаний. Индекс мерцаний относится к последнему часу текущих суток. Затем индексы мерцаний и интенсивность ГКЛ были усреднены за 1 сутки и, далее, за 27 суток. В итоге, каждое среднеоборотное значение индекса мерцаний представляет собой результат усреднения по 648 часовым значениям индекса, и так за весь цикл СА с 1980-1992 гг. Для устойчивости оценок полученные данные сглажены по 3 точкам методом скользящего среднего.

На рис. 6.1 приведены графики среднеоборотных значений интенсивности ГКЛ – пунктирная кривая (шкала справа) и спектрального

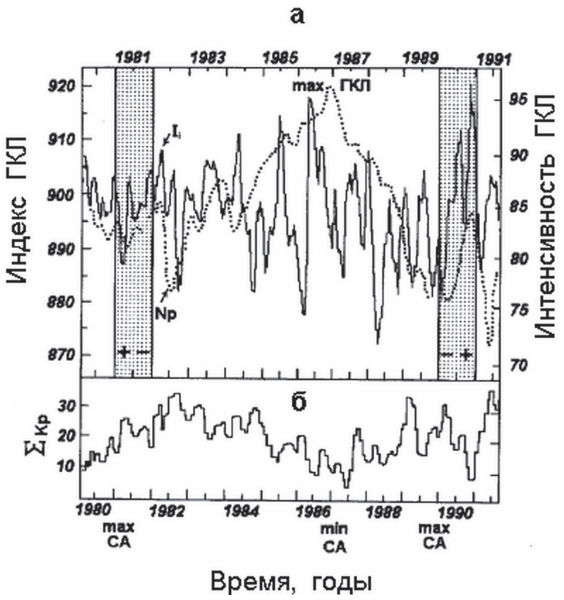


Рис. 6.1. Графики среднеоборотных значений интенсивности ГКЛ в относительных единицах – пунктирная кривая (шкала справа) и спектрального индекса мерцаний – сплошная кривая (шкала слева). Ниже, представлены соответственно данные по K_p-индексу. Временной ход интенсивности космических лучей, в целом, описывает обычную ее зависимость с циклом СА. Резкие и глубокие минимумы интенсивности ГКЛ в 1982 г. и 1991 г. обусловлены вкладом серии мощных эффектов Форбуша

индекса мерцаний – сплошная кривая. Ниже, представлены соответственно данные по K_p-индексу. Временной ход интенсивности ГКЛ в целом, описывает обычную ее зависимость с циклом СА. Резкие и глубокие минимумы интенсивности ГКЛ в 1982 г. и 1991 г. обусловлены вкладом серии мощных эффектов Форбуша. Подобные серии регистрируются обычно в начале ветви спада 11-летнего цикла. В это же время (1982 и 1991 гг.) регистрируются и максимумы среднегодовых значений K_p-индекса геомагнитной активности. Подобие поведения вариаций (и их огибающих) в моменты переполюсовок наиболее наглядно видно из рис. 6.2. Как и в случае форбуш-понижений, огибающая вариаций среднеоборотных значений индекса мерцаний описывает макроструктуру профиля глубокого понижения интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла, а сами вариации индекса мерцаний – его тонкую структуру, обусловленную полугодовыми вариациями. На это указывают периоды доминирующих вариаций индекса мерцаний – 1 год и 1/2 года, определенные методом корреляционно-спектрального анализа (рис. 6.3). Характерная динамика – монотонный рост амплитуды огибающей вариаций индекса мерцаний проявляется до начала резкого и глубокого понижения интенсивности ГКЛ в 1982 и 1991 гг. Причем,

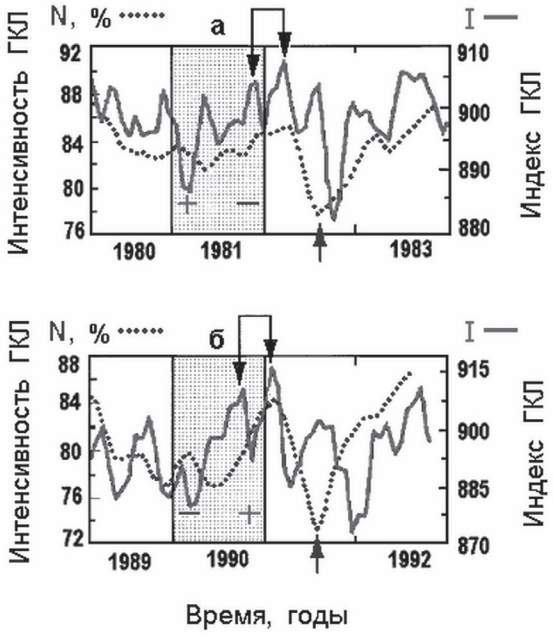


Рис. 6.2. Раздельное (по циклам) представление 27-дневных значений интенсивности космических лучей и индекса мерцаний, относительно периода смены знака общего магнитного поля Солнца в 21 и 22 циклах

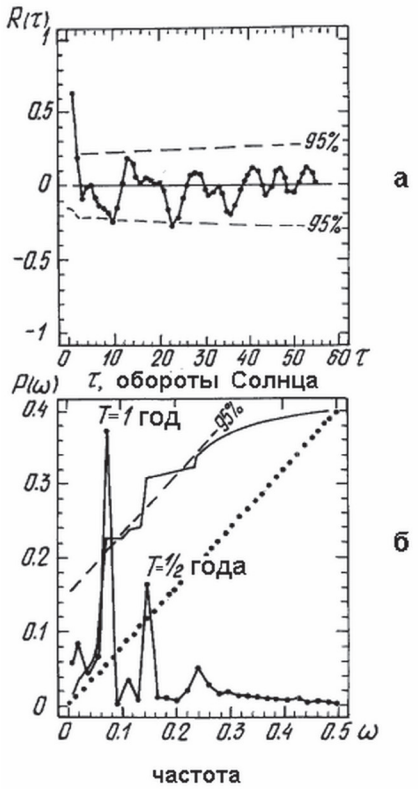


Рис. 6.3. Результаты корреляционно-спектрального анализа 27-дневных значений индекса мерцаний космических лучей за оба цикла 21 и 22. В спектре на уровне 95% доминируют полугодовая и годовая вариации

одновременно с ростом в среднем амплитуды огибающей уменьшается период вариаций индекса. Годовые и полугодовые вариации индекса мерцаний ГКЛ с периодами 13-14 и 6-7 оборотов, соответственно, проявляются в спектре мощности в виде двух (кратных) гармоник на 95% уровне значимости.

Представляет очевидный интерес получить доказательства достоверности наличия полугодовой (и годовой вариации) по данным прямых измерений на космических аппаратах. Наибольший интерес представляют такие параметры, как дисперсия межпланетного магнитного поля и потоки низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией ~1 МэВ. Предварительно, в данных была исключена 11-летняя вариация. Результаты корреляционного анализа этих параметров указывают на достоверность полугодовой и годовой вариации (рис. 6.4), причем, одновременно и в индексе мерцаний ГКЛ (рис. 6.5). Наиболее наглядно

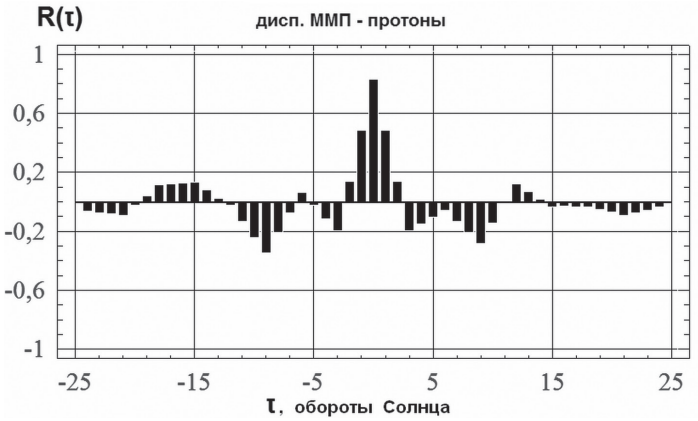


Рис. 6.4. Взаимная корреляционная функция между дисперсией ММП и потоком низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией ~1 МэВ. По оси абсцисс – величина сдвига по времени τ. Величина коэффициента кросс-корреляции R = 0,8

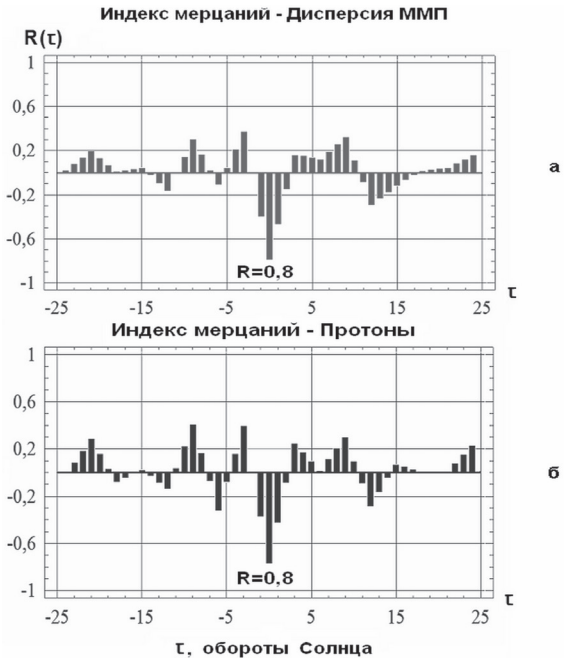


Рис. 6.5. Взаимные корреляционные функции между индексом мерцаний ГКЛ и дисперсией ММП (верхняя часть рисунка) и между индексом мерцаний и потоком низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией ~1 МэВ. По оси абсцисс – величина сдвига по времени τ. Величина коэффициента кросс-корреляции в обоих случаях R = 0,8

это видно по результатам кросс-спектров их взаимных корреляционных функций (рис. 6.6).

Для оценки корреляционных связей между индексом мерцаний, интенсивностью ГКЛ и величиной K_p-индекса, был также исключен тренд в данных, обусловленный 11-летней вариацией. Результаты взаимного корреляционного анализа индекса мерцаний и интенсивности ГКЛ за солнечный цикл 1980-1991 гг. приведены на рис. 6.7. Коэффициент взаимной корреляции $R_{max}(\tau) \approx 0.7$ при числе коррелируемых точек $n = 160$, соответствует 99% уровню значимости. Притом, максимум $R_{max}(\tau) \approx 0.7$ достигается при положительном сдвиге порядка $\tau \sim 1$ оборота Солнца (точечная кривая). Аналогичный расчет взаимной корреляционной функции (ВКФ) между индексом мерцаний и K_p- индексом приведен на

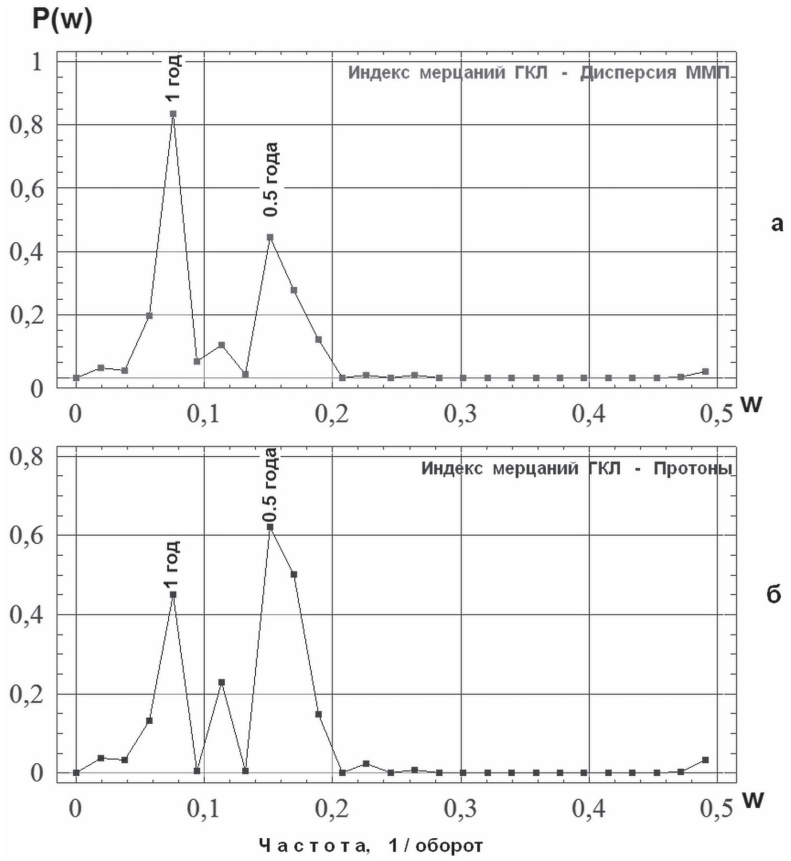


Рис. 6.6. Кросс-спектры между индексом мерцаний ГКЛ и дисперсией ММП (верхняя часть рисунка) и между индексом мерцаний и потоком низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией ~1 МэВ

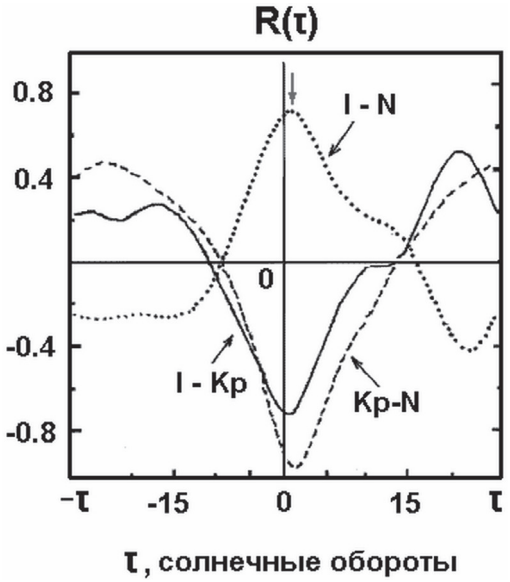


Рис. 6.7. Результаты взаимного корреляционного анализа: между индексом мерцаний и интенсивностью космических лучей (I-N), индексом мерцаний и K_p-индексом геомагнитной активности (I-K_p). Коэффициент взаимной корреляции $R_{max}(\tau) \approx -0.7$ при числе коррелируемых точек n=160, соответствует 99% уровню значимости. Максимум $R_{max}(\tau) \approx -0.7$ достигается при положительном сдвиге порядка $\tau \sim 1$ оборота Солнца (точечная кривая). Величина антикорреляции индекса мерцаний и K_p-индекса составляет величину $R_{max}(\tau) \approx -0.7$ (на уровне значимости 99%)

этом же рис. 6.7 (сплошная кривая). Величина антикорреляции индекса мерцаний и K_p-индекса составляет величину $R_{max}(\tau) \approx -0.7$ (на уровне значимости 99%).

Это означает, что максимум геомагнитной возмущенности регистрируется при низких значениях индекса мерцаний. С целью контроля, пунктирной линией показана взаимная корреляционная функция между K_p-индексом и интенсивностью ГКЛ. Как и следовало ожидать, имеет место высокая ($R \approx -0{,}9$ на уровне значимости $P \approx 99\%$) антикорреляция между геомагнитной активностью и интенсивностью ГКЛ. Очевидно, что индекс мерцаний растет на фазе роста интенсивности ГКЛ (предповышения), достигая своего максимума до начала понижения. Минимальное значение индекс мерцаний достигает, как правило, в минимуме понижений интенсивности ГКЛ. Только подобная «сфазированность» индекса мерцаний и интенсивности ГКЛ на стадии подобных предповышений и понижений может сохранить стабильность сдвига фазы между индексом мерцаний и интенсивностью ГКЛ обеспечивая, тем самым, высокий коэффициент корреляции между ними в течение всего цикла.

Достоверность полученных выше результатов подтверждается также расчетом индекса мерцаний ГКЛ по данным обсерватории Оулу. С целью удобства сопоставления индексов по станциям Тикси и Оулу (Финляндия), 27-дневные значения индекса мерцаний были предварительно усреднены по 3 оборотам Солнца. Результаты расчетов Индекса мерцаний за 21-22 циклы представлены на рис. 6.8. Общность вариаций индекса мерцаний по данным разных станций в

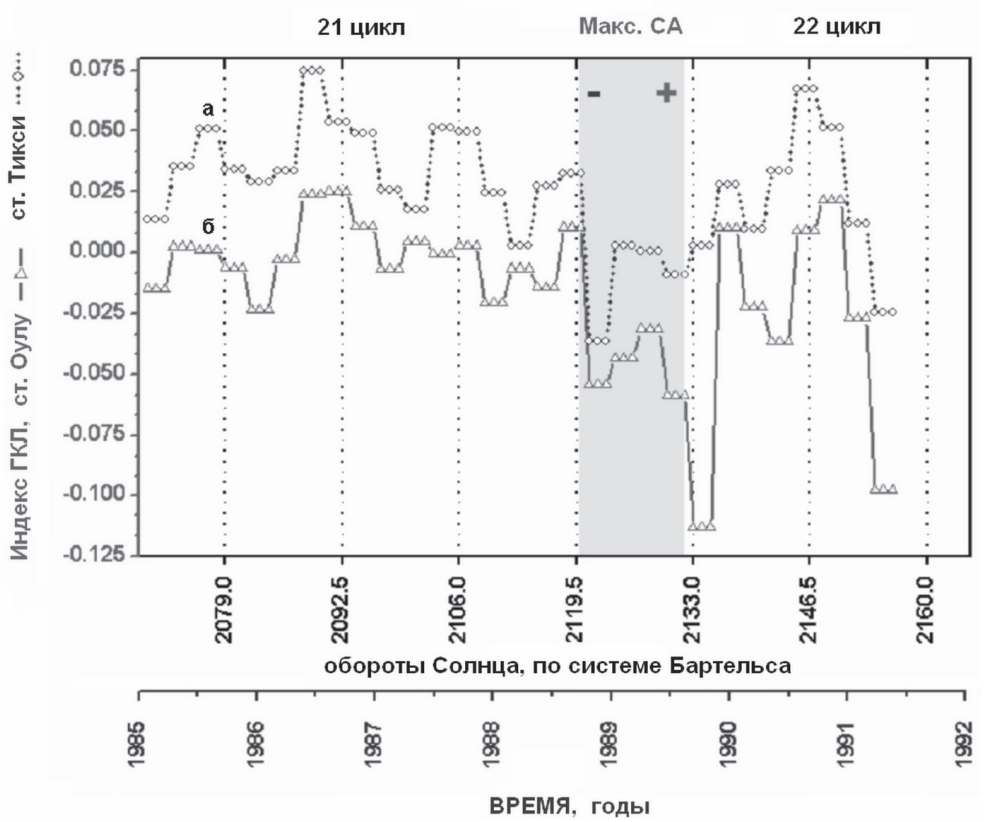


Рис. 6.8. Результаты сопоставления расчета индекса мерцаний в циклах 21-22 циклах солнечной активности по данным ст. Тикси (верхняя кривая) и ст. Оулу (нижняя кривая). По оси времени – номера оборотов Солнца по системе Бартельса (верхняя шкала абсцисс) и годы (нижняя шкала)

течение 11-летнего цикла достаточно очевидна (коэффициент корреляции $R \approx 0{,}7$). Убеждение в достоверности результатов расчета индекса мерцаний, важно для последующего анализа, в результате которого будет сделан важный (пока еще предварительный) вывод об обнаружении эффекта увеличения длительности 11-летней цикличности в 23 цикле, начавшегося в конце цикла № 22. Это следует из результаов вейвлет-анализа 11-летней вариации за 4 неполных цикла №№ 20-23 (рис. 6.9). Важно, что вейвлет-анализ позволяет определить время начала появления низкочастотной «подложки» в глобальном спектре 11-летней вариации, показанного в правой части рис. 6.9.

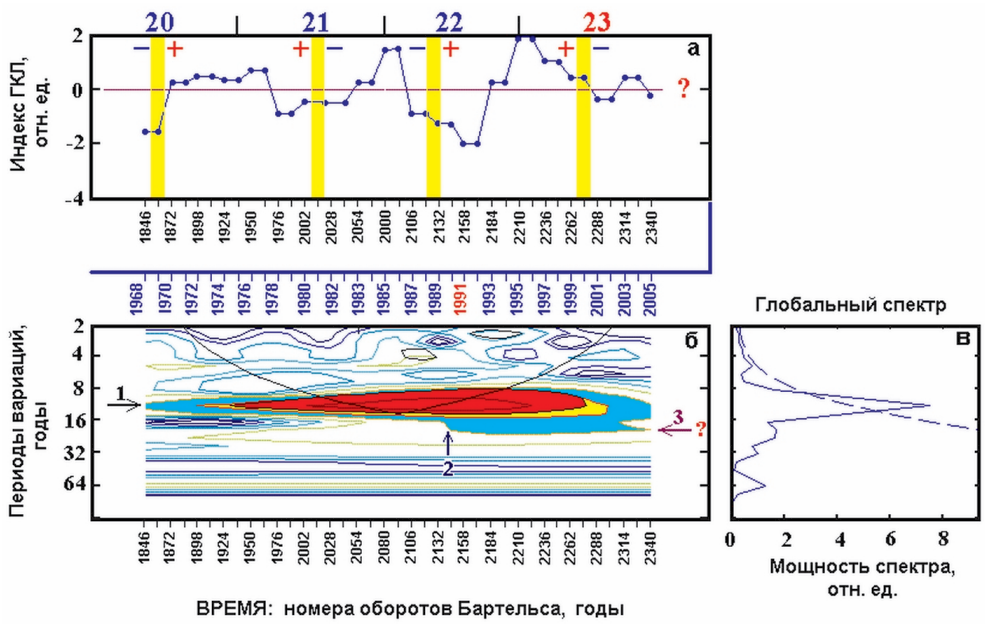


Рис. 6.9. Результаты вейвлет-анализа годовых значений индекса мерцаний ГКЛ. Вверху – временной ход индекса мерцаний с 1968–2005 гг. Ниже, амплитудно-частотно-временная диаграмма эволюции 11-летней вариации за исследуемый период. Справа – глобальный, в целом, спектр вариаций. Внизу – огибающая амплитуд вариаций. Горизонтальной стрелкой слева, показано местоположение 11-летней вариации на диаграмме вейвлет-анализа. Вертикальная стрелка, указывает на начало увеличения периода 11-летнего цикла в конце цикла № 22. Условно, показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца

6.2 Количественная оценка скейлинговых свойств наблюдаемой динамики.

*«Фрактальный объект часто возникает в **пограничной** области меду порядком и хаосом».*

Деменок С.Л. «ФРАКТАЛ: между мифом и ремеслом». СПб. 2011. Стр. 59.

Количественная оценка скейлинговых свойств процесса достигается применением специальных методов анализа, сведения о которых приведены выше в главе 3 (п. 3.5). В соответствии с процедурой Такенса и Грассбергера-Прокаччиа /1,2/, обозначим через $x_{i,}$ точку фазового пространства с координатами $\{x_0(t_i)...,x_{n-1}(t_i+(n-1)\tau\}$. Так устанавливается начало отсчета x_i для всех имеющихся данных. Следовательно, можно

вычислить расстояние $|x_i - x_j|$ от этой точки до остающихся $N - 1$ точек. Это позволяет сосчитать число точек в фазовом пространстве отстоящих от x_i на расстоянии не превышающее некоторую заданную величину r. Повторяя этот процесс для всех значений i, можно вычислить интегральную корреляционную функцию $C(r)$. Отклонение $C(r)$ от нуля служит мерой влияния точки x_i на положение других точек. Далее, в соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 3.5, строим:

а) ряд зависимостей $\ln C_n(r)$ от $\ln r$ для каждого возрастающего значения размерности исходного фазового пространства n;

б) определяем наклон d вблизи начала координат для всех построенных кривых $\ln C(r)$ от $\ln r$;

в) строим зависимость $d(n)$. Вышедшую на насыщение величину d' и следует рассматривать, как размерность аттрактора.

Значение n', выше которого наблюдается насыщение, представляет собой минимальное число переменых необходимое для моделирования процесса соответствующего данному аттрактору размерности d'. При этом, $n' \approx d' + 1$.

Исследование статистического распределения числа форбуш-понижений с амплитудами $A \geq 1{,}5\%$ в цикле СА по данным нейтронного монитора ст. Алерт проведенное авторами работы /3/ показало, что максимум распределения числа эфф. Форбуша приходится на ветви спада солнечной активности. Этим, скорее всего, и обусловлены резкие (на фоне 11-летнего цикла) понижения интенсивности ГКЛ в 1982 и 1991 гг. (см. рис. 6.2). Известно, что корональные выбросы массы (СМЕ), являются источником ударных волн и магнитных облаков. Их число увеличивается при распаде крупномасштабных магнитных полей на ветви спада 11-летнего цикла /4/. В работе /5/ отмечалось необычное (с общепринятой точки зрения) поведение процентного содержания ударных волн обусловленных СМЕ-событиями и областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра на ветви спада СА. Подчеркивалось, в частности, что максимум процентного содержания ударных волн от обоих источников приходится на ветвь спада 11-летнего цикла. В работе /6/, отмечается запаздывание максимума потока солнечных протонов с $\varepsilon > 10$ МэВ на 2-3 года после максимума солнечной активности.

В этой связи, наибольший интерес представляет определение корреляционной размерности вариаций индекса мерцаний на ветвях спада 11-летнего цикла. Зависимость корреляционной размерности $d(n)$для среднеоборотных, (27-дневных) значений индекса мерцаний за два неполных цикла солнечной активности с 1980-1991 гг. приведена на рис. 6.10.

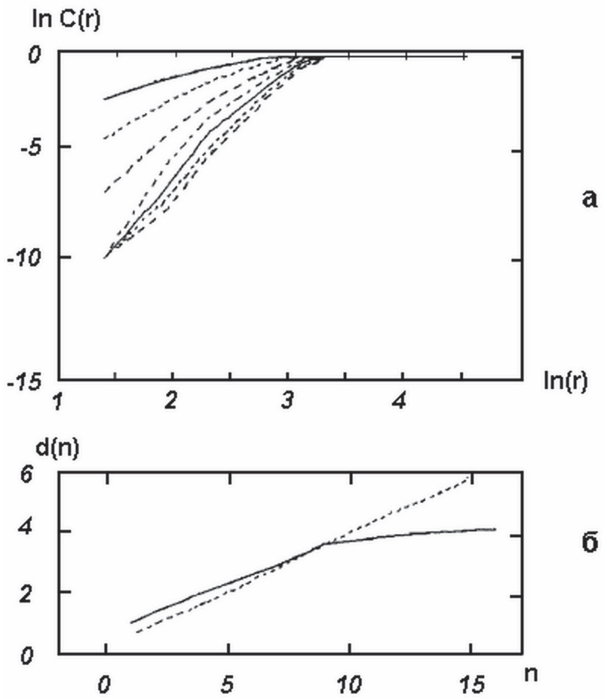


Рис. 6.10. Зависимость корреляционной размерности $d(n)$ для среднеоборотных, (27-дневных) значений индекса мерцаний за два неполных цикла солнечной активности с 1980-1991 гг. Выход кривой $d(n)$ на плато, или излом кривой достигается при $d \approx 4$, где n – размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства

Излом кривой $d(n)$ достигается при $d \approx 4$. Дополнительный анализ раздельно по фазам 11-летнего цикла показал, что наибольший вклад в конечность величины корреляционной размерности дает окрестность максимума и начало геоэффективной ветви спада 11-летнего цикла с 1980-1983 гг., где $d = 2{,}5 \pm 0{,}3$ и с 1989-1992 гг., где $d = 2{,}5 \pm 0{,}1$ (рис. 6.11 /7/). Поведение зависимости $d(n)$ на данной фазе 11-летнего цикла заведомо отлично от случайного процесса. В обоих случаях выход на плато достигается в интервале $d \approx 2{,}5–3$.

Как показано в работе /8/, по мере удаления от Солнца, магнитные облака (продолжая расширяться) вступают в нелинейное взаимодействие. В результате, формируются крупномасштабные фрактальные структуры – суперкластеры, построенные из магнитных облаков точно также как сами магнитные облака построены из магнитных силовых трубок. Следовательно, суперкластеры являются монофрактальными объектами. На эффект кластеризации СМЕ-событий на ветви спада СА

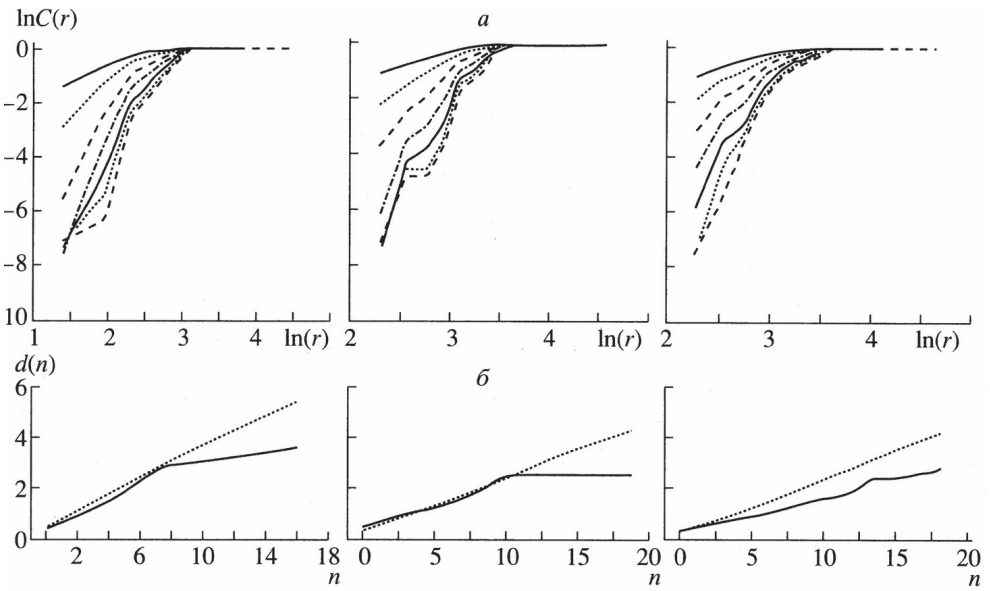


Рис. 6.11. Результаты расчета интегральных корреляционных функций C(r) в двойном логарифмическом масштабе (в верхней части рисунка) и зависимостей d(n), в нижней части рисунка, для ветвей спада 11-летнего цикла 1980-1983 гг. (слева), 1989-1992 гг. (в средней части рисунка) и для эпохи минимума солнечного цикла 1985-1987 гг. (справа). Размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства – n

указывается также в работе /9/. Более того, авторы работы /10/ утверждают, что наиболее мощные понижения интенсивности ГКЛ 1991 г. представляют собой не столько статистические кластеры связанные с мультифрактальным характером магнитного поля, сколько детерминированные (читай, монофрактальные) объекты. В этой связи, также важным является вывод авторов работы /11/ о существенной «волнистости» ГТС на ветвях спада 1982-1984 и 1991-1994 гг.

Напротив, вблизи минимума и в минимуме СА (период 1984-1987 гг.) плато размыто и зависимость $d(n)$ характерна скорее для случайного процесса /7/ (рис. 6.11). Очевидно, размывание плато и монотонное увеличение размерности означает хаотизацию процесса. Увеличение размерности (и, соответственно, уменьшение показателя спектра флуктуаций /12/), указывает на восстановление мелкомасштабных неоднородностей ММП ближе к минимуму СА. Восстановление же мелкомасштабных неоднородностей ухудшает модуляционные свойства магнитного поля /13/, что должно проявиться в уменьшении

глубины модуляции интенсивности ГКЛ. Это согласуется с ужестчением энергетического спектра эффекта Форбуша /14/, их дефицитом в эпоху минимума СА /11/ и малой глубиной модуляции интенсивности ГКЛ рекуррентными возмущениями, доминирующими в указанный период /15,16/.

6.3 Обнаружение переходного колебательного процесса переполюсовки общего магнитного поля Солнца.

На необходимость возобновления корреляционного, структурного подхода в исследовании параметров солнечного ветра указывалось ранее в работе И.С. Веселовского /17/. В свое время, подобный структурный подход был в значительной мере вытеснен изучением спектральных свойств турбулентности. Структурный подход в изучении свойств резких неоднородностей ММП и солнечного ветра, отмечается в /17/, требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований и, в особенности, корреляционных наблюдений различных параметров для уточнения картины распределения электрических токов в гелиосфере.

Подобные корреляционные исследования чисел Вольфа и интенсивности ГКЛ с характеристиками турбулентности ММП, индексами геомагнитной активности и углом наклона ГТС в цикле СА проведены в работе /18/. Большая часть результатов этой работы имеет отношение к выводам настоящего исследования. По данным прямых измерений на космических аппаратах вычислены спектры мощности флуктуаций ММП за длительный период с 1965-1988гг. Анализируется поведение спектров мощности низкочастотной турбулентности поля ММП и показателя спектра флуктуаций α с циклом СА. Приведенные в работе /18/ результаты также указывают на запаздывание, в среднем, на 2 года как максимума спектра мощности ММП, так и магнитуды среднего магнитного поля межпланетной среды относительно максимума солнечного цикла. Там же показано, что показатель спектра мощности флуктуаций ММП действительно уменьшается ближе к эпохе минимума 11-летнего цикла, достигая минимальной величины непосредственно в эпоху минимума. Уплощение спектра флуктуаций ММП по мере приближение к эпохе минимума СА в том же частотном интервале (периоды 10-40 мин), отмечается и в работе /19/.

Вывод авторов о выявлении геоэффективной фазы распада 11-летнего цикла на интервале времени $\tau = t_{max} + (2\pm1\text{год})$ /20,21/, подтверждается и данными наблюдений общего магнитного поля Солнца во время фазы падения активности в 22 цикле. Подчеркивается, например, что большие взрывы активности в середине 1972, 1982 и 1991 гг.

есть не что иное как «last gasp» /22/ (дословно – «последнее издыхание») активности Солнца перед переходом в другое, состояние (читай, геоэффективная фаза переполюсовки 11-летнего цикла).

Именно на геоэффективную фазу переполюсовки 11-летнего цикла $\tau = t_{max} + (2 \pm 1 \text{год})$ приходится главный максимум спорадической активности Солнца, проявляющийся в увеличении числа рентгеновских вспышек, числа солнечно-протонных событий, наиболее интенсивных вариаций угла наклона ГТС, увеличения модуля напряженности ММП, изменчивости B_z-компоненты, скорости плазмы солнечного ветра, частоты появления геомагнитных бурь и эфф. Форбуша /23-32/. Исследования изменчивости углового размера солнечного диска проведенные в /33/ привели к выводу, что максимум углового размера радиуса Солнца достигается в 1982 и 1991 гг., т.е. также на ветвях спада 11-летнего цикла.

Что касается связи резких и экстремально больших понижений интенсивности ГКЛ 1972, 1982 и 1991 гг. с такими же резкими увеличениями угла наклона ГТС, то в работе автор работы /34/ признает, что приемлемого объяснения этому в настоящее время нет. Принято считать, что экстремально большие понижения интенсивности ГКЛ, наблюдаемые преимущественно на ветвях спада 11-летнего цикла, обусловлены так называемыми GMIR (а также, LMIR и CMIR) или, другими словами, глобальными (или локальными) коротируюшими областями взаимодействия разноскоростных потоков – своеобразных «магнитных барьеров» регистрируемых далеко ($R > 10$ а.е.) в межпланетной среде /34,35/.

С другой стороны, выявлены долгопериодные вариации возрастаний скорости солнечного ветра. Высказано предположение, что они связаны с фундаментальными вариациями коронального поля Солнца /36/. Скорее всего, именно они ответственны за экстремально большие возмущения в 1982 и 1991 гг. /37/. Начинающийся с переполюсовок магнитного поля в 1971, 1981 и 1990 гг. распад крупномасштабного магнитного поля Солнца и является, очевидно, источником подобных возрастаний скорости. Именно в 1972, 1982 и 1991 гг. наблюдается максимальная спорадическая активность Солнца, максимальная величина модуля напряженности и спектров мощности ММП, наиболее интенсивные вариации угла наклона ГТС и изменчивость B_z-компоненты поля, увеличивается число мощных эффекта Форбуша и магнитных бурь.

Ранее, например, в работе /38/ уже отмечалось, что «традиционный отсчет фаз 11-летнего цикла от эпохи его минимума является формальным и не имеет достаточного физического основания. Поскольку основой солнечной цикличности являются вариации магнитного поля Солнца в глобальном масштабе, было бы более естественным вести отсчет этого процесса от времени окончания переполюсовки полярного

магнитного поля. Это подкрепляется также выводом А.И. Оля о зарождении нового 11-летнего цикла в недрах старого (в традиционном смысле) практически именно в это же время». Таким образом, начало нового цикла фактически следует отнести ко времени окончания геоэффективной фазы переполюсовки текущего 11-летнего цикла, после которого наступает латентная фаза нового цикла, длящаяся вплоть до явной фазы роста СА.

На различный характер энерговыделения магнитного поля Солнца на фазе роста и спада СА указывалось в работе /39/. «Два максимума свечения зеленой линии короны на фазе роста и спада СА являются откликом на два различных (по типу симметрии) выноса на поверхность глобального поля Солнца, увеличивающих энергию магнитного поля в короне. Циклы СА формируются из слабоосцилирующей дипольной и сильноосцилиррующей квадрупольной мод со сдвигом фазы примерно в 30 оборотов Солнца. Первой возбуждается дипольная мода на 40 обороте после минимума активности (фаза роста 11-летнего цикла). На 70 обороте после минимума (фаза спада солнечного цикла) возбуждается сильная квадрупольная мода. Подобная зависимость была прослежена не только по свечению зеленой корональной линии, но и по площадям больших пятен, вспышкам и геомагнитным возмущениям для разных циклов СА и поэтому может считаться свойством всех солнечных циклов /39/». В работе /40/ отмечается тесная связь частоты появления корональных выбросов массы на ветвях спада 11-летнего цикла с изменением крупномасштабной структуры глобального магнитного поля Солнца. Достаточно очевидно резкое изменение режима активности на ветви спада 11-летнего цикла. Наиболее выражен этот эффект для магнитного потока открытых сверхгигантских гранул выходящего в межпланетное пространство.

Наиболее предпочтительными, по мнению авторов, являются представления о характере вариаций магнитного поля Солнца, развитые в работе Куклина Г.В. /41/. В результате анализа поведения дипольной части общего магнитного поля Солнца им выделены глобальный полярный диполь U, характеризующийся медленной вариацией с продолжительностью 20-22 года и совокупность эфемерных экваториальных диполей (ЭЭД) V, с временем жизни от 3 до 19 кэррингтоновских оборотов сменяющих друг друга и приводящих к перестройкам секторной структуры ММП. В экстремумах циклов, когда $|dU/dt| \approx 0$, V – мало по амплитуде и испытывает флуктуации малой продолжительности. Напротив, на ветвях роста и спада цикла, когда $|dU/dt| \sim \max$, V испытывает изменения значительные по амплитуде и продолжительности (читай, геоэффективные фазы цикла). Было показано также, что процесс эво-

люции ЭЭД достаточно регулярен и слабо искажается шумами. Лишь на масштабах порядка длительности цикла, V становится хаотичным.

Также интенсивно обсуждается проблема: описывается ли поведение солнечной активности низкоразмерным аттрактором? В работе /42/ утвердительного ответа на этот вопрос не получено. Возможно, это связано с малой информативностью чисел Вольфа. Так, в /43/ отмечается, что числа Вольфа из-за специфического правила своего подсчета, вряд ли могут быть гладкой функцией истинной динамической переменной. Действительно, правдоподобная оценка фрактальной размерности за цикл СА получается лишь по индексу мерцаний космических лучей (рис. 6.12). Ни просто по интенсивности ГКЛ, ни по числам Вольфа корректную оценку получить не удается. С другой стороны, в работе /36/, для среднемесячных значений чисел солнечных пятен за длительный период 1885-1992 гг. получена оценка $d = 2{,}8 \pm 0{,}1$. Таким образом, поведение солнечной активности в 11-летнем цикле если и описывается малоразмерным аттрактором, то лишь на геоэффективной фазе переполюсовки 11-летнего цикла. Именно на это указывает выход зависимости $d(n)$ на плато при $d \approx 2{,}5–3$ для разных циклов по флуктуациям космических лучей /7/. С точки зрения теоретического обоснования прогноза геоэффективной фазы солнечного цикла, полученное нами низкое и конечное значение корреляционной размерности играет роль своеобразной «теоремы существования». Напротив, на фазе минимума 11-летнего цикла (1985-1987 гг.) – процесс существенно хаотический: $d(n) \sim n$, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

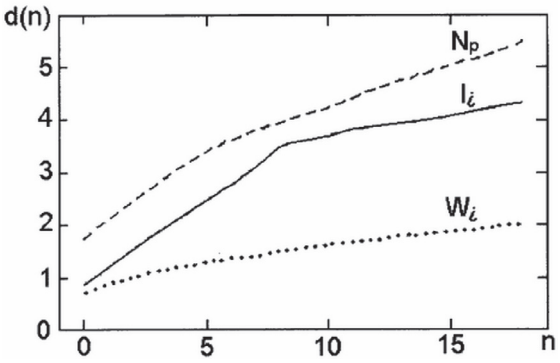


Рис. 6.12. Зависимость корреляционной размерности d(n) для среднеоборотных, (27-дневных) значений интенсивности космических лучей, индекса мерцаний и чисел Вольфа за два неполных цикла солнечной активности с 1980-1991 гг. Насыщение кривой d(n) достигается лишь для индекса мерцаний космических лучей (при d ≈ 4). Размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства – n

По-видимому, смешение различных режимов (геоэффективных фаз роста и спада предыдущего и латентной фазы нового цикла) и дает завышенную оценку фрактальной размерности ($d \approx 4$) за цикл в целом (см. рис. 6.10, 6.12). Кажущаяся сложной, структура низкоразмерного

аттрактора на геоэффективной фазе переполюсовки 11-летнего цикла является более упорядоченной, по сравнению с хаотическим (а потому и наиболее сложным /44,45/) режимом турбулентности на фазе минимума. Следовательно, хаотическая, в целом, динамика поведения СА перемежается режимом низкоразмерного аттрактора доминирующего на геоэффективной фазе завершения переполюсовки 11-летнего солнечного цикла. Очевидно, что эти своеобразные «окна порядка» в хаотической, в целом, динамике СА и соответствует подобным переходным режимам с низкой размерностью /46/.

Выявление низкоразмерного процесса в вариациях индекса мерцаний ГКЛ, является указанием на принципиальную возможность прогноза периодов максимальной спорадической активности Солнца. А именно фаза завершения переполюсовки, как наиболее геоэффективная, и представляет интерес в плане прогноза экстремальных проявлений Космической погоды. Вывод о принципиальной возможности прогноза геоэффективной фазы солнечного цикла, сделанный нами исходя из полученной выше низкой и конечной величины корреляционной размерности, был достаточно подробно прокомментирован в соответствующем разделе монографии /47/, посвященном теме фракталов в Космосе.

Резюме к главе 6

6.1. Обнаружен *переходный* колебательный режим смены знака общего магнитного поля Солнца с полугодовым периодом. Геоэффективность завершающей стадии переполюсовки проявляется в росте числа мощных эффектов Форбуша, что вызывает, в среднем, резкое и глубокое понижение интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности.

6.2. Установлен масштабно-инвариантный характер или скейлинг динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективной фазе переполюсовки общего магнитного поля Солнца. Конечная и низкая величина корреляционной размерности $d_{ГКЛ}(n)$=2.5-3 процесса отражает самоподобную или *фрактальную* структуру возмущений солнечного ветра на завершающей стадии процесса переполюсовки.

6.3. Выявление переходного колебательного режима смены знака общего магнитного поля Солнца с конечной и низкой размерностью, является указанием на *принципиальную* возможность прогноза геоэффективной фазы завершения переполюсовки (1972, 1982, 1991 и 2001-2003 гг.).

6.4. Корреляционная размерность для эпохи минимума солнечной активности имеет вид $d_{ГКЛ}(n)\sim n$, что характерно для *хаотического* процесса. Восстановление мелкомасштабных неоднородностей солнечного ветра в эпоху минимума приводит к ухудшению модуляционных свойств магнитного поля: уменьшению числа эффектов Форбуша и глубины модуляции интенсивности ГКЛ рекуррентными возмущениями, доминирующими в этот период.

Литература к главе 6

1. Takens F. Detecting Strange attractors in turbulence. // Lect. Notes Math. 1980. Vol.898. P. 336-382.

2. Grossberger P., Procaccia I. Chracterization of Strange Attractors. // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol.50. N5. P. 346-349.

3. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. Et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease. // Proceed. 21 ICRC. Adelaide. 1990. Vol.6. P. 217-219.

4. Lindsay G.M., Russel C.T., Luhman J.G. et al. On the Sources of Interplanetary Shocks at 0.72 AU. // J. Geophys. Res. 1994. Vol.99. N A1. P. 11-17.

5. Luhmann J.G., Zhang T.-L., Petrinec S.M. et al. Solar Cycle 21 Effects on the Inerplanetary Magnetic Field and Related Parameters at 0.7 and 1.0 AU. // J.Geophys.Res. Vol.98. N A4. P. 5559-5572.

6. Shea M.A., Smart D.F. A Comparison of Energetic Solar Proton Events During the Declining Phase of Four Solar Cycles (cycles 19-22). // Adv. Space Res. 1995. Vol.16. N9. P.37-46.

7. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономии. 1999. Т. 39. № 1. С. 100-104.

8. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальные и мультифрактальные структуры в солнечном ветре. // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т.33. N4. С. 18-28.

9. Webb D.F. Solar and Geomagnetic Disturbances During the Declining Phase of Recent Solar Cycle. // Adv. Space Res. 1995. Vol.16. N9. P. 57-69.

10. Burlaga L.F. and Ness N.F. Merged Interaction Regions and Large-Scale Magnetic Field Fluctuations During 1991: Voyager 2 Observations. // J. Geophys. Res. 1994. Vol.99. N A10. P. 19341-19350.

11. Valdes-Galicia J.F., Otaola J.A. The Latitudinal Structure of the Heliospheric Current Sheet During Solar Activity Cycles 21 and 22. // J. Geophys. Res. 1996. Vol.101. N A2. P.2475-2483.

12. Kudela K. And Venkatesan D. Fractal Structure of Cosmic Ray Intensity Variations. // Proceed. of the 14 European Cosmic Ray Symposium. Balatonfured. Hungary. 1994. P.127-135.

13. Кузьмин А.И. Вариации космических лучей и солнечная активность. М.: Наука. 1968. 200 с.

14. Шафер Г.В. Эффект Форбуша и характеристики возмущений межпланетной среды. // Автореферат дисс. НИИЯФ МГУ. 1967.17с.

15. Badruddin A. Cosmic Ray Modulation and High Speed Solar Wind Streams of Different Origin. // Proc. 23 ICRC. Calgary. 1993. Vol.3. P. 727-730.

16. Badruddin A., Yadav R.S., Agraval S.P. Flare-Site Magnetic Field, Type-IV Radio Burst and Transient Cosmic Ray Modulation. // Proc. 22 ICRC. Calgary. 1993. Vol.3. P. 731-733.

17. Веселовский И.С. Гелиосферные электроджеты. // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т.34. N4. С. 45.

18. Bieber J.W., Chen J., Matthaeus W. Et al. Long-Term Variations of Interplanetary Magnetic Field Spectra with Implications for Cosmic Ray Modulation. // J. Geophys. Res. Vol.98. N A3. P. 3585-3603.

19. Horbury T.S., Balogh A. and Forsyth R.J. Magnetic Field signatures of unevolved Turbulence in Solar Polar Flows. // J. Geophys. Res. 1996. Vol.101. N A1. P.405-413.

20. Kozlov V.I. Prediction of the Solar Activity Cycle Phases by Variations of Galactic Cosmic Ray Scintillation Index. // Solar-Terrestrial Predictions Workshop. Abstracts. Japan. Hitachi. 1996. S-17. P. 31.

21. Kozlov V.I., Markov V.V. Scale-Invariant Features of Cosmic Ray Fluctuation Dynamics in a Solar Cycle. // Proceed. 25 ICRC. Durban – South Africa. 1997. SH. Session 1-3. P.425-428.

22. Smith E.J. Magnetic Observations During the Ressent Declining Phase of Solar Activity. // Adv. Space Res. 1995. Vol.16. N9. P. 153-163.

23. Мирошниченко Л.И. Солнечный цикл 22: Гелиогеофизические события 1980-1990 гг. // Аэрокосмическая техника (труды американского института аэронавтики и астронавтики). N8. 1990. С. 71-75.

24. Уидброу Дж. Л. Цикл солнечной активности. // Аэрокосмическая техника. N8. 1990. С. 4-14.

25. Смарт Д.Ф., Шей М.Э. Солнечные протонные события в трех предыдущих циклах солнечной активности. // Аэрокосмическая техника. Август N8. 1990. С. 15-31.

26. Уолтершайд Р.Л. Влияние солнечного цикла на верхнюю атмосферу и торможение спутников. // Аэрокосмическая техника. Август N8. 1990. С. 62-70.

27. Горни Д.Дж. Влияние солнечного цикла на околоземную плазму и космические системы. // Аэрокосмическая техника. N8. 1990. С. 48-62.

28. Вампола А.Л. Влияние солнечного цикла на захваченные энергичные частицы. // Аэрокосмическая техника. N8. 1990. С. 32-47.

29. Wilson R.M. On the Variation of the Sun`s X Ray Background Flux and Its Relation to the Sun`s Flaring Rate, Energetic Event Rate, and the Solar Cycle. // J. Geophys. Res. 1993. Vol.98. N A7. P. 11477-11482.

30. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T. Short-Term Cosmic Ray Decreases: 1964-1994. // Proc. 24 ICRC. Roma. 1995. Vol.4. P. 872-875.

31. Ahluvalia H.S. Hale Cycle Effects in Secular Variations of Cosmic Ray Intensity. // Proc. of the Second SOLTIP Symposium. 1994. Nakaminato. Japan. P. 247-250.

32. Ahluvalia H.S., Xue S.S. and Fikani M.M. Geomagnetic Activity Index and Solar Wind Speed for Solar Cycles. // Proceed. Of the Second SOLTIP Simposium. 1994. Nakaminato. Japan. P. 275-278.

33. Nature. 1995. Vol. 377. N 6546. P. 214.

34. Le Roux J.A. and Potgieter M.S. An Explanation for the Large Step Decreases in Long-Term Cosmic Ray Modulation: A Computed Simulation. // Proc. 23 ICRC. Calgary. 1993. Vol.3. P. 505-508.

35. Le Roux J.A. and Potgieter M.S. The Simulation of the 1977-1987 Cosmic Ray Modulation Cycle Using a Drift Model with Global Merged Interaction Regions. // Proc. 23 ICRC. 1993. Vol.3. P.509-512.

36. Gazis P.R. Long-term Enhancement in Solar Wind Speed. // J. Geophys. Res. 1996. Vol.101. N A1. p. 415-424.

37. Richardson J.D., Paularena K.I., Belcher J.M. et al. Solar Wind Oscillations with a 1,3 Year Period. // J. Geophys. Res. Lett. 1994. N 14. P. 1559-1560.

38. Куклин Г.В. Пространственно-временные закономерности пятнообразования и магнитных полей на Солнце. // Автореферат докт. дисс. Иркутск. 1991. 99с.

39. Михайлуца В.П., Гневышев М.Н. Энергия магнитного поля Солнца, свечение зеленой короны и свойства солнечного цикла. // Солнечные данные. 1988. Бюллетень N4. С. 88-95.

40. Иванов Е.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Крупномасштабная структура солнечных магнитных полей и корональные выбросы массы. // Астрономический журнал. 1997. Т. 74. N 2. С.273-277.

41. Куклин Г.В., Салахутдинова И.И., Ноон Г. Регулярная и хаотическая составляющие вариации дипольной части общего магнитного поля Солнца в цикле 21 и 22. // Современные проблемы солнечной цикличности. Конференция посвященная памяти М.Н. Гневышева и А.И. Оля 26-30 мая 1997 г. Тезисы докладов. С.-Петербург. ГАО.

42. Carbonel M., Oliver L. And Ballester J.L. A Search for Chaotic Behavior in Solar Activity. // Astronomy and Astrophys. 1994. Vol. 290. N 3. P. 983-994.

43. Михайлуца В.П., Фатьянов М.П. Размерность и структура солнечного аттрактора по значениям энергии магнитного поля Солнца в 21 цикле. // Солнечные данные. 1989.1989. N11. С.109-116.

44. Кравцов Ю.А. Случайность и предсказуемость динамического хаоса. // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука. 1989. С.232.

45. Kravtsov Yu.A., Etkin V.S. Nonlinear Processes in Physics. // Harwood Acad. Publ. New York. 1984. Vol.3. P.1411.

46. Козлов В.И. Флуктуации космических лучей в межпланетном пространстве // Автореферат докт. диссертации. Иркутск – Якутск. ИКФИА – ИСЗФ. 2000. 23 стр.

47. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М. МГУ. Изд. ЛОГОС. 2005. 848 стр.

Глава 7. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОГНОЗУ УДАРНЫХ ВОЛН НА БАЗЕ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

7.1. Космическая погода в Арктике.

Перламутровые сопки
В перламутровой дали
Я бегу по краю сопки
Переваривая соки
Переваливая сопки
От зари и до зари.
Слева, Солнца – луч закатный
Справа, тусклый свет Луны
По ушам бьет звон набатный
По ушам бьет звон набатный
По ушам бьет звон набатный
Заиндевелой тишины.
Шорох звезд
Зарниц сиянье
Сверху… высыпало враз!
От полярного сиянья
Перехвачено дыханье
Перехвачено дыханье
Защипало между глаз.
Вдруг… исчезло наважденье
Треск кроссовок режет слух
Как вернуть Миров виденье?
Миг с Природой единенья
Человека становленье
Нет, такого не вернуть.

Тикси, 1981 г.

Существенно, динамический характер экстремальных проявлениий Космической погоды указывает на целесообразность применения адаптивного метода ранней диагностики межпланетных возмущений. Анализ информации полученной в результате космофизического эксперимента осложнен тем, что в ходе такого эксперимента нам приходится в большинстве случаев иметь дело с косвенными дистанционными измерениями. Исследование флуктуаций космических лучей является примером такого рода измерений. Это означает, что необходимо учитывать переход от объекта исследования (возмущений ММП) к объекту регистрации – физической величине на выходе прибора (скорости счета или числу импульсов за каждые 5 минут, в данном случае). В процессе

анализа необходимо пройти по этой цепочке в обратном направлении – от результатов регистрации скорости счета (числа импульсов) к объекту исследований – вариациям ММП.

Как правило, конечная цель исследования – получение физической структурно-адекватной модели. Когда же построить такую модель оказывается затруднительно, необходимо строить функционально-адекватную модель, для которой соответствие объекту исследования должно выполняться только на входе и выходе. Такие модели вполне пригодны для достижения ряда прикладных практических целей, например, решения задачи гелиогеофизического прогнозирования /1/. Определение уровня значимости индекса мерцаний ГКЛ как среднего по ансамблю реализаций дает, соответственно и “средний” прогноз из-за ложных тревог и пропусков “целей”, обесценивающих любой прогноз, основанный на идеологии среднего уровня значимости. Следовательно, без критерия, оценивающего текущую обстановку, надежный прогноз в принципе невозможен. Индексация же текущей обстановки невозможна без мониторинга или оперативной диагностики среды.

Впервые, эффективность предложенного наземного мониторинга космических лучей была апробирована в натурном эксперименте, проведенного в июле 1982 в Полярной Геокосмофизической Обсерватории Тикси. Дата проведения была определена просто: в июле 1982 г. отмечался 25-летний юбилей организации в пос. Тикси полярной станции «МГГ», созданной в рамках Международного Геофизического Года (Рис. 7.1). Старожилы пос. Тикси, возможно, помнят, что весь арктический регион в течение двух недель (с 9–20 июля!) остался полностью без связи: «полный гухор», как «в сердцах» выражались тогда связисты всех родов войск (и гражданские, тоже).

Первый предвестник в космических лучах был зарегистрирован нами 7 июля 1982 г., о чем говорилось выше в 4 главе (см. рис. 4.7). В дальнейшем, достоверность первого предвестника мощной ударной волны была подтверждена независимо другим способом формализации динамики космических лучей, описанном далее в главе 8 (рис. 7.2). В то время это был, без сомнения, первый и, что удивительно, успешный эксперимент по прогнозу экстремальных проявлений Космической погоды в Арктике. Доподлинно известно, что во время знаменитого «гухора-82», наша информация о мощнейшей магнитной буре спасла «погоны» многим военным начальникам связи, коих в Арктике тогда было множество.

На полностью автоматизированный режим мы вышли уже через год, в апреле 1984 г., когда была проведена полная модернизация системы сбора, регистрации и анализа данных. И тогда же, в 3-й декаде

Рис. 7.1. Коллектив «Полярной Геокосмофизической Обсерватории» (ПГО) Тикси. 1986 г. Четвертый справа – Заведующий ПГО Тикси, к.ф.-м.н. Новиков Александр Максимович. На заднем плане, стоит – руководитель Группы мониторинга ПГО Тикси, к.ф.-м.н. Козлов Валерий Игнатьевич.

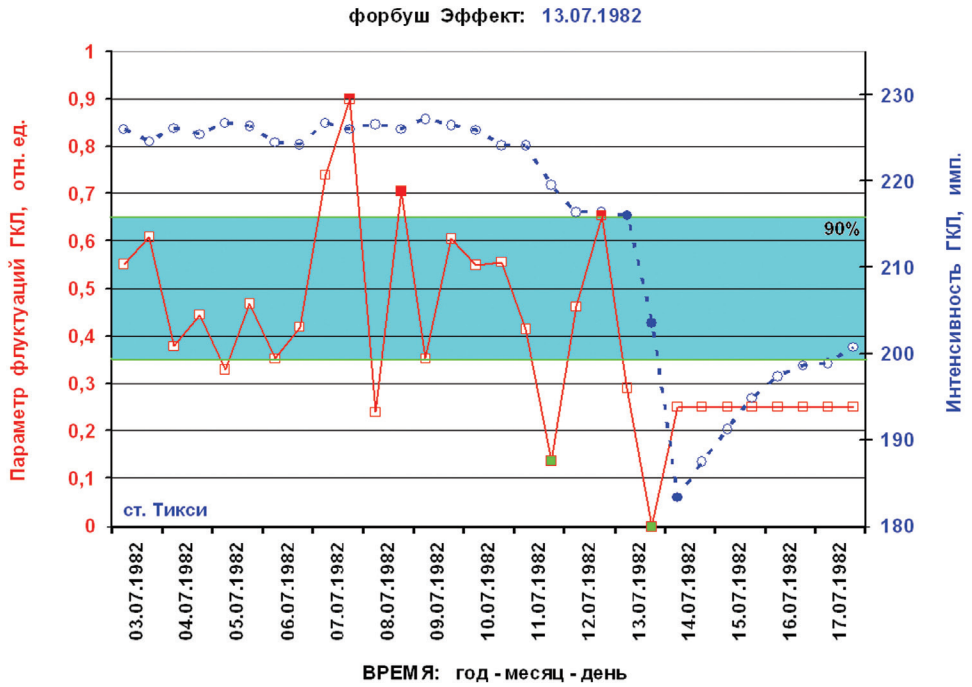


Рис. 7.2. Результаты ретроспективного анализа по контрольному расчету параметра флуктуаций ГКЛ по данным б. Тикси с 03 – 17 июля 1982 г. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей по данным ст. Тикси (пунктирная кривая синего цвета); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая красного цвета). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день). Первый значимый предвестник зарегистрирован 7 июля 1982 г., на стадии выхода активной области на видимую часть солнечного диска. Второй значимый предвестник зарегистрирован 12 июля перед эффектом Форбуша 13 – 14 июля 1982 г.

апреля 1984 г. система прошла апробацию во время 10-дневного натурного эксперимента. В то время, стратосферные измерения космических лучей на шарах-зондах и оптические наблюдения полярных сияний были впервые проведены не по заведенному тогда жесткому графику. Эффективность проведения измерений космических лучей на шарах-зондах в стратосфере «под прогноз», да и других видов наблюдений тоже, стала очевидной сразу. В итоге, на всесоюзной конференции 1985 г., создание в ПГО Тикси «автоматизированной системы научных исследований» было отмечено организаторами конференции, наряду с экспериментами на космических аппаратах серии «Венера», как важные достижения отечественной науки.

7.2 Создание автоматизированной системы раннего обнаружения ударных волн на базе мониторинга космических лучей.

Для решения задачи прогноза экстремальных событий Космической погоды на базе мониторинга космических лучей, в обсерватории Тикси на базе действующего нейтронного монитора была создана Автоматизированная Система Корпускулярной Оперативной Диагностики (АСКОД) представляющая собой, по сути – экспертную систему ранней диагностики ударных волн /2/. АСКОД представляла собой двухуровневую систему. На нижнем уровне решалась задача сбора, контроля и первичной обработки данных, на верхнем – задача экспресс-анализа с целью оценки текущей радиационной и электромагнитной обстановки. В задачу первичной обработки входило получение буфера исправленных на давление данных нейтронного монитора. Алгоритм первичной обработки состоял из 5 блоков /2/: а) чтение; б) выборка; в) контроль и коррекция; г) компоновка; д) вывод. Программа “чтение” работала по программе прерывания от нейтронного монитора и была предназначена для чтения цифровой информации по каналу фотосчитывателя. В результате ее выполнения буфер ввода заполнялся цифрами, поступавшими от нейтронного монитора.

Программа выборки предназначена для получения данных в виде целых чисел и формирования циклических буферов по трем секциям (по 288 элементов) и буфера давления (512 элементов). Здесь же контролировались временные метки и экспозиция. Было предусмотрено исправление сбоев по экспозиции и считывание данных по секциям монитора.

Контроль и коррекция осуществлялась следующим образом. По данным из секционных буферов вычислялись отношения секций:

$$a_i/b_i;\ a_i/c_i;\ b_i/c_i,$$

a_i – данные 1 секции нейтронного монитора; b_i – 2 секции; c_i – 3 секции.

Далее вычислялись средние отношения секций:

$$A = (1/288)\sum_{i=1}^{288} a_i / b_i;\ B = (1/288)\sum_{i=1}^{288} a_i / c_i;\ \ C = (1/288)\sum_{i=1}^{288} b_i / c_i$$

Затем вычислялись величины Q_1, Q_2, Q_3:

$$Q_1 \begin{cases} 0 \text{ при } /A-\eta_{1,2}/<K\times\sigma_{1,2} \\ 1 \text{ при } /A-\eta_{1,2}/\geq K\times\sigma_{1,2} \end{cases}$$

$$0 \text{ при } /B-\eta_{1,3}/<K\times\sigma_{1,3}$$

Q_2

1 при $/B-\eta_{1,3}/\geq K\times\sigma_{1,3}$

0 при $/C-\eta_{2,3}/<K\times\sigma_{2,3}$

Q_3

1 при $/C-\eta_{2,3}/\geq K\times\sigma_{2,3}$

где $\eta_{1,2}$; $\eta_{1,3}$; $\eta_{2,3}$ – среднесуточные отношения секций вычисленные за предшествующие годы, $\sigma_{1,2}$; $\sigma_{1,3}$; $\sigma_{2,3}$ – дисперсия этих отношений, K – коэффициент при дисперсии (в данном случае K=1).

Затем вычислялась сумма: $Q=Q_1+Q_2+Q_3$. Если Q=0, то счет нейтронного монитора $N_i=a_i+b_i+c_i$. При Q=2 осуществлялись следующие логические операции:

если $Q_1\cap Q_2=1$, то $N_i=b_i+c_i$,
если $Q_1\cap Q_3=1$, то $N_i=a_i+c_i$,
если $Q_2\cap Q_3=1$, то $N_i=a_i+b_i$, где i=288.

Затем вводилась поправка на давление по формуле:

$$N_p=N_i\exp\{-0,0096(750-P_i)\},$$

где P_i – текущие пятимиутные значения давления. Контроль и коррекция на давление осуществлялись для каждой вновь поступившей (за 5 мин) записи от нейтронного монитора.

Программа компоновки формировала среднечасовые значения буферов давления и счета нейтронного монитора исправленного на давление. В буфер вывода входят текущая дата, данные по секциям и давление. Один раз в сутки в буфер вывода включались давление и счет нейтронного монитора, скорректированный на давление, величины A, B, C, Q и дисперсия отношения секций. Техническая диагностика позволяла, таким образом, по отношению секций, по дисперсии этих отношений проводить контроль работы измерительно-вычислительного комплекса. Следует отметить стабильность величин отношения секций и дисперсии отношений в течение 10 лет, начиная с 1982 г.

Совершенно очевидно, что никаких эффектов (космического происхождения) не может быть в величине отношений секций, а также в дисперсии этих отношений. Следовательно, в случае исправной работы секций корреляционная функция и, соответственно, спектр этих величин – есть корреляционная функция и спектр “белого шума”. В таком случае, значимые отклонения от **стандартной** корреляционной функции

$R(0)=1$ и спектра $P(w)=\text{const}$ будут сигнализировать о неисправной работе либо секций нейтронного монитора, либо измерительного тракта. Оперативное выявление сбоев в системе позволяет, в принципе, своевременно их устранять, что приводит к повышению качества данных, а в итоге, к их эффективному использованию в случае экспресс-анализа. В частности, с целью диагностики и прогноза Космической погоды.

Программа корпускулярной оперативной диагностики (КОД) состоит из следующих основных частей: ввода и коррекции данных микропроцессорного регистратора, собственно программы КОД и подпрограммы вывода результатов. Режим работы задавался в меню, на которое выводит программа КОД при запуске. После редактирования данных, введения поправки на давление и записи их на различные носители (если это необходимо) запускалась программа расчета спектрально-временного индекса мерцаний ГКЛ. В меню задавались значения параметров цифровой фильтрации, корреляционного анализа и расчета спектров мощности флуктуаций космических лучей. Далее по спектрам мощности вычислялся спектральный индекс мерцаний ГКЛ (см. п. 5.2).

7.3 Результаты первого эксперимента по прогнозу Космической погоды.

> «*В течение столетий математики и философы задавались вопросом – математика* ***изобретена или открыта****?... Я не знаю ничего более возбуждающего, чем наблюдать, как разрозненные кусочки математического пазла соединяются в единую непротиворечивую картину. Когда такое происходит, возникает чувство, что эта картина всегда там была, подобно тому, как широкий простор выплывает из утреннего тумана*».
>
> **Брайан Грин**. «СКРЫТАЯ РЕАЛЬНОСТЬ». М.:УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013. Стр. 311.

Ниже приводятся результаты эксперимента по прогнозу радиационной и электромагнитной обстановки, проведенного сразу после запуска системы АСКОД в апреле 1984 г. Реализованный в АСКОД диалоговый режим позволил провести как техническую диагностику измерительно-вычислительного комплекса, так и корпускулярную оперативную диагностику среды. На рис. 7.3а,б представлены часовые значения интенсивности ГКЛ б. Тикси и ст. Апатиты в исследуемый период с 20 апреля по 4 мая 1984 г. и спектрально-временные индексы мерцаний этих станций. В нижней части рисунка приведены результаты расчета кросс-индекса мерцаний ГКЛ пары станций Тикси-Апатиты. И

автоиндексы и кросс-индексы мерцаний указывают на наличие значимого (на уровне 99%) максимума за сутки до начала эффекта Форбуша. Отношение сигнал/шум является наибольшим для кросс-индекса. Следовательно, метод корреляционного приема сигналов пары разнесенных высокоширотных станций действительно является наилучшим способом для получения прогнозного сигнала – предвестника катастрофических проявлений геофизической активности.

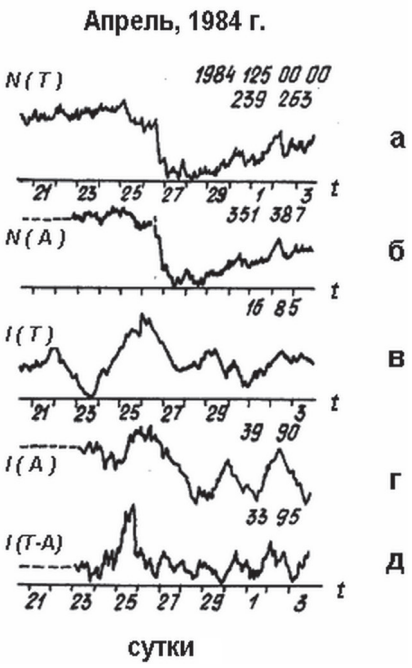


Рис. 7.3. Часовые значения интенсивности космических лучей б. Тикси и ст. Апатиты в исследуемый период с 20 апреля по 4 мая 1984 г. Ниже, автоиндексы мерцаний космических лучей этих же станций. В нижней части рисунка приведены результаты расчета кросс-индекса мерцаний пары станций Тикси – Апатиты. И автоиндексы и кросс-индексы мерцаний указывают на наличие значимого (на уровне 99%) максимума за сутки до начала эфф. Форбуша с 26 на 27 апреля

При максимальном значении индекса мерцаний ГКЛ в 01.00 UT 26.04.84 г. (рис. 7.3в), нами был дан прогноз радиационного возмущения: возрастаний СКЛ, форбуш-понижения и геомагнитной бури. Под прогноз радиционного возмущения в обсерватории Тикси были оперативно проведены стратосферные измерения космических лучей. На рис. 7.4 приведены результаты этих измерений на полетном приборе «ИКАР» (аппаратура ФИАН). Показаны фоновые значения интенсивности космического излучения, регистрируемые одиночным счетчиком типа СТС-6 и телескопом на базе сдвоенных детекторов указанного типа. По оси абсцисс нанесена шкала высоты в г/см^2. Левая шкала по оси ординат относится к скорости счета телескопа (имп/мин), правая – одиночного счетчика. На рисунке указана дата, а также время запуска шаров-зондов. Как следует из данных измерений, 26.04.84 г. зарегистрировано возрастание потока космических лучей в стратосфере. Во время эффекта Форбуша 27.04.84 г. дополнительный поток космических лучей уже не регистрировался. Данные измерений на спутнике «Метеор» потоков солнечных протонов с энергией E_p>25 МэВ в исследуемый период подтвердили

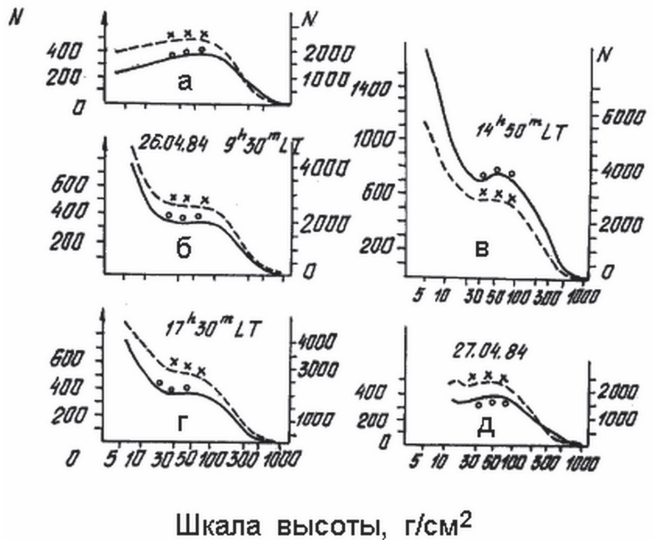


Рис. 7.4. Результаты измерений частиц космических лучей на полетном приборе «ИКАР» (аппаратура ФИАН). Показаны фоновые значения интенсивности космического излучения, регистрируемые одиночным счетчиком типа СТС-6 и телескопом на базе сдвоенных детекторов указанного типа. По оси абсцисс нанесена шкала высоты в г/см². Левая шкала по оси ординат относится к скорости счета телескопа (имп/мин), правая – одиночного счетчика. На рисунке указана дата, а также время запуска шаров-зондов

наши результаты /3/. Как и следовало ожидать, максимум потока протонов достигается непосредственно перед регистрацией ударной волны, вызвавшей резкое форбуш-понижение с 26 на 27 апреля.

Ниже, приведены результаты расчета параметра флуктуаций (введенного нами позже, в 2008 г.) и интенсивности ГКЛ для того же события 26–27 апреля 1984 г. Значимый предвестник был зарегистрирован 24 апреля 1984 г. (рис. 7.5). Предвестник предшествует началу предпонижения в интенсивности ГКЛ 25 апреля 1984 г., которое зарегистрировано до начала главной фазы эффекта Форбуша 26–27 апреля. Таким образом, наличие значимого предвестника в космических лучах до начала главной фазы эффекта Форбуша 26 апреля 1984 г. подтверждено различными методами формализации динамики флуктуаций космических лучей в окрестности ударной волны.

Можно было, конечно, перечислить ряд, практически важных, приложений связанных с проблемой прогноза Космической погоды. Но есть еще один, не совсем ясно к чему относящийся, интересный аспект. В данном случае, речь идет о полярных сияниях, которые по классификации

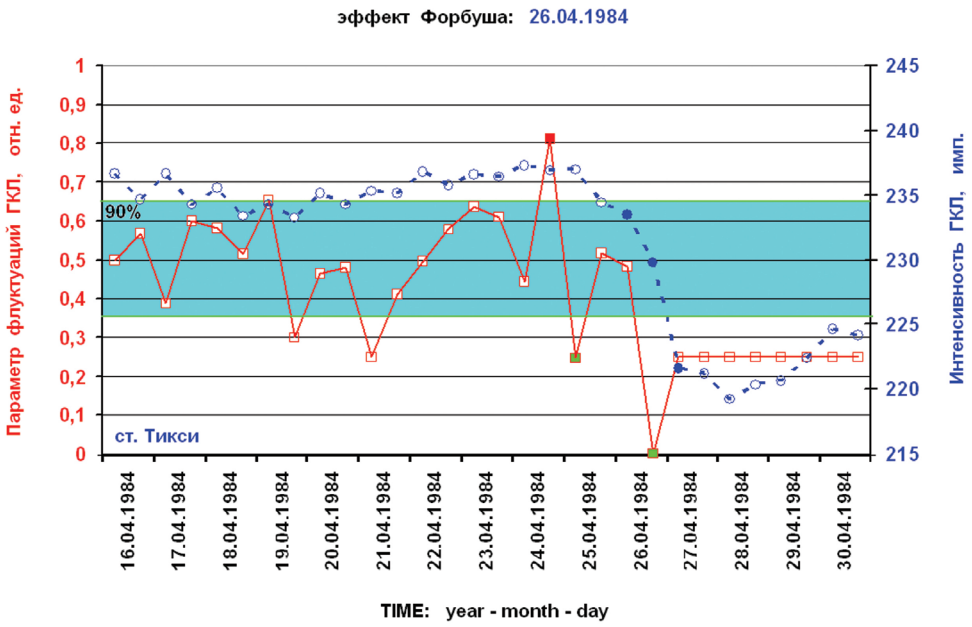


Рис. 7.5. Результаты ретроспективного анализа по контрольному расчету параметра флуктуаций ГКЛ по данным б. Тикси с 16–30 апреля 1984 г. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей по данным ст. Тикси (пунктирная кривая синего цвета); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая красного цвета). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день). Значимый предвестник зарегистрирован 24 апреля 1984 г. до начала главной фазы эфф. Форбуша 26–27 апреля 1984 г.

ЮНЕСКО отнесены к самому удивительному и зрелищному явлению природы (рис. 7.6). Мой коллега по работе, системный инженер-программист Николай Туголуков все поражался: сижу, за компьютером сутками, набиваю «единички-нолики», т.е. перевожу на понятный ЭВМ язык алгоритм прогноза, компьютер что-то урчит и подмигивает мне зелеными огоньками, чтобы я ненароком не заснул и вдруг… сигнал о прогнозе, проще – предвестник. Тут мы все окончательно просыпаемся и выскакиваем наружу, а в полуночном небе начинает разворачиваться настоящее «светопреставление» – сполохи света причудливых форм и движений, огненные занавеси и вихри всех цветов радуги мечутся от одного конца спектра к другому, и обратно. Нет слов, это феерия огня и цвета – удивительное зрелище, но ведь не менее удивительно другое, задает свой вопрос Николай Туголуков. Каким образом, все, что я тут

Рис. 7.6. Полярное сияние

проделывал с «единичками и ноликами» на компьютере за сутки до этого, может быть связано с этим седьмым чудом света?

Признаюсь, я не сразу смог достаточно внятно ответить на этот, далеко не риторический вопрос коллеги-математика, впрочем, и по прошествии времени, тоже. Ответ на него, не так уж и прост, как кому-то может показаться, мне – нет. Возможно, это действительно связано с «непостижимой эффективностью математики», в соответствии с известным высказыванием Е. Вигнера.

Резюме к главе 7

7.1. В Полярной обсерватории Тикси, под руководством и непосредственном участии авторов, была разработана и создана автоматизированная система **раннего обнаружения** межпланетных ударных волн на базе мониторинга космических лучей.

7.2. Проведены первые натурные эксперименты по мониторингу галактических космических лучей *в режиме* ***реального*** *времени*.

7.3. Предложен *способ раннего обнаружения межпланетных ударных волн* по регистрации *коррелированных* флуктуаций или **пучков**

частиц космических лучей, методом корреляционного приема сигналов разнесенных полярных станций космических лучей /4-5/.

Литература к главе 7

1. Kuklin G.V. On Methodology and a Body Mathematics of Statistical Investigations in Astrophysics and Planetary Geophysics (review) // Phys. Solariterrestr. Potsdam. 1981. N.16. p.18.

2. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений // Якутск. ЯНЦ СО РАН. 1993. 163 с.

3. Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. // Солнечные протонные события. Каталог 1980-1986 гг.: Материалы Мирового Центра Данных “Б”. Отв. ред. Ю.И. Логачев. М. Изд. МГУ. 1990.

4. Козлов В.И. Способ обнаружения вспышечных ударных волн. // Авторское свидетельство СССР N 1531243 от 08.09.1989 г.

5. Козлов В.И. Способ обнаружения вспышечных ударных волн. // Авторское свидетельство СССР N 1588182 от 22.04.1990 г.

Глава 8. «ЗАГОРИЗОНТНОЕ» ОБНАРУЖЕНИЕ ГЕОЭФФЕКТИВНОГО ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ «ГАЛО» В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

8.1. Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходных режимах солнечного ветра.

«…Мы не умеем предсказывать, что произойдет при данных условиях. Мало того, мы уверены, что это невозможно – единственное, что можно предсказать – это ***вероятность*** *тех или иных событий. Нужно признать, что мы сильно изменили наши прежние идеалы понимания Природы. Возможно, что это шаг назад, но пока никто не нашел способа избежать его».*

Ричард Фейнман. Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее. М. 2011.

Как уже отмечалось выше, на малых пространственно-временных масштабах должна быть существенной корреляция траекторий, вследствие которой группы частиц, близких в фазовом пространстве, сравнительно долго сохраняются как компактные образования с «единой» траекторией /1-3/. Групповое поведение частиц представляет большой интерес с различных точек зрения. Прежде всего, это важно при попытках изучения нелинейного взаимодействия космических лучей с окружающей средой, а также для прогноза и диагностики крупномасштабных явлений в космической плазме.

Из-за исключительной сложности коррелированного движения частиц, в исследованиях этого явления чрезвычайно важно опираться на информацию, полученную из анализа наблюдений. Ниже, изучаются коррелированные флуктуации космических лучей, обусловленные групповым поведением галактических космических лучей в межпланетном магнитном поле. Соответствующие вариации целесообразно искать в ситуациях, когда возникают «окрашенные» группы частиц, за эволюцией которых легко проследить. Как было показано выше, подобная ситуация возникает на переходных режимах истечения солнечного ветра. Ниже, предлагается новый, альтернативный способ количественного описания группового поведения частиц, основанный на вероятностных представлениях.

Слабым, но необходимым звеном спектрально-временного подхода в анализе временных рядов, является процедура приведения исходного нестационарного ряда (рис. 8.1) к стационарному виду посредством исключения тренда в данных. Но удаленный тренд может содержать и полезную информацию, накопленную на латентной (скрытой) фазе

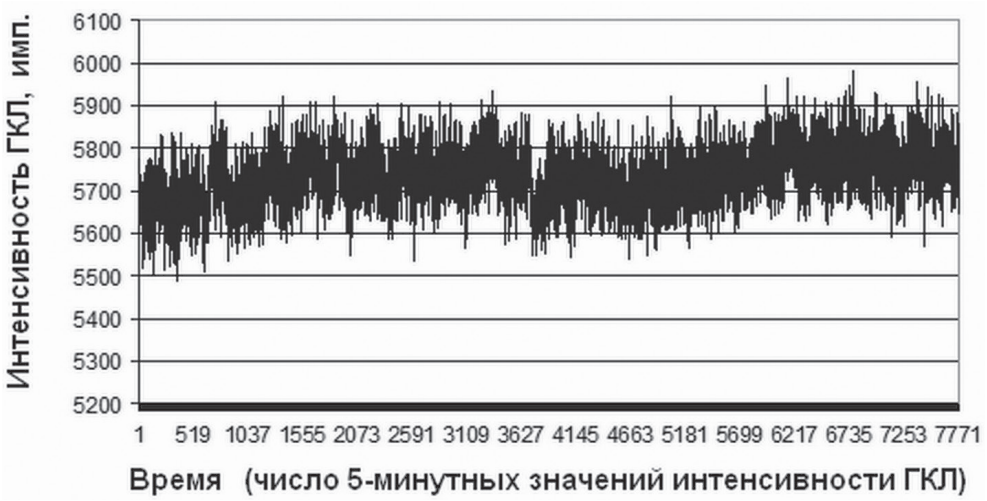


Рис. 8.1. Пример исходных 5-минутных значений интенсивности космических лучей по данным ст. Оулу (Финляндия). По оси ординат – значения интенсивности в импульсах. По оси абсцисс – время (число 5 мин. значений за 1 оборот Солнца: 7776 точек)

формирования источника активности. Отсюда следует, что наиболее полная информация содержится в обычной гистограмме исходных данных: частотной (рис. 8.2), или интегральной (рис. 8.3). Остается лишь выделить из шумоподобного сигнала потенциально возможный регулярный сигнал. Естественно, что потенциально возможный полезный сигнал может содержаться во втором и последующих моментах функции распределения интенсивности ГКЛ. На это указывает оценка коэффициента асимметрии (рис. 8.4). Известно, что положительные значения коэффициента асимметрии означают сдвиг максимума частотной гистограммы в сторону больших значений интенсивности ГКЛ. С другой стороны, желательно отделить изменения формы гистограммы от изменений масштаба. В таком случае, вместо коэффициента асимметрии лучше воспользоваться трехпараметрической (в общем случае) функцией распределения Вейбулла-Гнеденко /4/. Это подтверждается проверкой статистических гипотез: гипотеза о нормальном распределении интенсивности галактических космических лучей отвергается на уровне значимости 99% (рис. 8.5а). Напротив, гипотезу о вейбулловском характере распределения можно принять на уровне значимости 90% (рис. 8.5б).

Из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности известно, что обобщенная функция распределения Вейбулла-Гнеденко описывает выход системы на предельный критический

Рис. 8.2. Экспериментальная (дифференциальная) гистограмма 5-мин. значений интенсивности космических лучей ст. Оулу за 1 солнечный оборот. По оси ординат – число 5-мин. значений в единичном «бине-интервале». По оси абсцисс – порядковый номер «бина-интервала»

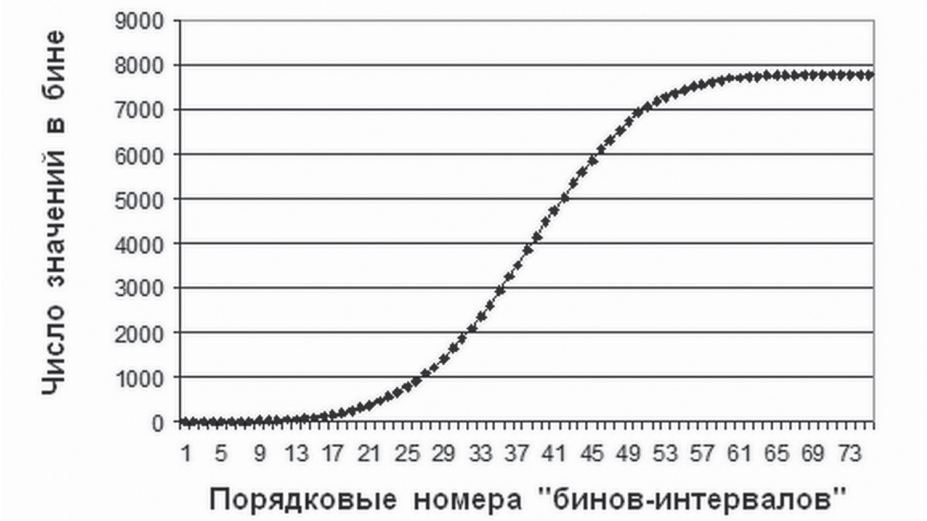


Рис. 8.3. Интегральная гистограмма 5-мин. значений интенсивности космических лучей ст. Оулу, за тот же солнечный оборот. По оси ординат – суммарное число 5-мин. значений с первого по текущий «бин-интервал». По оси абсцисс – порядковый номер «бина-интервала»

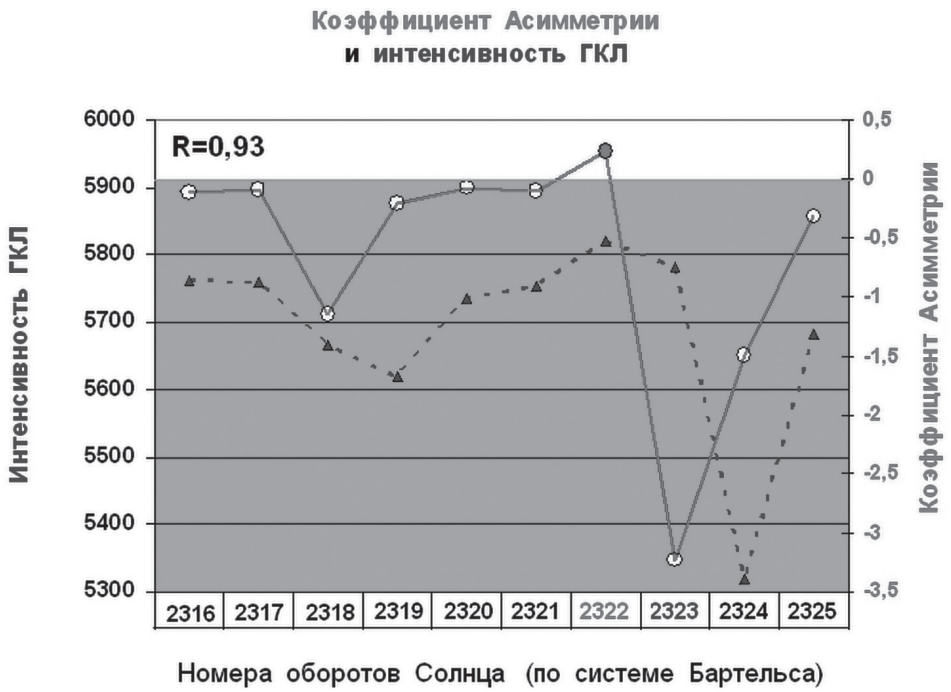


Рис. 8.4. Оценка коэффициента асимметрии по 7776 значениям интенсивности космических лучей в каждом обороте Солнца, начиная с №№ 2316-2325 (28.03.2003-22.12.2003 гг). По оси ординат: шкала слева – значения интенсивности космических лучей в импульсах; шкала справа – величина коэффициента Асимметрии в относительных единицах. По оси абсцисс – время: отложены порядковые номера оборотов Солнца (по системе Бартельса)

режим. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим к активной фазе солнечного цикла или переходный режим в окрестности фронта межпланетной ударной волны. На языке вероятностной теории разрушения сплошных сред или теории надежности, задача изучения переходного режима сводится к задаче определения функции интенсивности отказов системы, выработавшей свои ресурсы. Максимум функции интенсивности отказов, или максимум функции риска, есть, по сути – вероятность достижения **критического** значения анализируемой переменной (Приложение 8.1). В данном случае, интенсивности космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла к ее дополнению, т.е. функция риска и есть искомая вероятность или параметр флуктуаций космических лучей /5/. По смыслу, это есть индикатор степени коррелированности флуктуаций космических лучей в окрестности магнитной «пробки» на ударной волне.

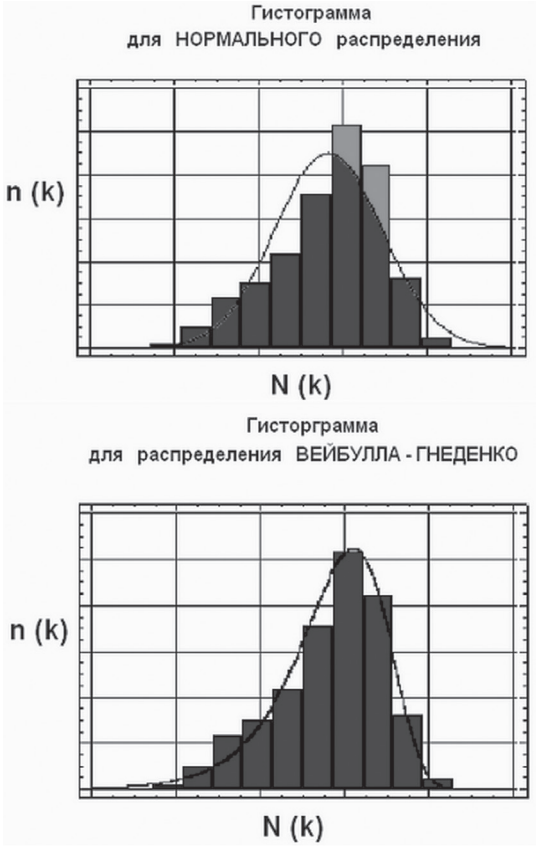


Рис. 8.5. Результаты проверки статистических гипотез: о нормальности распределения (в верхней части рисунка) и гипотезы о распределении Вейбулла-Гнеденко (внизу). Гипотеза о нормальном распределении интенсивности галактических космических лучей отвергается на уровне значимости 99%. Гипотеза о распределении Вейбулла-Гнеденко может быть принята на уровне значимости 90%

Для расчета вероятности достижения интенсивностью космических лучей критического значения, потребуется оценка параметра формы эмпирического распределения Вейбулла, который и определяет степень отклонения формы аппроксимирующей функции от нормального распределения. Аппроксимирующую функцию эмпирической (интегральной) гистограммы интенсивности находим методом наименьших квадратов. Средние значения интенсивности за каждый интервал-бин эмпирической функции распределения интегральной гистограммы будут группироваться в окрестности подогнанной прямой, но уже в новой координатной сетке (после процедуры двойного логарифмирования и замены переменных). В этом случае тангенс угла наклона прямой, подобранной методом наименьших квадратов, и свободный член дают соотношения, необходимые для оценки искомых параметров формы и масштаба (в общем случае, параметров формы, масштаба и сдвига).

Таким образом, процедура выделения полезного сигнала-предвестника из шумоподобного сигнала сведена, в нашем случае, к обратной задаче определения степени коррелированности флуктуаций по экспериментальным данным. Это позволяет выделить полезный сигнал-предвестник из гауссовского шума. Гауссовский шум *содержится, проще говоря, в линейной части функции риска*, а искомый

сигнал-предвестник – в нелинейной. Искомая, нелинейная компонента сигнала-предвестника формируется при **превышении** степени (вероятности) коррелированности (кластеризации) процесса, т.е. при $P > P_{крит}$. В силу *вероятностной* трактовки функции риска, т.е. вероятности достижения интенсивности космических лучей критического значения, значимыми являются значения вероятности превышающие значения $P > 0{,}5$. Тестирование предложенного способа на контрольном ряде, представляющего собой случайный ряд чисел показало, что значения вероятности (далее, параметр флуктуаций) лежащие ниже уровня $P \leq 0{,}5$ можно отнести к гауссовскому шуму. И, наоборот, на переходном режиме регистрируются значимые значения вероятности достижения критического значения интенсивности ГКЛ: как это имело место на оборотах №№ 2320–2321, т.е. за 1–2 оборота до начала активной фазы солнечного цикла на оборотах №№ 2323–2324 в октябре-ноябре 2003 г. (рис. 8.6).

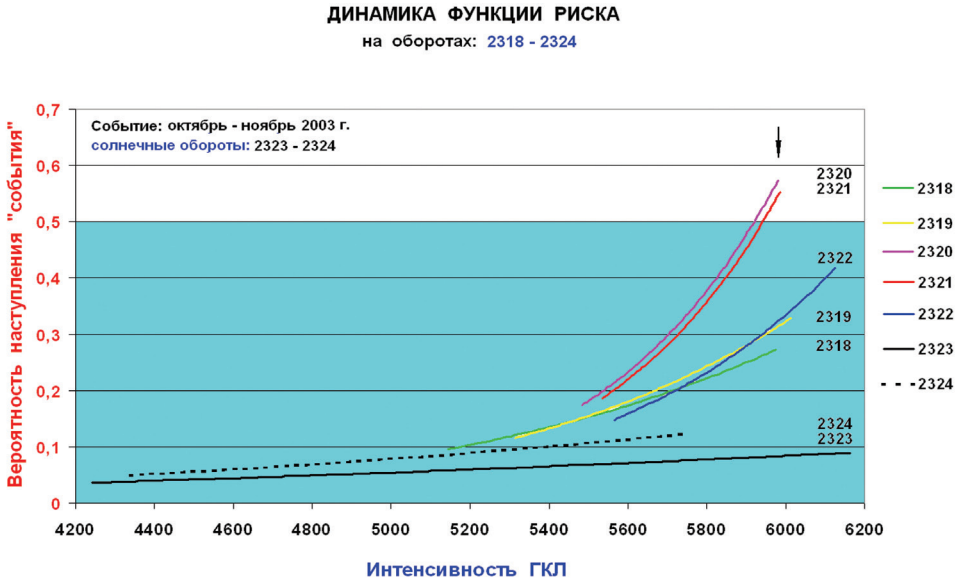


Рис. 8.6. Расчет вероятности (ось ординат, шкала слева) наступления «события» исходя из распределения Вейбулла-Гнеденко. По оси абсцисс – 27-дневные значения интенсивности космических лучей для каждого оборота Солнца. На оборотах 2320-2321, т.е. за 1–2 оборота до начала фазы роста активности Солнца в октябре-ноябре 2003 г. (обороты 2323-2324) регистрируются значимые (P>0,5) значения вероятности

8.2. Экспертная система раннего обнаружения межпланетных ударных волн «Cyber-FORSHOCK».

С целью исключения пропуска «цели» («ошибка 1 рода») и регистрации не геоэффективного события, фактически – «ложной тревоги» («ошибка 2 рода»), была проведена «настройка» созданной нами роботизированной экспертной системы «Cyber-FORSHOCK» к обнаружению геоэффективных событий Космической погоды. Для этого использовалась комбинация двух блоков: блок «подавления шума» и блок «расширения частотного диапазона».

Блок подавления шума представляет собой процедуру подачи на вход анализатора, наряду с исходным сигналом, двух вариантов «расфазированного» исходного сигнала. Притом, что величина временного сдвига (1 час) обоих расфазированных сигналов много меньше, чем интервал усреднения параметра флуктуаций (12 часов). Эта процедура позволила, практически, вдвое уменьшить дисперсию исходного временного ряда. Иллюстрация эффективности ее применения показана на примере известного события в третьей декаде октября 2003 г. (рис. 8.7).

Рис. 8.7. Результат процедуры «подавления шума» при одновременной подаче на вход анализатора исходного и «расфазированного» сигнала на примере событий в октябре 2003 г. (b – нижняя кривая). По оси ординат – значения интенсивности космических лучей исходного сигнала в импульсах (a – верхняя кривая).

Блок расширения диапазона частот включает в себя «одновременное» использование в процедуре исключения тренда полиномов различных порядков. Пример вычитания тренда с использованием по отдельности полинома 2 и 3 порядка, показан на рис. 8.8. Показан 90% уровень значимости $P = 0{,}65$, который был получен по результатам тестирования алгоритма на случайном ряде чисел (рис. 8.9) Иллюстрация действия процедуры «расширения частотного диапазона» показана для случая регистрации гигантской вспышки 4 ноября 2003 г. и супер-бури 20 ноября 2003 г. (рис. 8.10).

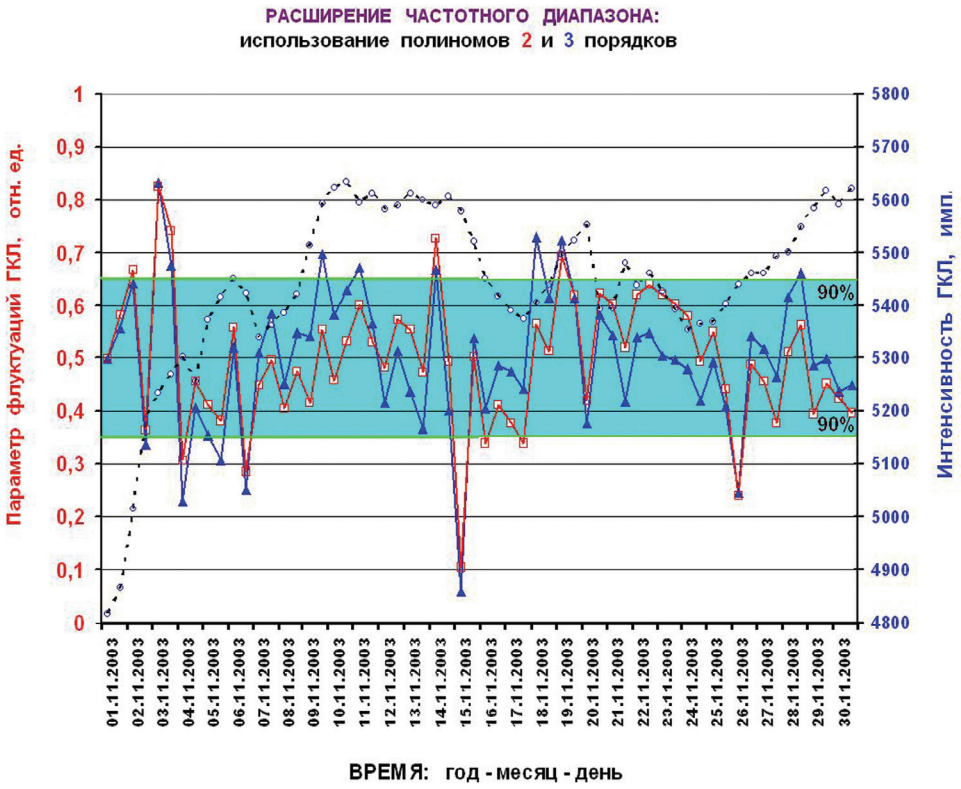


Рис. 8.8. Результаты расчета параметра флуктуаций с исключение тренда полиномами 2 (кривая красного цвета) и 3 порядка (кривая синего цвета), шкала слева. Пунктирная кривая – полусуточные значения интенсивности космических лучей в ноябре 2003 г. По оси абсцисс – время. «Одновременное» применение полиномов 2 и 3 порядков расширяет частотный диапазон анализируемых вариаций параметра флуктуаций космических лучей.

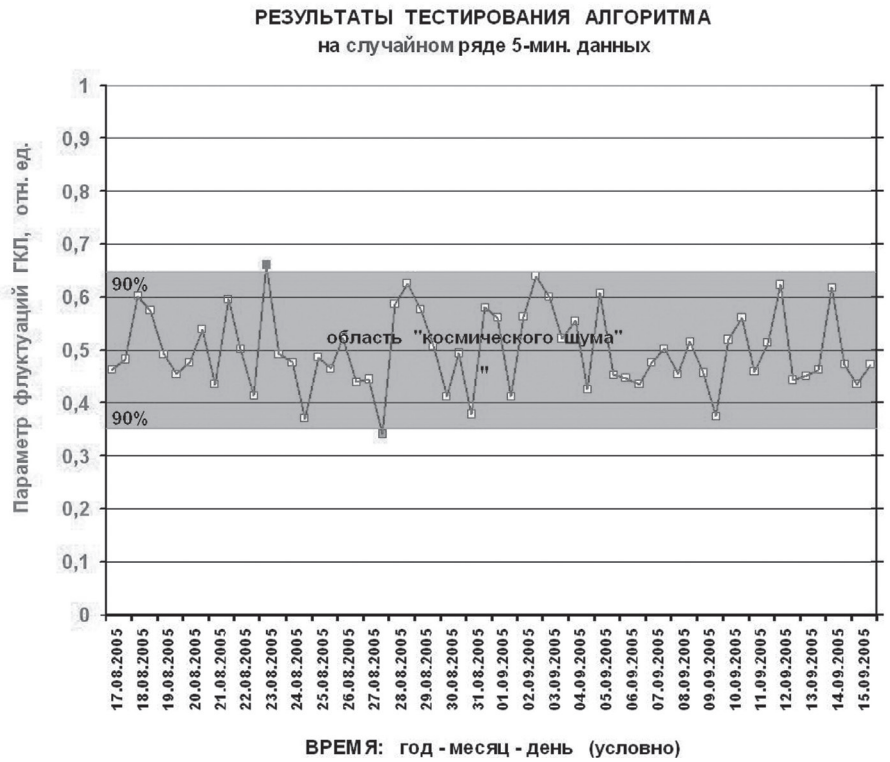


Рис. 8.9. Результаты тестирования алгоритма на случайном ряде чисел. Показан 90% уровень значимости P = 0,65. За исключением единственного значения параметра, которое превысило 90%-ный уровень значимости, остальные значения параметра находятся внутри указанной области «шума». По оси ординат – значения параметра флуктуаций в относительных единицах. По оси абсцисс – условное время.

8.3. Выявление предвестника ударных волн методом «наложения эпох» по ансамблю событий.

*«Сотри **случайные** черты – и ты увидишь: мир прекрасен».*
Александр Блок. 1911 г.

На рис. 8.11 представлены средние полусуточных значений интенсивности ГКЛ (синяя пунктирная кривая, открытые кружки – шкала справа) по ансамблю из 122 событий эффектов Форбуша за 1969 – 2014 гг. Использовались 5-минутные данные ст. Оулу (Финляндия). За событие принимается эффект Форбуша с началом в «нулевой» день – “0”. Расчет параметра флуктуаций ГКЛ проводился по 5-мин данным за

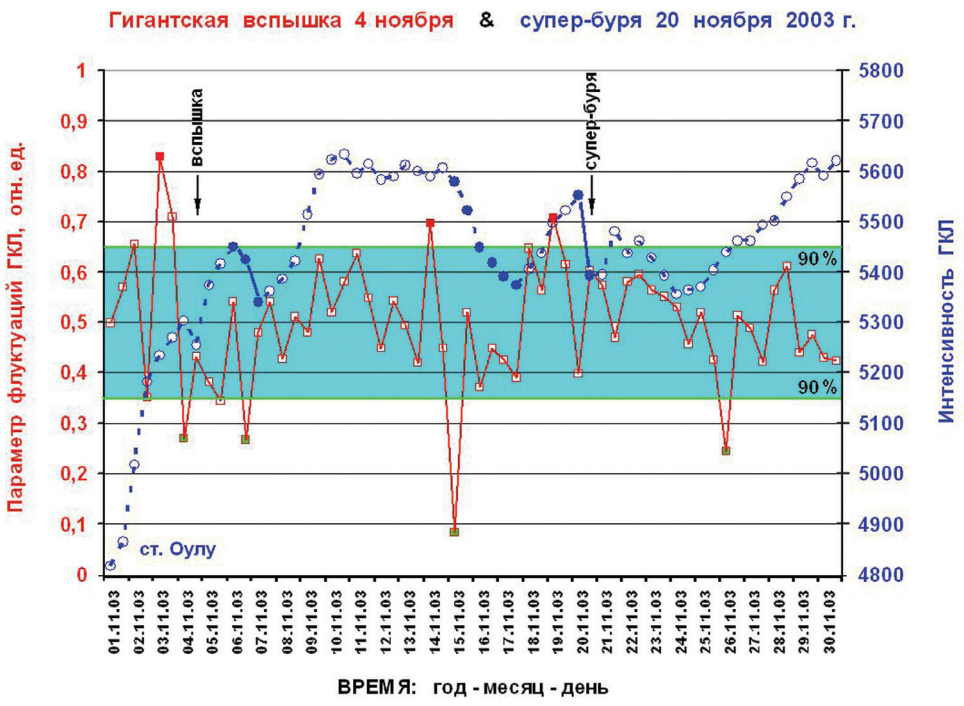


Рис. 8.10. Иллюстрация работы алгоритма расчета на примере экстремальных событий в ноябре 2003 г. По оси ординат – расчетные значения параметра флуктуаций в относительных единицах (сплошная кривая). Показан двухсторонний 90%-ный уровень значимости. Пунктирная кривая – полусуточные значения интенсивности космических лучей по данным ст. Оулу (Финляндия) в импульсах.

неделю до начала выбранного эффекта Фобуша, во время его, и в течение 4 суток после форбуш-понижения. Как правило, эффекту понижения интенсивности ГКЛ предшествует значительное (несколько порядков) повышение потока низкоэнергичных частиц космических лучей. Эти, «штормовые» частицы, собственно, и являются источником радиационного поражения систем жизнеобеспечения и телеметрии космических аппаратов. Все вместе: возрастание никоэнергичных частиц и последующий эффект Форбуша и представляет собой радиационный шторм. Радиационный шторм обычно сопровождается (с задержкой по времени, в среднем, на величину порядка ~1 суток) электромагнитной бурей, что уже все вместе и определяется как экстремальное событие Космической Погоды. На этом же рисунке представлены средние полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая красного цвета, квадратики – шкала слева) относительно того же – «нулевого»

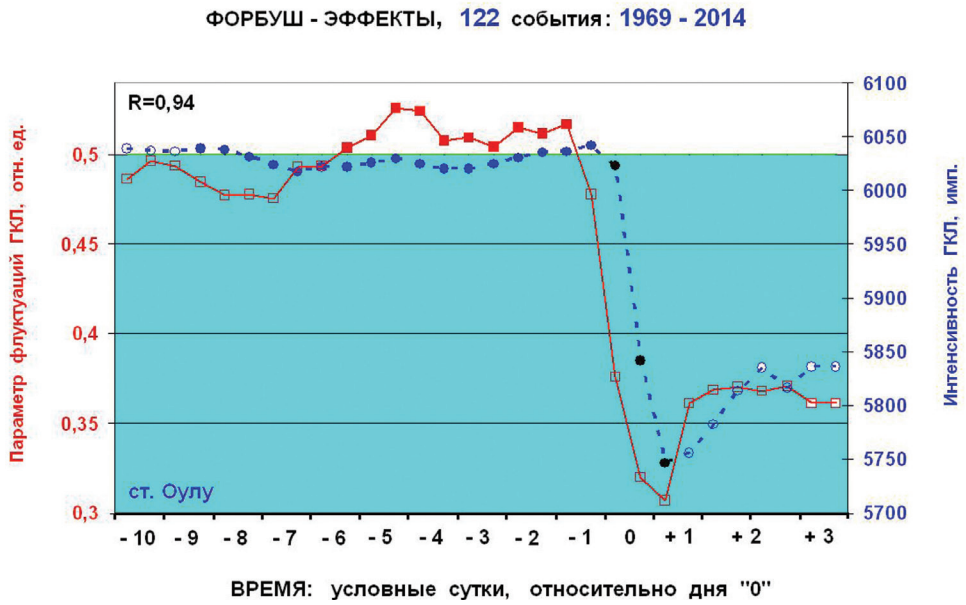


Рис. 8.11. Результаты проверки эффекта предвестника радиационного шторма по 122 событиям за период с 1969–2014 гг. По оси x, условное время – в сутках. Событием (радиационный шторм) считается эффект резкого и глубокого понижения интенсивности космических лучей в «нулевой» “0” день (сплошные кружки). Усреднение по 122 событиям проведено методом «наложения эпох». P = 0,5 – уровень космического «шума» для параметра флуктуаций ГКЛ. Квази-недельный сектор заблаговременного обнаружения радиационного шторма в интенсивности ГКЛ также отмечен сплошными кружками.

дня. Результаты расчета параметра флуктуаций для всех 122 событий «сфазированы» относительно «нулевого» дня.

В средних значениях параметра флуктуациях космических лучей наблюдается 2 выраженных максимума с интервалом между ними, в среднем, $\Delta t = 4\pm1$ суток. Оба указанных максимума параметра флуктуаций находится выше уровня космического «шума», т.е. $P > 0{,}5$. Это указывает на неслучайность, или значимость, в среднем, регулярного сигнала. Высокий ($R = 0{,}94$), коэффициент взаимной корреляции между параметром флуктуаций и интенсивностью ГКЛ подтверждает это (рис. 8.12). На прогностические свойства параметра флуктуаций указывает *систематическое* опережение параметра флуктуаций относительно соответствующих значений интенсивности ГКЛ: максимум взаимной корреляции смещен, в среднем, на половину суток.

Параметр флуктуаций космических лучей является нелинейной математической моделью интенсивности ГКЛ, причем, ее прогностической

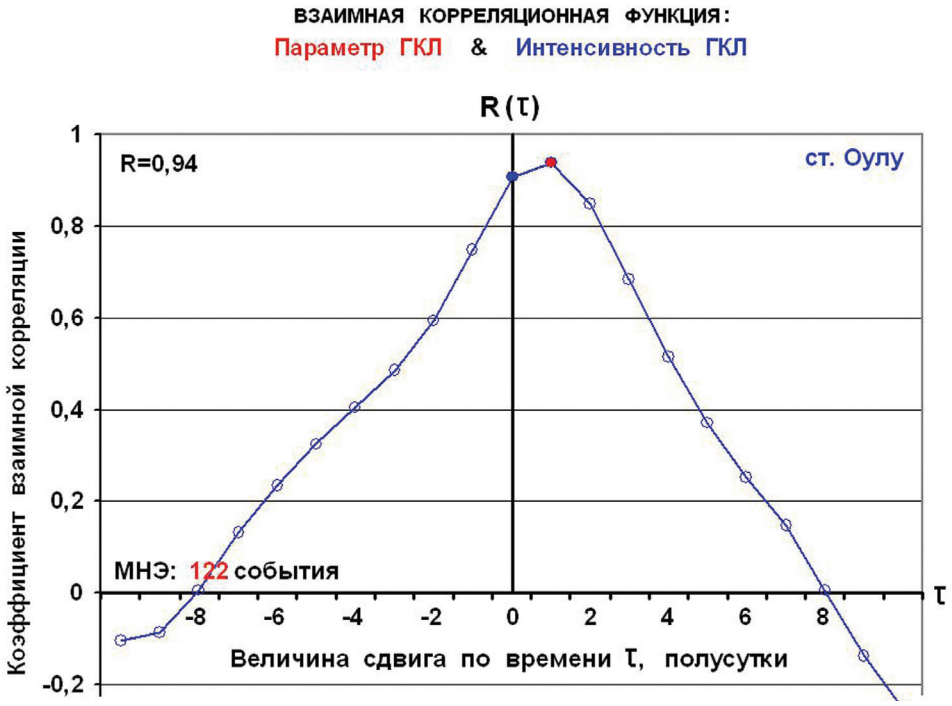


Рис. 8.12. Коэффициент взаимной корреляции между параметром флуктуаций и интенсивностью ГКЛ рассчитанный по 122 событиям. По оси абсцисс – величина сдвига по времени τ (Δτ = 12 час). На прогностические свойства параметра флуктуаций указывает систематическое опережение параметра флуктуаций относительно соответствующих значений интенсивности ГКЛ: максимум взаимной корреляции смещен, в среднем, на половину суток.

моделью. Это следует из концепции «частичной детерминированности» и вероятностной трактовки взаимной корреляционной функции процесса и его модели, данной выше (см. п. 3.4). Высокий ($R = 0{,}94$), коэффициент взаимной корреляции между параметром флуктуаций и интенсивностью ГКЛ дает, следовательно, усредненную (по выборке событий) оценку вероятности прогноза условного эффекта Форбуша не менее 90%. Это указывает на эффективность выделения сигнала на фоне космического «шума» методом наложения эпох.

Явно выраженная вариация в виде «бинарной» структуры параметра флуктуаций, в среднем, за неделю до регистрации эффекта Форбуша, отражает наличие *квази-недельного сектора* «ранней диагностики» ударных волн до их прихода на орбиту Земли. В интенсивности космических лучей, сектор ранней диагностики проявляется в виде предпонижения интенсивности ГКЛ, в среднем, за неделю до начала

главной фазы эффекта Форбуша, что и было нами установлено ранее по индексу мерцаний космических лучей (см. выше, п. 5.4).

8.4. Проявление динамики осцилляций гелиосферного токового слоя в космических лучах.

*«Нестационарные возмущения довольно широкого класса в процессе распространения асимптотически приближаются к … **солитону**».*

Рабинович М.И. и Трубецков Д.И. 1984 г.

Первый максимум выявленной бинарной структуры в параметре флуктуаций приходится, как правило, на момент прохождения границы сектора гелиосферного токового слоя (ГТС). Причем, все это происходит на фоне предпонижения в интенсивности ГКЛ перед главной фазой эффекта Форбуша (см. рис. 8.11). На важный вклад ГТС в геоэффективность ударных волн, уже указывалось выше, см. пп. 5.4-5.5. Действительно, с увеличением активности Солнца образуются двух-, четырех- и, далее, *мультисекторная* структура ГТС /6/.

В случае серийных событий как, например, в апреле 2001 г. (рис. 8.13), наличие гигантских осцилляций с квази-недельным периодом 4±1 суток выражено наиболее ярко. Причем, как в интенсивности ГКЛ, так и в параметре флуктуаций: передвестники регистрируются, в среднем, через 4 суток. Квазипериодический характер квази-недельной вариации, выявленный нами в космических лучах, отражает квазипериодический характер осцилляций параметров солнечного ветра: скорости (рис. 8.14) и потока низкоэнергичных протонов с энергией ~1 Мэв (см. рис. 5.12). Вертикальными стрелками на рис. 5.12 отмечены моменты регистрации предвестников. Динамику гигантских осцилляций ГТС на протяжении одного оборота Солнца в событиях 2001 г. можно проследить по результатам вейвлет-анализа (рис. 8.15). Действительно, в течение целого одного оборота Солнца доминирует, практически, одиночная спектральная «линия» с периодом 4±1 сут.

Наиболее ярко гигантские осцилляции гелиосферного токового слоя проявляются в экстремальных событиях. Например, в событии 29 октября 2003 г. (рис. 8.16). Значимые (на уровне 95%) предвестники были зарегистрированы: 20.10.2003, 23.10.2003, и 26–27.10.2003. Регистрация последующих понижений в интенсивности ГКЛ, т.е. диагностика прогнозируемых событий, соответственно: 21.10.2003, 24.10.2003 и 27–30.10.2003. Достоверность предвестников подтверждается данными прямых измерений межпланетного магнитного поля, параметров

Рис. 8.13. Гигантские осцилляции ГТС с периодом 4±1 сут. в марте – апреле 2001 г. По оси ординат: точечная кривая, открытые кружки – шкала справа, отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей; сплошная кривая, квадратики – шкала слева, отложены полусуточные значения параметра флуктуаций.

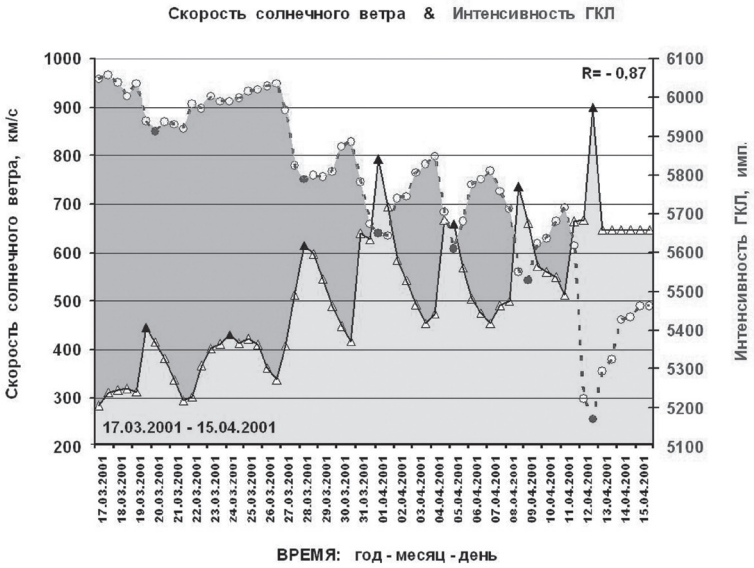


Рис. 8.14. Квазипериодический характер квази-недельной вариации в интенсивности космических лучей, точечная кривая – открытые кружки, шкала справа и скорости солнечного ветра – треугольники, шкала слева. По оси абсцисс – время: 17.03.2001 – 15.04.2001. Коэффициент антикорреляции R = –0.87.

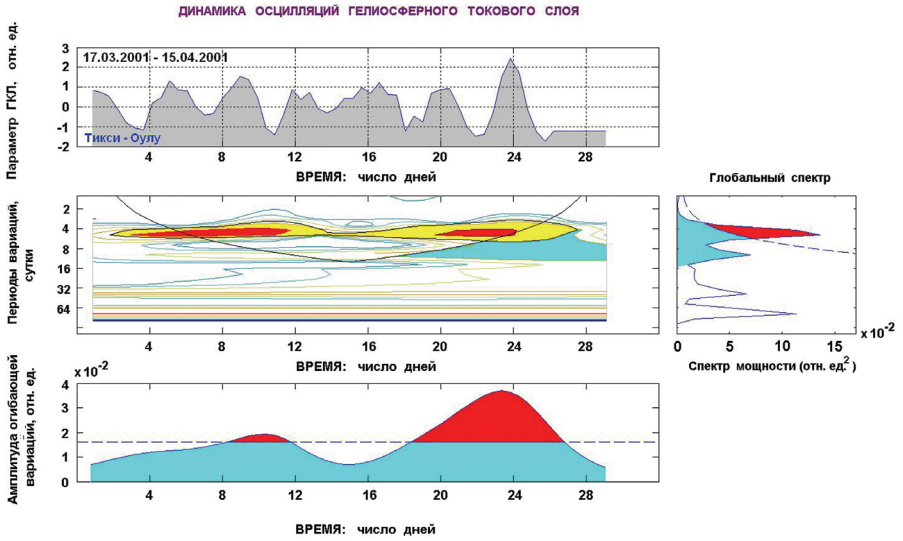


Рис. 8.15. Гигантские осцилляции гелиосферного тового слоя в марте – апреле 2001 г. (на верхней панели) и результаты их вейвлет-анализа (в средней части рисунка). Справа – глобальный спектр в целом, за анализируемый период. Внизу – огибающая вариаций в относительных единицах. В течение одного оборота Солнца с 17.03.2001–15.04.2001 в параметре флуктуаций доминирует явно выраженная, одиночная спектральная «линия» с периодом T ≈ 4±1 сут.

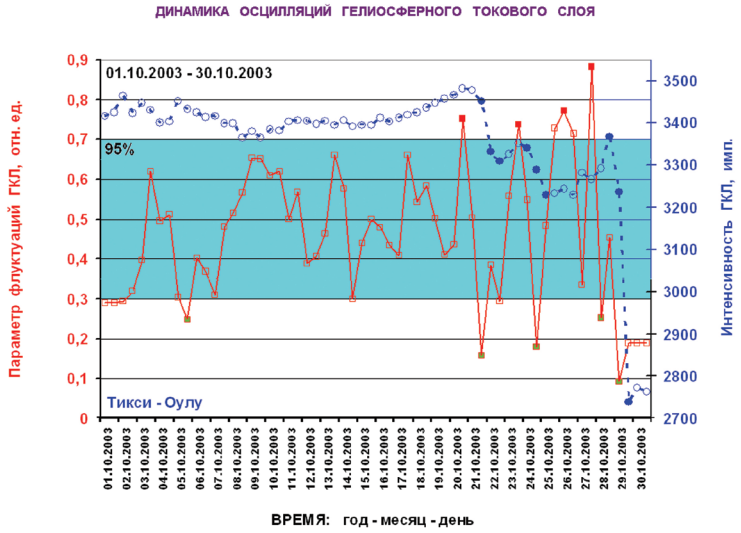


Рис. 8.16. Гигантские осцилляции ГТС в октябре 2003 г. по данным пары станций Тикси – Оулу. По оси ординат: пунктирная кривая, открытые кружки – шкала справа, отложены полусуточные значения интенсивности ГКЛ; сплошная кривая, квадратики – шкала слева, отложены полусуточные значения параметра флуктуаций. Показан 95% уровень значимости. По оси абсцисс – время.

солнечного ветра и потока низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ на космических аппаратах (8.17). Вертикальными стрелками показано местоположение предвестников. Видно, что все предвестники предшествуют значительным возрастаниям низкоэнергичных частиц, как это уже отмечалось выше (см. рис. 5.12). Отсутствует предвестник только в одном случае: в событии 5 октября 2003 г. В итоге, из 5 событий пропущенным оказалось лишь событие в начале октября 2003 г. Оправдываемость прогноза составляет, в данном случае, величину **≈80**%.

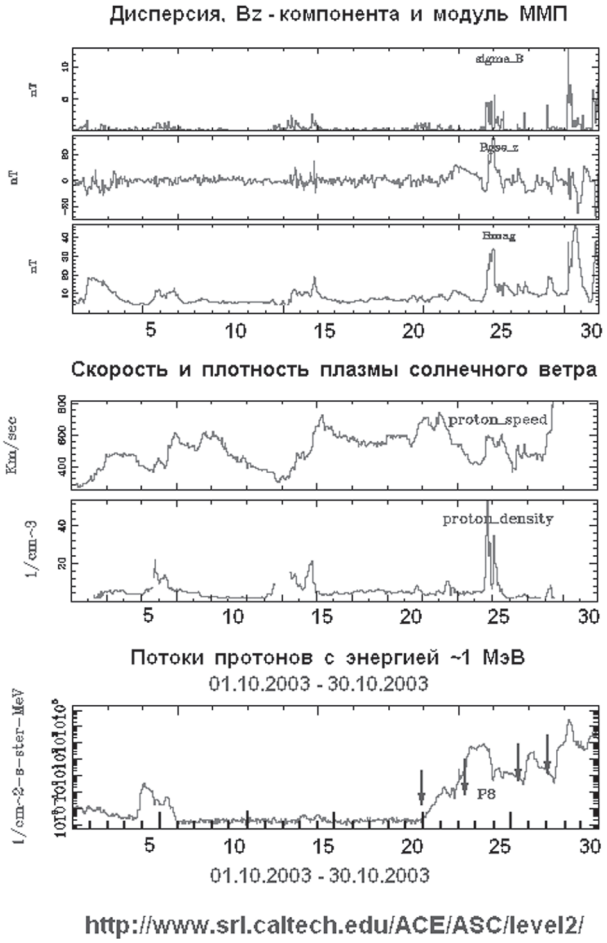


Рис. 8.17. Данные прямых измерений межпланетного магнитного поля, параметров солнечного ветра и потока низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ на космических аппаратах в октябре 2003 г. Вертикальными стрелками показано местоположение предвестников. Практически, все предвестники предшествуют значительным возрастаниям низкоэнергичных частиц. Отсутствует предвестник только в одном случае: в событии 5 октября 2003 г.

Как и в предыдущем случае, для анализа динамики гигантских осцилляций в октябре 2003 г. применим метод вейвлет-анализа. В результате, получены указания на важную роль процесса нелинейного укручения амплитуды и, соответственно, уменьшения периода квази-недельной осцилляции ГТС: вариация с периодом ≈7 сут. трансформируется в вариацию большей амплитуды с меньшим периодом (≈4 сут.) – аналог гигантского *солитона* в гелиосферном токовом слое (рис. 8.18). Процесс завершается регистрацией экстремальной по мощности ударной волны, сопровождающейся не менее экстремальным эффектом Форбуша (см. рис. 8.16). Рассмотрение событий в целом, т.е. за период с 16.10.2003 – 14.11.2003 по данным ст. Тикси, это подтверждает (рис. 8.19-8.20).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможной реализации во время геоэффективной фазы солнечного цикла на орбите Земли *распределенного* источника мощных ударных волн, т.е. о наличии у гелиосферного токового слоя собственной «передаточной функции». В событиях, аналогичных событиям в октябре-ноябре 2003 г., довольно

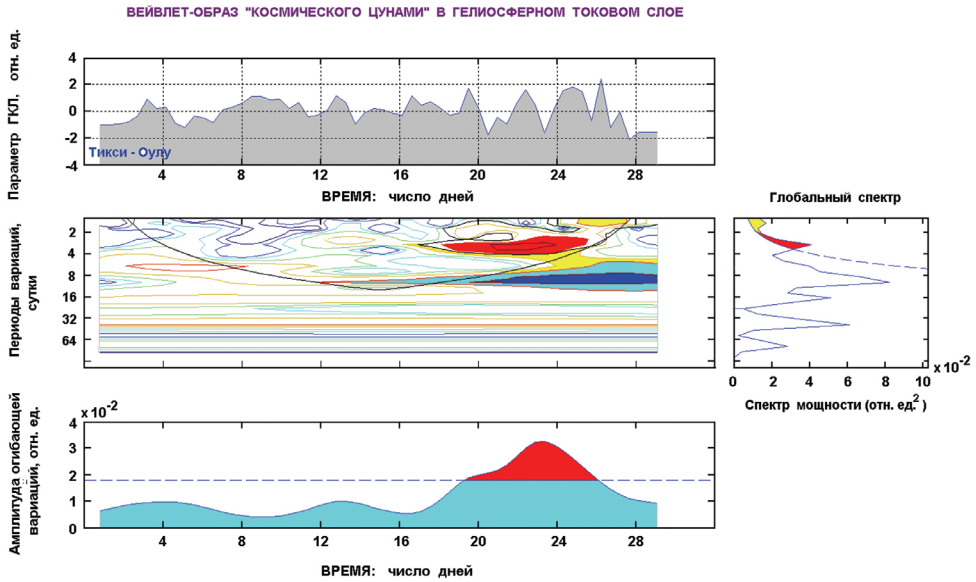


Рис. 8.18. Гигантские осцилляции ГТС в октябре 2003 г. (на верхней панели) и результаты их вейвлет-анализа (в средней части рисунка). Справа – глобальный спектр в целом, за анализируемый период. Внизу – огибающая вариаций в относительных единицах. Вариация с периодом ≈7сут. трансформируется в вариацию большей амплитуды с меньшим периодом (≈4 сут.). Процесс нелинейного «опрокидывания» гигантской осцилляции завершается расщеплением спектральной «лини» на высокочастотную и низкочастотную компоненты.

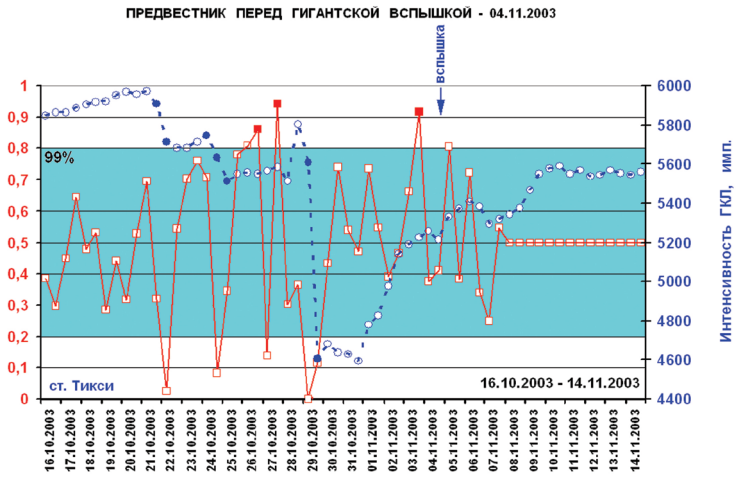


Рис. 8.19. Рассмотрение процесса нелинейного «опрокидывания» осцилляций ГТС в целом, за период с 16.10.2003–14.11.2003 по данным ст. Тикси. По оси ординат: пунктирная кривая, открытые кружки – шкала справа, отложены полусуточные значения интенсивности ГКЛ; сплошная кривая, квадратики – шкала слева, отложены полусуточные значения параметра флуктуаций. Показан 99% уровень значимости. По оси абсцисс – время. Вертикальной стрелкой отмечено местоположение гигантской вспышки класса X20.

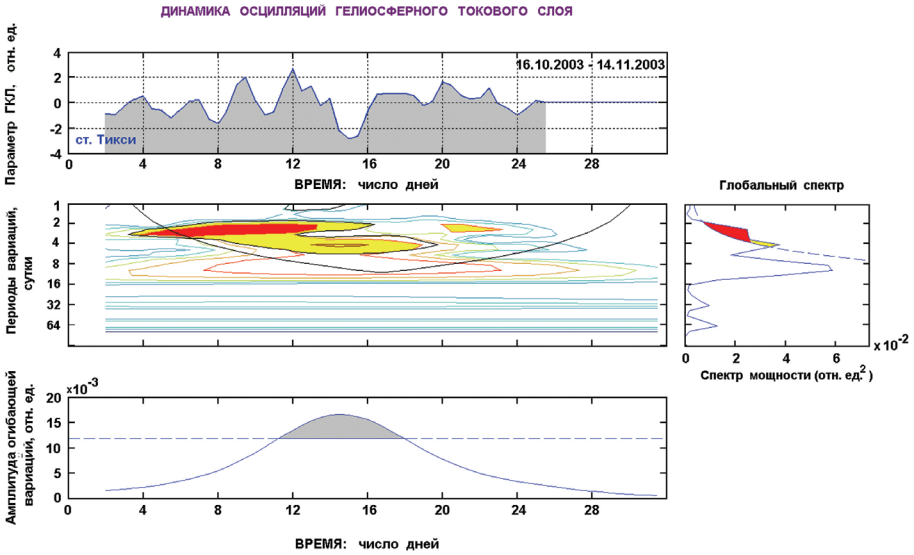


Рис. 8.20. Процесс нелинейного опрокидывания гигантских осцилляций ГТС в конце октября 2003 г. по результатам вейвлет – анализа. Эффект расщепление спектральной «линии» на высокочастотную и низкочастотную компоненты (в средней части рисунка). Справа – глобальный спектр в целом, за анализируемый период. Внизу – огибающая осцилляций в относительных единицах.

сложно, а то и невозможно отождествить доминирующий источник активности: в это время на видимой части солнечного диска были зарегистрированы 3 активные области: №№ 484, 486 и 488. В подобных случаях доминирующую роль играют нелинейные эффекты, приводящие к укручению гигантских осцилляций гелиосферного токового слоя, своеобразного аналога «космического цунами» на орбите Земли, а по физической сути – *группового солитона* (см. рис. 8.18 и 8.20).

Интересной особенностью случаев регистрации гигантских осцилляций гелиосферного токового слоя во время серийных событий (как правило, на фазе максимума 11-летнего цикла) является их корреляция с периодами усиления планетарной сейсмической активности. Причиной этому могло бы стать *многократное* и *периодическое* воздействие гигантских осцилляций ГТС на геосферные оболочки. В частности, на проводящие слои тектоносферы Земли через геомагнитное поле /7/. Подобный механизм (очевидно, резонансной) передачи энергии солнечного ветра через гигантские осцилляции гелиосферного токового слоя в максимуме цикла, возможно, и лежит в основе связи сейсмичности Земли с 11-летним циклом солнечной активности, выявленной ранее в работе С.Д. Сытинского /8/.

8.5. «Загоризонтное» обнаружение геоэффективного источника активности на Солнце по эффекту «гало» в космических лучах.

Наряду с гиганскими осцилляциями в последней декаде октября 2003 г., 3 ноября был зарегистрирован значимый предвестник (рис. 8.19). Последующие события показали, что во время захода мощной активной области № 486 за западный край солнечного диска, 4 ноября была зарегистрирована самая мощная (X20) вспышка за всю историю современных наблюдений солнечной активности. И только положение вспышки на западном крае солнечного диска не позволило ей проявиться на Земле надлежащим образом: 6-7 ноября было зарегистрировано лишь небольшое понижение интенсивности ГКЛ. Важно здесь то, что возмущение ММП от, практически, залимбовой вспышки 4 ноября 2003 г., тем не менее, проявилась в космических лучах в виде предвестника 3 ноября (см. рис. 8.19). Данный случай подтверждает вывод о наличии *квазинедельного* сектора ранней диагностики, сделанный выше в п. 8.3, см. также п. 5.3.

Очевидно, что отождествление источника активности желательно проводить при единственной и мощной активной области. Как это наблюдалось нами в обсерватории Тикси, например, в июле 1982 г. (см. рис. 7.1). Тогда, это был первый случай обнаружения предвестника от активной области, *выходящей* на восточный край солнечного диска.

Подобные благоприятные условия на Солнце, сложились в августе-сентябре 2005. Новая активная область № 798 зародилась буквально у нас на глазах: с 18 на 19 августа 2005 г. на, практически, чистом от пятен лимбе Солнца (наблюдалось лишь единственное неактивное пятно).

Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 20 августа (рис. 8.21). См. также рис. 8.22, где приводятся данные прямых измерениий на космическом аппарате ACE: дисперсия, B_z – компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ. Сплошной стрелкой (синего цвета) маркируются предвестники геоэффективных событий с величиной скачка магнитного поля свыше $15\ nT$. Все пропущенные события (и геоэффективные и не геоэффективные) маркируются открытым кружком. Эффект Форбуша с амплитудой понижения ≈5%, был зарегистрирован 24–25 августа, сопровождавшийся геомагнитной бурей.

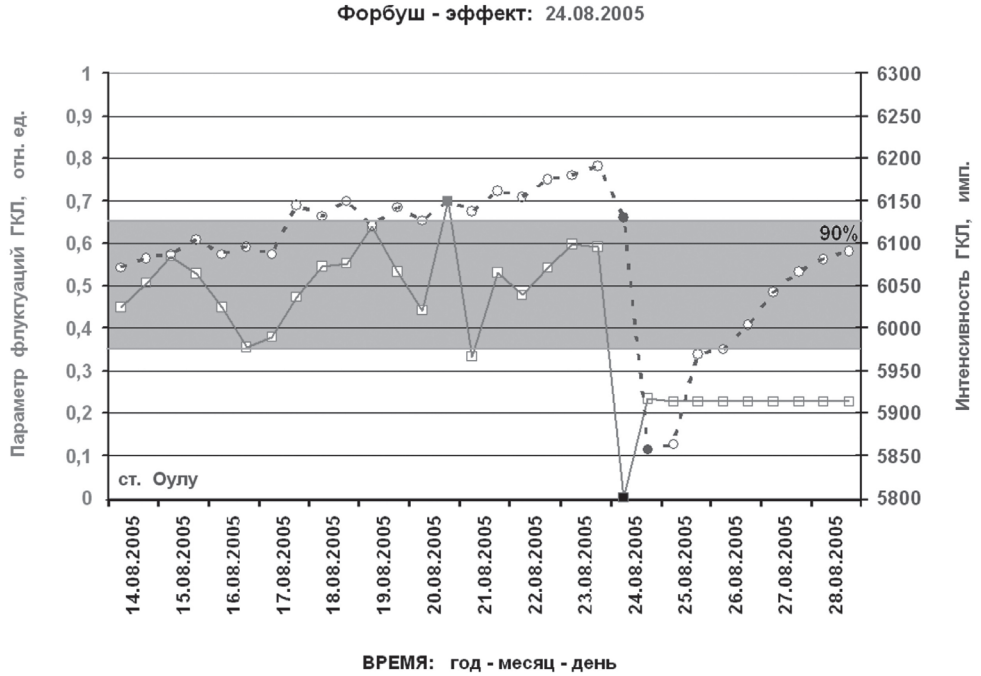


Рис. 8.21. Результаты мониторинга космических лучей в августе 2005 г. По оси ординат: шкала справа - отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Значимое значение параметра флуктуаций ГКЛ от 20.08.2005 г. – предвестник, показан сплошным квадратиком.

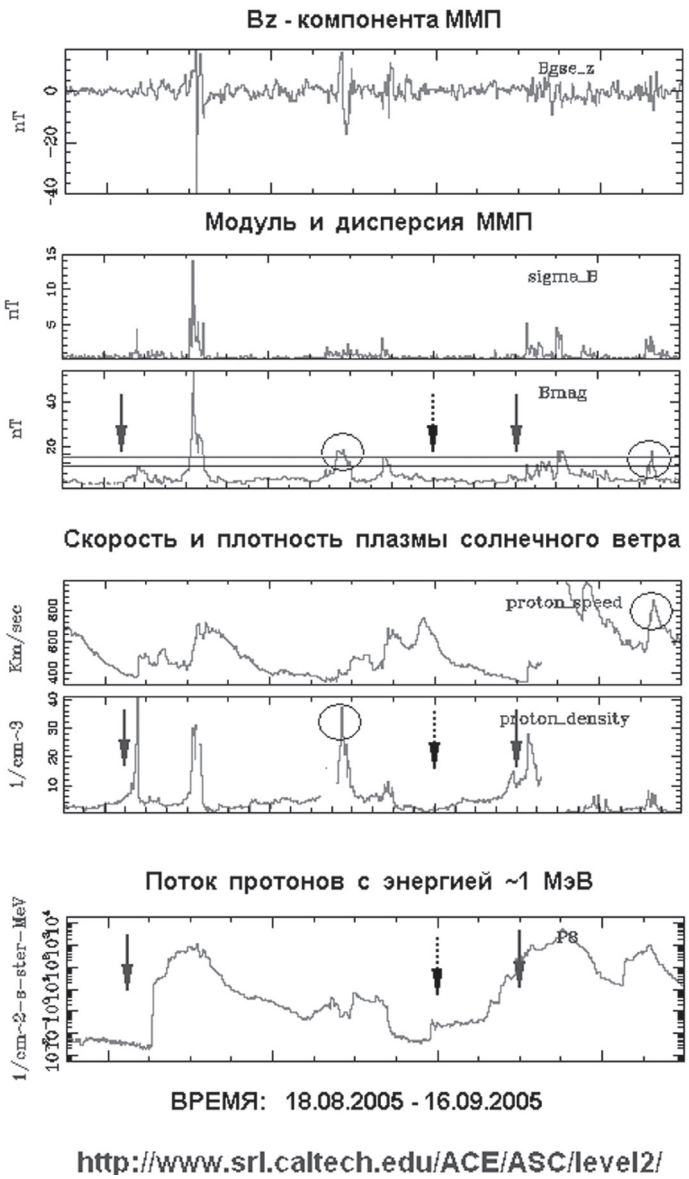


Рис. 8.22. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: дисперсия, Bz – компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ в августе-сентябре 2005 г. Сплошной стрелкой маркируются предвестники геоэффективных событий с величиной скачка магнитного поля свыше 15 nT. Все пропущенные события (и геоэффективные и не геоэффективные) маркируются открытым кружком. Точечной стрелкой маркируется предвестник на стадии выхода активной области на видимую часть диска Солнца.

Вторичное появление, той же самой активной области, на видимую часть солнечного диска отмечено с 6 на 7 сентября. Важно отметить, что вторичное появление той же мощной активной области № 798 произошло на совершенно чистом от пятен солнечном диске. Таким образом, в сентябрьском событии 2005 г. создались те самые редкие благоприятные условия, которые так необходимы для надежного отождествления источника предвестника в космических лучах.

Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 4 сентября 2005 г. (см. рис. 8.23), т.е. также в процессе *выхода* активной области № 798 на видимую часть диска Солнца: указанная особенность данного предвестника на рис. 8.22 отмечена точечной стрелкой черного цвета. Но не стоит исключать, тем не менее, и проявление в космических лучах прохождения в начале сентября высокоскоростного потока солнечного ветра. Важно отметить, что еще до выхода активной области № 798 на видимую часть солнечного диска она уже была активной.

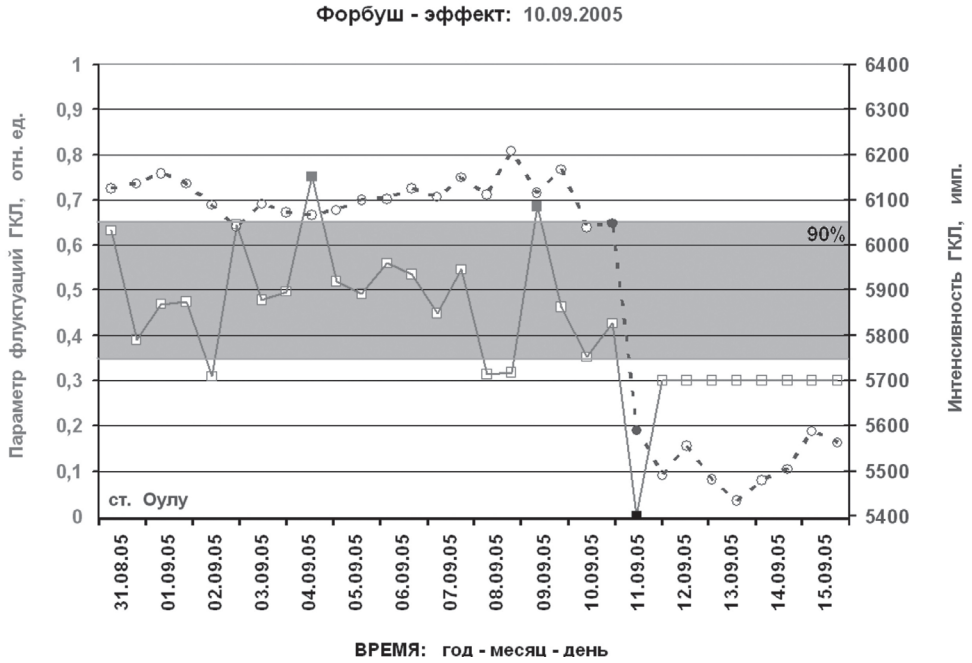


Рис. 8.23. Результаты мониторинга космических лучей в сентябре 2005 г. По оси ординат: шкала справа - отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Предвестники зарегистрированы 04.09.2005 и 09.09.2005 г. – показаны сплошными квадратиками.

С 1 на 2 сентября на обратной стороне от Земли было зарегистрирован мощный выброс корональной массы Солнца, т.е. СМЕ. Это подтверждается регистрацией 4–6 сентября длительных рентгеновских вспышек класса С и М, сопровождавшихся выбросами корональной массы. Это проявилось в том, что уже во время выхода указанной активной области из-за восточного лимба Солнца с 6 на 7 сентября, зарегистрировано возрастание низкоэнергичных частиц космических лучей в диапазоне от сотен КэВ до ста МэВ.

При дальнейшем прохождении данной активной области центрального меридиана, в космических лучах с 10 на 11 сентября был зарегистрирован эффект Форбуша с амплитудой понижения интенсивности ГКЛ ~10%. Вместе со штормовыми частицами космических лучей низких энергий все это и представляет собой радиационную бурю. Была зарегистрирована также и геомагнитная буря, достигшая своего максимума 11 сентября ($K_p = 9$). Все же вместе, радиационная и геомагнитная бури и составляют одно из самых экстремальных событий Космической погоды 2005 г. в прошедшем 23 цикле.

Аналогичная, благоприятная ситуация для надежного отождествления источника предвестника в космических лучах сложилась также в начале декабря 2006 г. Мощная и единственная активная область № 930 вышедшая с **5** на **6** декабря 2006 г. на видимую часть солнечного диска, оказалась единственным потенциальным источником активности. В отличие от предыдущего события в сентябре 2005 г., в начале декабря 2006 г. отсутствовали явно выраженные высокоскоростные потоки солнечного ветра. Можно считать, что данное событие максимально удовлетворяет условиям идентификации источника модуляции космических лучей. Следует заметить, что область № 930 оказалась единственной областью достаточно большого размера и на предыдущем солнечном обороте в ноябре месяце. Но ее активность за все время прохождения видимой части солнечного диска, при таких размерах была удивительно низкой.

Предвестник **3** декабря 2006 г. был зарегистрирован от *залимбового* источника, т.е. не менее чем за сутки до выхода активной области № 930 на видимую часть диска Солнца (рис. 8.24). Данные прямых измерений параметров солнечного ветра приведены на рис. 8.25. Местоположение предвестника от 03.12.2006 г. отмечено точечной стрелкой. Область № 930, на момент ее выхода на видимую часть солнечного диска с **5** на **6** декабря, уже была активной: 5–7 декабря регистрировалась целая серия рентгеновских вспышек класса М и Х, сопровождавшихся штормовыми частицами космических лучей низких энергий от 100 КэВ до 10 МэВ.

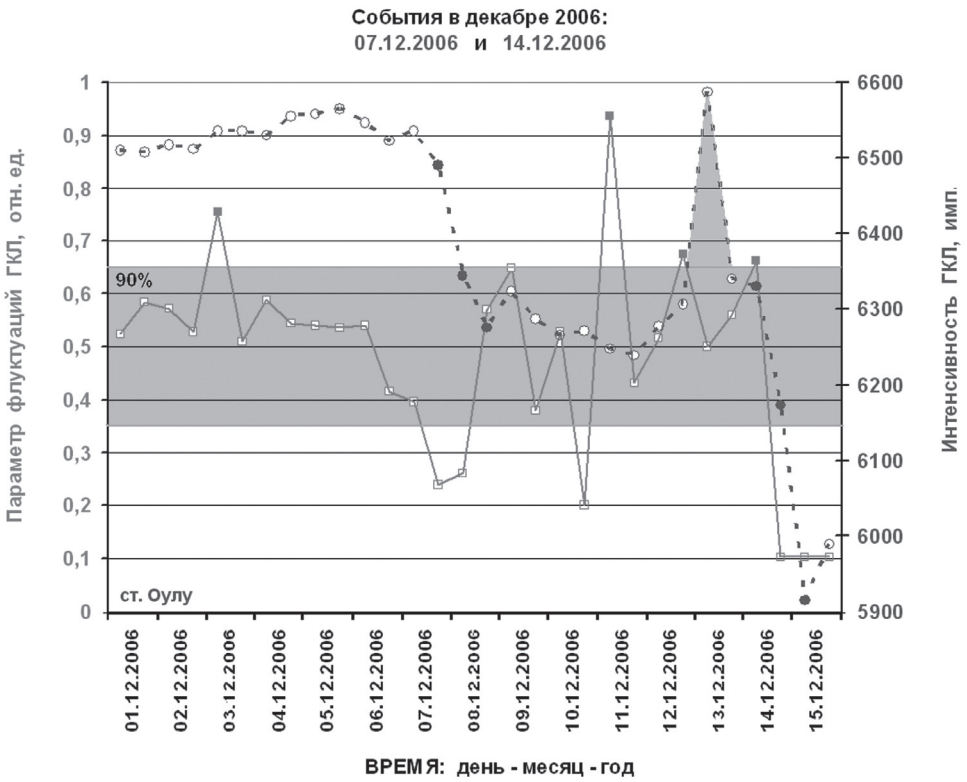


Рис. 8.24. Результаты мониторинга космических лучей в ноябре–декабре 2006 г. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Первый предвестник зарегистрирован 03.12.2006 г., второй – 11.12.2006 г.

Дальнейшее развитие событий происходило следующим образом: с 7-12 декабря началось форбуш-понижение интенсивности ГКЛ и геомагнитная буря. 11 декабря был зарегистрирован очередной предвестник, с последующим эффектом Форбуша 14-17 декабря с амплитудой ≈7%, с последующей мощной геомагнитной бурей ($K_p = 8$). Данное усиление активности связано со вспышками класса X, 13 и 14 декабря, сопровождающихся как возрастанием штормовых частиц 13-15 декабря, так и наземным возрастанием 13 декабря частиц высокой энергии ~1 ГэВ (заштрихованная область на рис. 8.24).

Предвестник 03.12.2006 примечателен также тем, что в это время отсутствует поток низкоэнергичных частиц, в том числе и с энергией порядка ~1 МэВ (см. рис. 8.25). Это важно иметь в виду в связи с тем, что

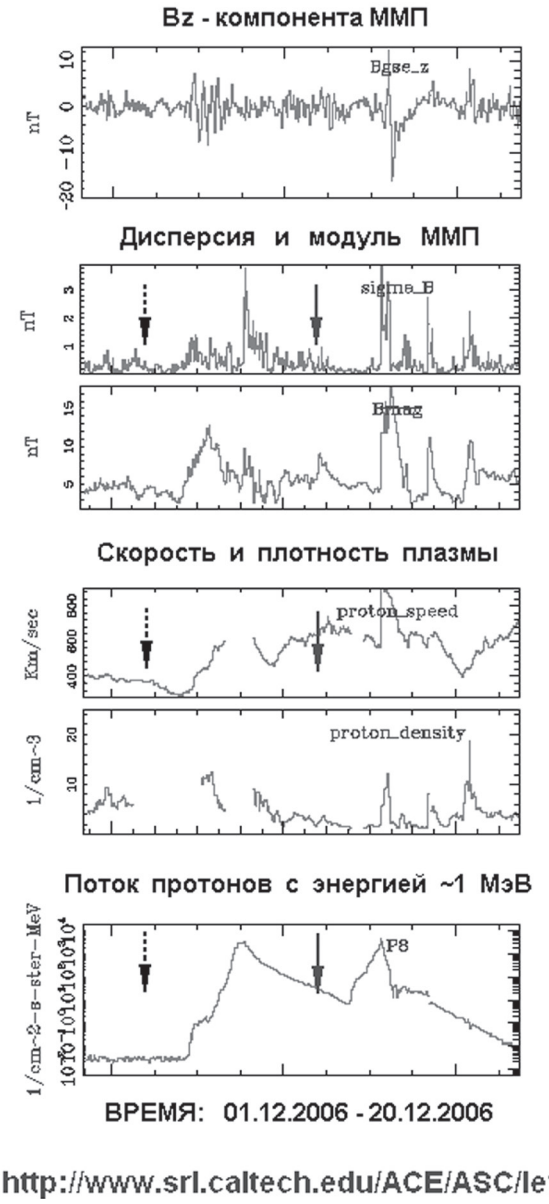


Рис. 8.25. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: дисперсия, Bz – компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ в декабре 2006 г. Сплошной стрелкой маркируются предвестники геоэффективных событий с величиной скачка магнитного поля свыше 15 nT. Точечной стрелкой маркируется предвестник на стадии выхода активной области на видимую часть солнечного диска.

время от времени поднимается вопрос об источнике модуляции флуктуаций ГКЛ (см. выше, п. 2.3). Основным источником МГД-волн, который вызывает модуляцию флуктуаций интенсивности ГКЛ, является крупномасштабное возмущение солнечного ветра – ударная волна, на которой (при выполнении необходимых условий) происходит и ускорение частиц до энергии порядка ~1 МэВ.

Таким образом, достаточным условием для модуляции флуктуаций космических лучей МГД-волнами является наличие крупномасштабного возмущения с основным характерным масштабом, т.е. ударной волны с турбулентной структурой на ее фронте (“sheat”). Этот вывод подтверждается данными прямых измерений: коррелированные флуктуации ГКЛ регистрируются (в большинстве случаев) при наличии достаточного ($\geq 10\mathrm{nT}$) возмущения ММП, градиентов скорости и плотности плазмы солнечного ветра. И, что важно, часто при отсутствии потоков низкоэнергичных частиц. И, наоборот, в отсутствие возмущений ММП и сколько-нибудь значительных градиентов скорости и плотности солнечного ветра, значимые мерцания интенсивности ГКЛ, как правило, отсутствуют. Притом, что в это время может регистрироваться поток низкоэнергичных частиц с энергией до ~1 МэВ.

8.6. Нелокальные свойства космических лучей.

«Гипотеза о локальности предполагает, что нечто сделанное в одном месте может иметь эффект только в этом месте. … Локальность долгое время была одним из основных принципов физики. Но, возможно, она ***не является*** принципом*, который не может быть нарушен».*

Дж. Гринштейн, А. Зайонц. КВАНТОВЫЙ ВЫЗОВ.
Современные исследования оснований квантовой механики.
Долгопрудный. Изд-во «Интеллект». 2008. Стр. 26.

На рис. 8.26 представлены результаты мониторинга космических лучей в сентябре 2011 г., т.е. уже в новом 24 цикле. Пунктирной кривой синего цвета на этом рисунке показаны полусуточные значения интенсивности космических лучей (шкала справа). Соответствующие значения параметра флуктуаций космических лучей представлены на рисунке кривой красного цвета (шкала слева). Показан 90%-ный уровень значимости раннего обнаружения. **9–10** сентября, **17–18** сентября и **26–28** сентября регистрируется серия форбуш-понижений интенсивности космических лучей сопровождавшаяся геомагнитными бурями (рис. 8.27 /9/).

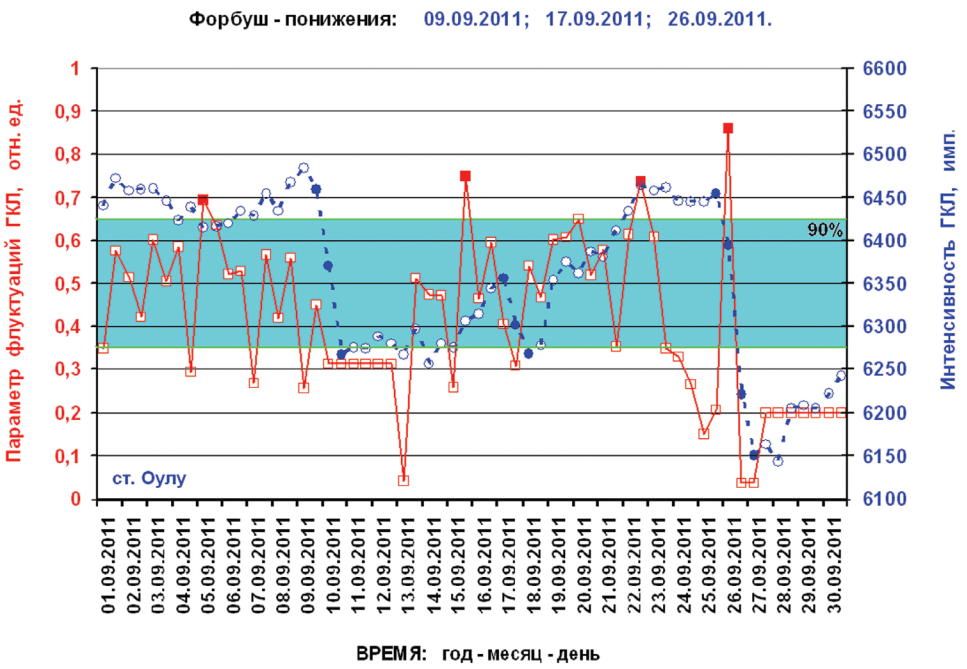


Рис. 8.26. Результаты мониторинга космических лучей в сентябре 2011 г. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Предвестники зарегистрированы: 05.09.2011, 15.09.2005 г., 22 и 26 сентября 2011 г. (показаны сплошными квадратиками).

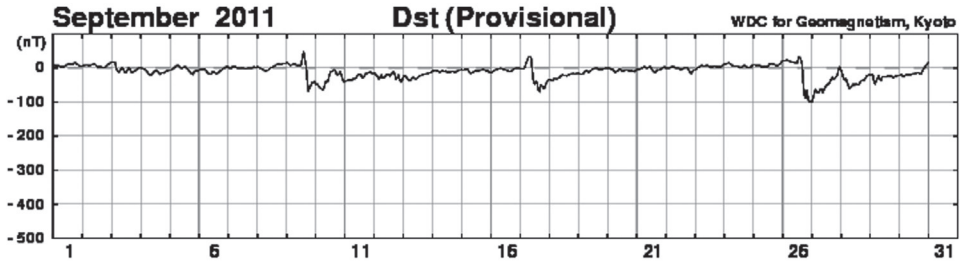


Рис. 8.27. Результаты измерений индекса геомагнитной возмущенности (Dst – вариации) по данным ст. Киото за сентябрь 2011 г. /8/.

Всем трем событиям предшествуют предвестники в параметре флуктуаций космических лучей: 05.09.2011, 15.09.2011 и 24.09.2011, соответственно. Это следует из сопоставления рисунков 8.26 – 8.28. Событие 26-27 сентября оказалось первым большим событием, после

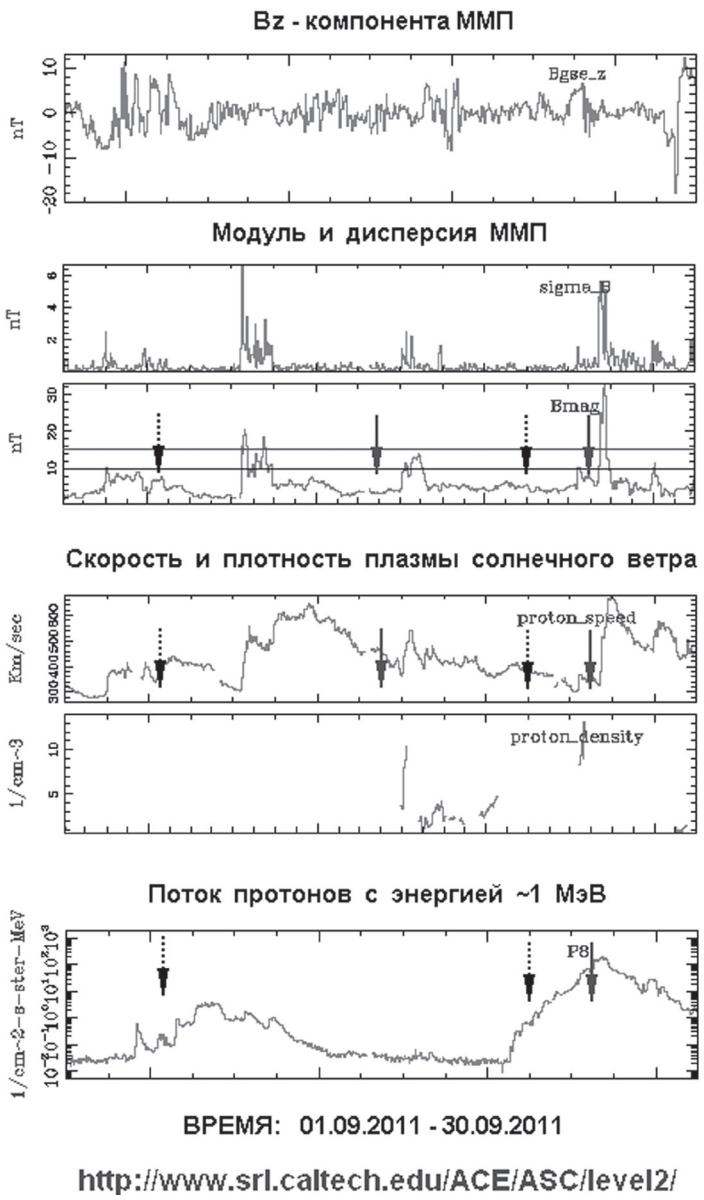


Рис. 8.28. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: дисперсия, Bz – компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ в сентябре 2011 г. Сплошной стрелкой маркируются предвестники геоэффективных событий с величиной скачка магнитного поля свыше 15 nT. Точечной стрелкой маркируется предвестник на стадии выхода активной области на видимую часть солнечного диска.

затянувшегося минимума 23 цикла. Предвестник был зарегистрирован 22 сентября, т.е. также на стадии выхода с 21 на 22 сентября мощной активной области № 1302 на восточный край солнечного диска. Все это происходило на фоне рентгеновских вспышек класса М и возрастания низкоэнергичных частиц, которое продолжадлсь вплоть до прихода фронта межпланетной ударной волны 26 сентября. Тогда и был зарегистрирован эффект Форбуша с амплитудой не менее ~6%.

Выше, было показано, что на стадии выхода мощной (и единственной) активной области на видимую часть солнечного диска, эффект «гало» в космических лучах достаточно выражен. Очевидно, что в этом случае ярко проявляются нелокальные свойства замагниченной среды, в которой и распространяются космические лучи. Нелокальность же космических лучей проявляется в кластеризации интенсивности, т.е. регистрации пучков частиц – эффект «гало» в космических лучах во время выхода геоэффективного источника активности на видимую часть солнечного диска. Все это происходит на фоне предпонижения (обусловленного геоэффективностью источника) в интенсивности ГКЛ до начала главной фазы эффекта Форбуша. Длительность и глубина предпонижения и определяет квази-недельный долготный сектор ранней диагностики ударных волн до их прихода на орбиту Земли (схема 8.6.1а). Об обнаружении подобного квази-недельного сектора ранней диагностики говорилось выше в пп. 5.4-5.5 и п. 8.2. Различные проекции трехмерной картины распрстранения, поясняющие это на примере события 26 сентября 2011 г., с момента регистрации предвестника 22 сентября, представлены на схеме 8.6.2.

Выше (п. 8.5), говорилось о регистрации 3 ноября 2003 г. предвестника от источника, заходящего за западный край солнечного диска. Аналогичный случай обнаружения предвестника в космических лучах, во время захода активной области № 1319 за западный край солнечного диска, произошел в октябре 2011 г. Этой ситуации соответствует схема 8.6.1б. В космических лучах предвестники были обнаружены 20 и 24 октября (рис. 8.29). Местоположение предвестников относительно возмущений параметров солнечного ветра, ММП и потока низкоэнергичных частиц указано на рис. 8.30. В это время были зарегистрированы вспышки класса М, сопровождающиеся выбросами корональной массы. Развитие данного возмущения в различных проекциях на основе модельного представления показано на схеме 8.6.3.

Максимум нового 24 цикла, по нашим данным, наступил в 2012 г. Со второй декады июля 2012 г., доминировала активная область № 1520. Отсутствовали и корональные дыры, как потенциальные источники проявлений солнечной активности. Предвестник в космических лучах

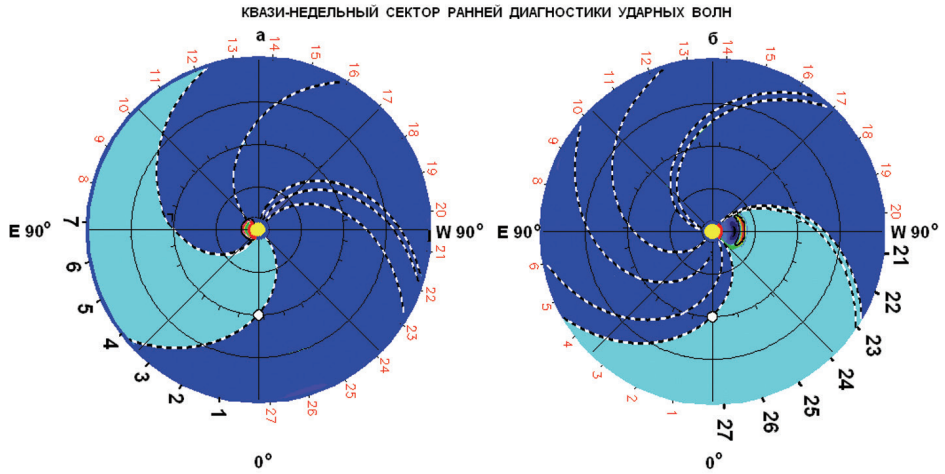


Схема 8.6.1. Иллюстрация возможности заблаговременного обнаружения источника активности на восточном и западном крае диска Солнца по регистрации предвестника в космических лучах в квази-недельном секторе ранней диагностики (восточный сектор – а, западный сектор – б). В центре – Солнце. Центральный меридиан проходит через вертикальную линию «Солнце-Земля». В первом случае, Земля расположена на ведущей или передней границе восточного сектора ранней диагностики, во втором случае – на ведомой или задней границе западного сектора ранней диагностики. Пунктирные спиральные кривые – силовые линии межпланетного магнитного поля. Схема сделана на основе анимационной картины модельных расчетов NASA (http://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20110922_140000_anim.tim-den.gif) (http://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20111022_143500_anim.tim-den.gif), для событий 21-26 сентября и 20-25 октября 2011 г.

был зарегистрирован 12-13.07.2012 (рис. 8.31). 14-15 июля наблюдался эффект Форбуша, вызванный приходом ударной волны. Так случилось, что наиболее мощные проявления активности Солнца наблюдались в начале третьей декады июля 2012 г. Примечательно, что в это время активная область № 1520 уже скрылась за западный край солнечного диска. Тем не менее, в космических лучах она все же проявилась в виде понижения интенсивности 26-27 июля, хотя и небольшой амплитуды (см. рис. 8.31). В этом событии, мы снова имеем дело с проявлением нелокальных свойств космических лучей от мощнейшего *залимбового* (западного) источника.

Так была зарегистрирована самая мощная ударная волна в новом 24 цикле (рис. 8.32). Ударные волны со скоростями от 2000 км/с и выше очень редкое событие (согласно диаграмме встречаемости скоростей – Приложение 8.2). Примечательно, что в параметре флуктуаций ГКЛ, 23 июля 2012 г. предвестник все же был зарегистрирован (см. рис. 8.31),

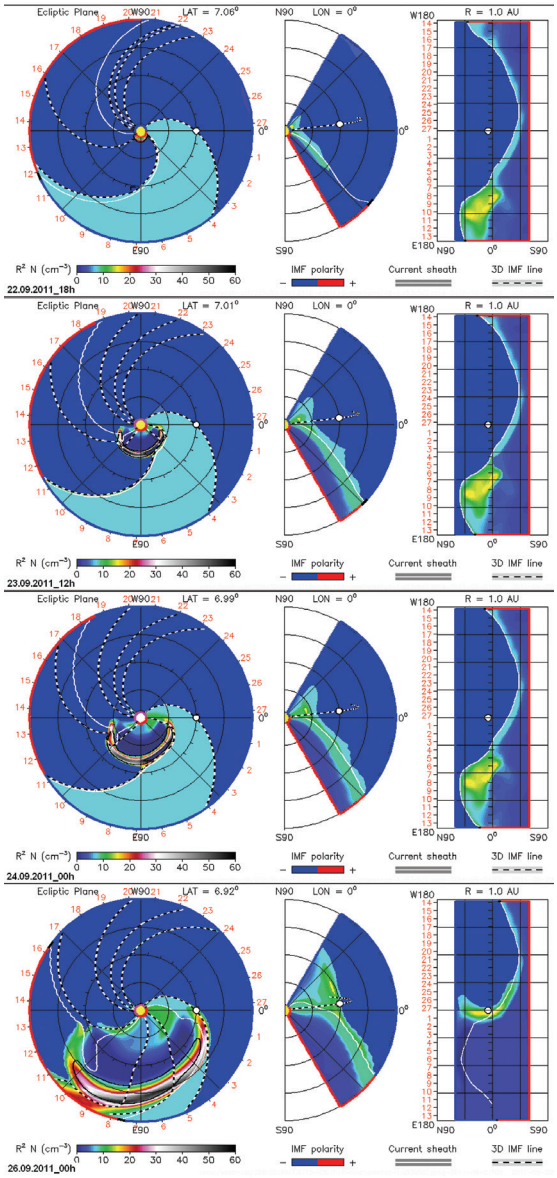


Схема 8.6.2. Иллюстрация возможности заблаговременного обнаружения источника активности на восточном лимбе Солнца, на примере трехмерной картины развития возмущения для события 21-26 сентября 2011 г. В центре – Солнце. Центральный меридиан проходит через горизонтальную линию «Солнце-Земля». В этом случае, Земля расположена на ведущей или передней границе сектора ранней диагностики. Схема сделана на основе анимационной картины модельных расчетов NASA для события 21-26 сентября: http://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20110922_140000_anim.tim-den.gif

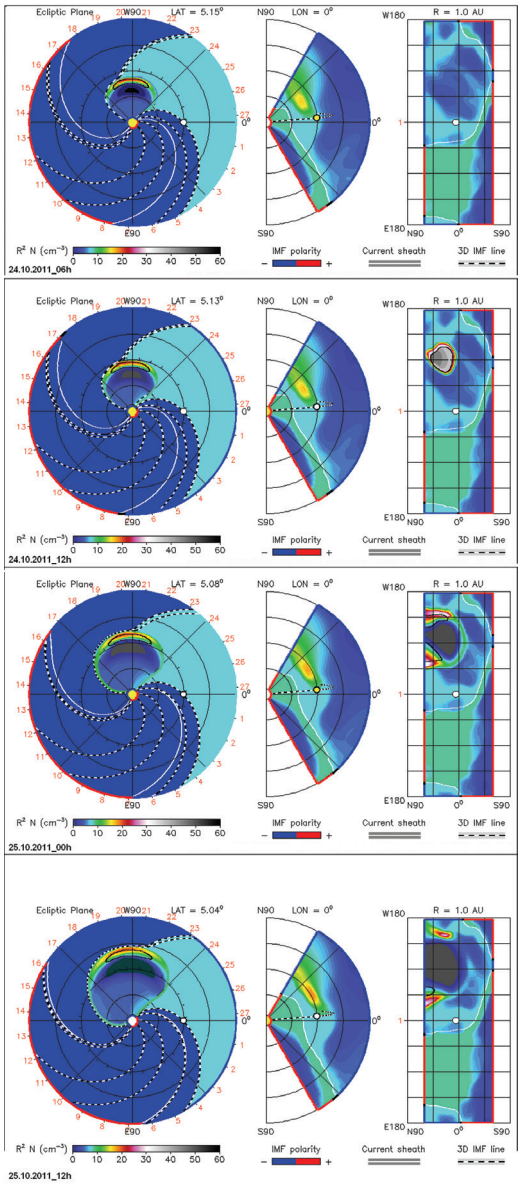


Схема 8.6.3. Иллюстрация возможности заблаговременного обнаружения источника активности на западном лимбе Солнца, на примере трехмерной картины развития возмущения для события 20-25 октября 2011 г. В центре – Солнце. Центральный меридиан проходит через горизонтальную линию «Солнце-Земля». В этом случае, Земля расположена на ведомой или задней границе сектора ранней диагностики. Схема сделана на основе анимационной картины модельных расчетов NASA для события 20-25 октября: http://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20111022_143500_anim.tim-den.gif

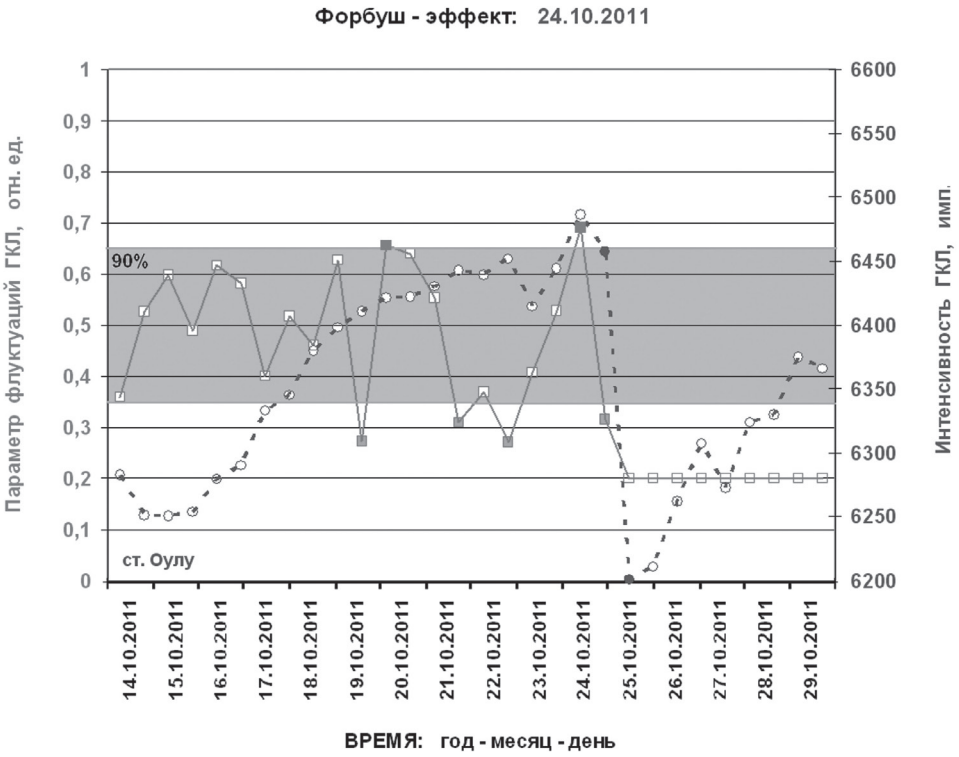


Рис. 8.29. Результаты мониторинга космических лучей в октябре 2011 г. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Предвестники зарегистрированы: 20.10.2011 и 24.10.2011 г. (показаны сплошными квадратиками).

правда, на пределе уровня значимости. Согласно схеме, приведенной в Приложении 8.3, момент регистрации предвестника 23 июля согласуется с моментом прохождения задней, ведомой границы квази-недельного сектора ранней диагностики.

Вообще говоря, траектории космических лучей во фрактальных магнитных полях существенно отличаются от броуновских траекторий. Это означает, что изменение функции зависит не только от ее значений в окрестности рассматриваемой точки (как это имеет место в нормальной диффузии), но и от ее значений в удаленных точках пространства /10/. К таким нелокальным процессам относят и немарковские процессы, т.е. процессы с «памятью», когда приращения нельзя считать стационарными. В этом случае, мы имеем дело уже с «фрактальным броуновским

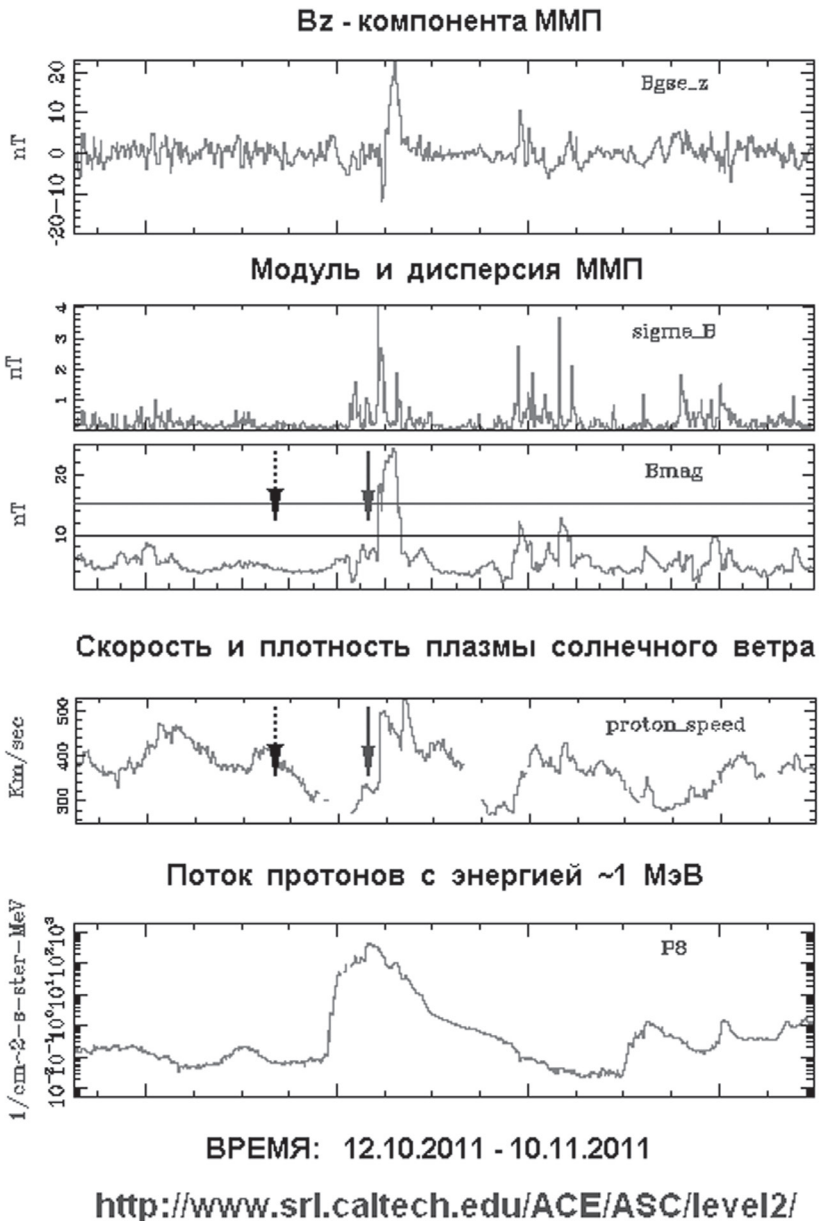


Рис. 8.30. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: дисперсия, Bz – компонента и модуль ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ в октябре 2011 г. Сплошной стрелкой маркируются предвестники геоэффективных событий с величиной скачка магнитного поля свыше 15 nT.

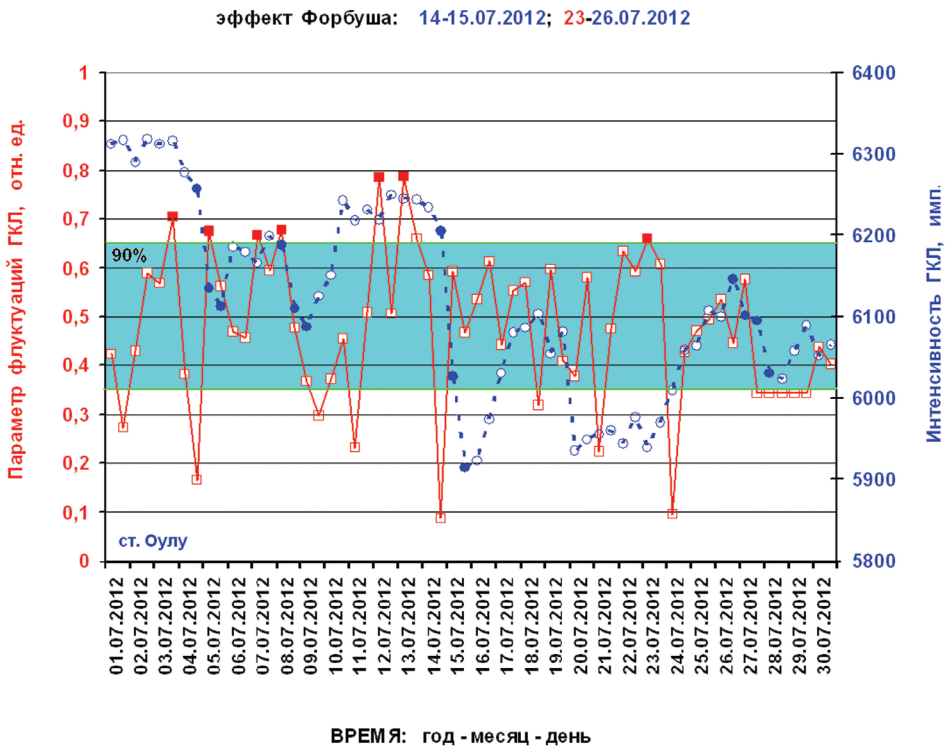


Рис. 8.31. Результаты мониторинга космических лучей в июле 2012 г. По оси ординат: шкала справа - отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час).

движением» /11/. Таким образом, *нелокальные* особенности поведения космических лучей в окрестности магнитной «пробки» (на ударной волне) с *фрактальными* свойствами замагниченной среды имеют место, как в пространстве, так и во времени.

На нелокальность и нелинейность процессов, особенно в случае мощных событий на Солнце, указывалось в /12/: наличие прямого энергетического каскада означает сильную *делокализацию* энергонесущей области. И далее: «отличие «ситуационного» подхода от «событийного» по существу состоит в необходимости рассмотрения и учета более длительных интервалов времени и более крупных областей в пространстве на Солнце и в гелиосфере…» /12/. Подобное же, по сути, утверждение о нелокальности, было выдвинуто ранее Гневышевым М.Н., отмечается в /13/: «физически связанные солнечные процессы необязательно должны происходить одновременно».

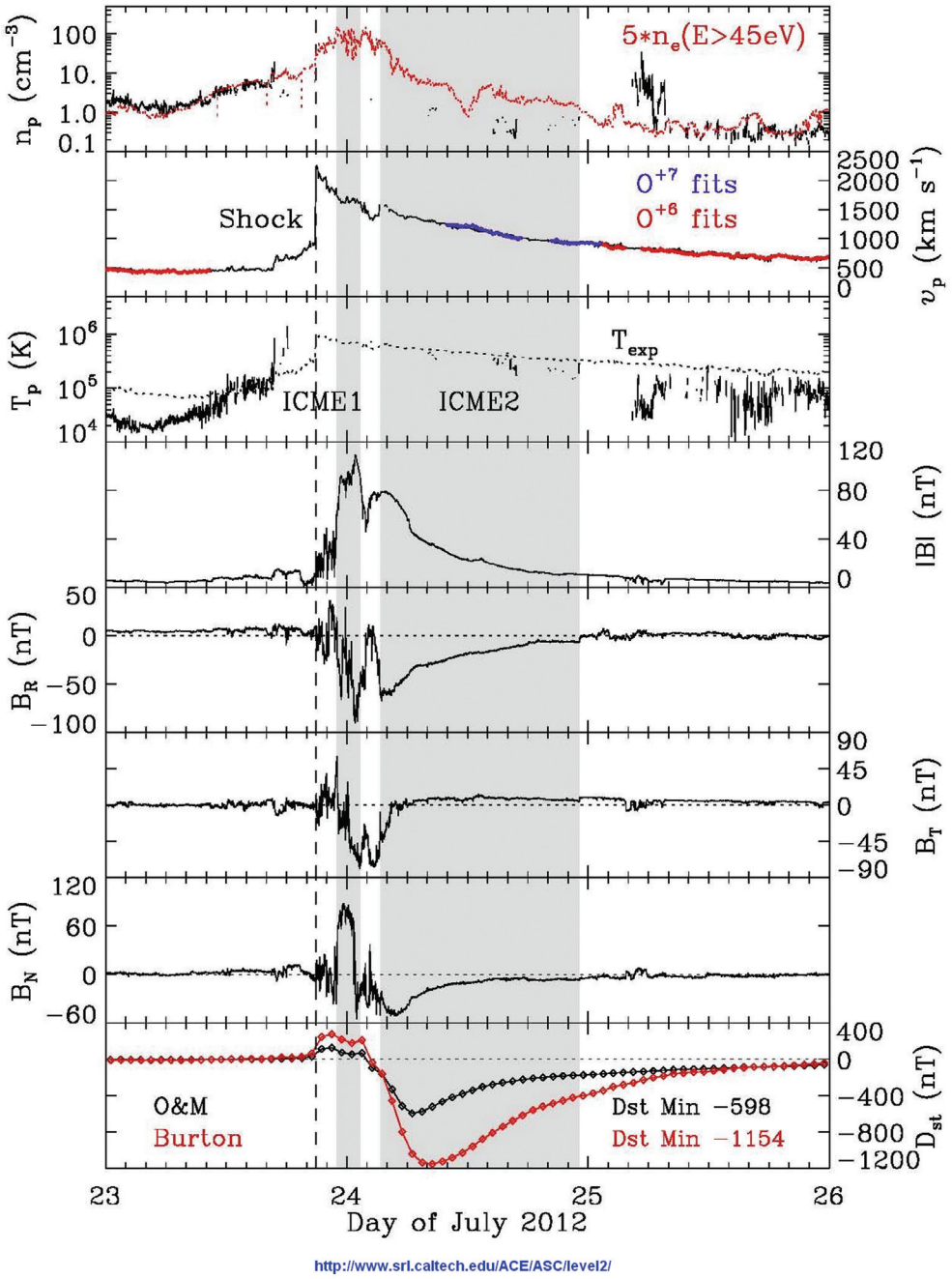


Рис. 8.32. Данные прямых измерений параметров солнечного ветра в самом экстремальном событии нового 24 цикла 23-25 июля 2012 г.

8.7. Увеличение надежности прогноза ударных волн по данным мировой сети полярных станций.

Из радиофизики известно, что метод «корреляционного приема» сигналов от разнесенных источников позволяет существенно увеличить принципиально важное отношение сигнал/шум /14-15/. Связано это с тем, что и «шумы» радиотрактов и атмосферные «шумы» для разнесенных источников (станций космических лучей) существенно различаются. Ранее, это было показано нами для известных событий в июле 1982 г. (см. рис. 4.7), когда были привлечены данные станций Тикси и Оулу, а также для событий в апреле 1984 г.: в этом случаи привлекались данные полярных станций Тикси и Апатиты (см. рис. 7.2). Уже это, первое применение способа корреляционного приема сигналов от разнесенных полярных станций космических лучей показало эффективность его применения. Особенно выражен эффект увеличения отношения сигнал/шум (при корреляционном приеме сигналов разнесенных станций) в наиболее экстремальном событии 29 октября 2003 г. (см. рис. 8.16). Таким образом, для обеспечения надежности оперативного прогноза для расчетов предпочтительнее брать, как минимум, пару станций космических лучей.

Наилучший эффект достигается при использовании нескольких, преимущественно, полярных станций (Приложение 8.4). Иллюстрация работы экспертной системы прогноза и диагностики на базе данных 4-х арктических (Тикси – Оулу – Форт Смит – Туле) и 2-х антарктических станций (Южный Полюс и Мак Мердо) приведена на примере событий в декабре 2014 г. С осени 2014 г. началась геоэффективная фаза спада текущего 24 цикла. Геоэффективная фаза начала ветви спада 11-летнего цикла обычно характеризуется наличием хотя и мощных, но редких событий. В начале декабря 2014 г. регистрировался высокоскоростной поток солнечного ветра, который явился причиной постепенного и длительного понижения в интенсивности ГКЛ в первую неделю декабря. Предвестник 4 декабря 2014 г. предшествовал этому понижению (рис. 8.33).

В середине декабря на восточной части солнечного диска зародились две активные области 2441 и 2442. Максимальной активности они достигли в конце второй декады декабря 2014 г.: с 17 по 20 декабря была зарегистрирована целая серия вспышек класса М и Х, сопровождавшихся рядом мощных выбросов корональной массы – СМЕ. Подобные события являются наиболее сложными для прогноза: здесь имеет место наиболее часто встречающаяся ситуация, когда одновременно действуют несколько разнесенных источников активности на Солнце. Традиционный подход, когда каждому событию на орбите Земли сопоставляется конкретное событие в источнике на Солнце, в данной ситуации, явно «дает сбой».

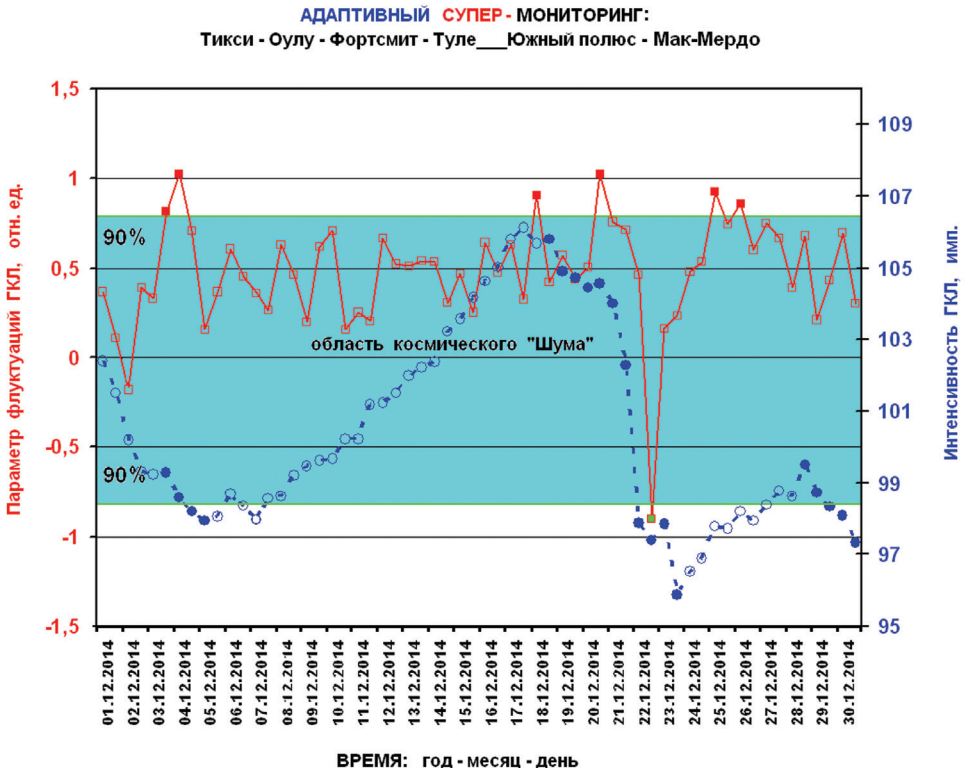


Рис. 8.33. Результаты СУПЕР-мониторинга космических лучей в режиме ТЕСТА в декабре 2014 г. по данным европейской Базы данных http://www.nmdb.eu. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час). Предвестники зарегистрированы: 04.12.2014, 18 и 20 декабря, а также 25.12.2014 г. (показаны сплошными квадратиками).

В этих случаях, каждая последующая ударная волна распространяется уже в менее плотной среде, нежели предыдущая. Из-за снижения плотности среды после прохождения первой ударной волны, скорость догоняющей ударной волны возрастает. И потому, использование простой, эмпирической зависимости времени прихода ударной волны от ее скорости, просто неверно. Очевидно, что последующая ударная волна играет роль «поршня», что обычно приводит к характерному, двухступенчатому профилю параметров межпланетной среды. Эта ситуация может быть описана моделью «поршневой» ударной волны, предложенной ранее в /2-3/.

Многократные CME обусловили появление серии ударных волн, проявившейся на орбите Земли в предпонижении 19-20 декабря и последующем эффекте Форбуша 21-24 декабря 2014 г. Предвестники в космических лучах были зарегистрированы, соответственно: 18 декабря и, затем – 20 декабря (рис. 8.33). Низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ 22 декабря (в отличие от высоких прогностических значений параметра 18 и 20 декабря), являются диагностическими значениями: минимальное значение достигается на главной фазе эффекта Форбуша – 22 декабря. Значимые значения параметра флуктуаций 25 декабря и последующие низкие значения параметра на фоне понижения интенсивности ГКЛ отражают «афтершоковую» активность активной областей 2441-2442. Вышеприведенные результаты декабрьского мониторинга 2014 г., являются первым случаем апробации экспертной системы прогноза и диагностики «Cyber-FORSHOCK» на базе СУПЕР-мониторинга космических лучей в режиме реального времени.

Дальнейшее тестирование экспертной системы по данным европейской Базы данных (http://www.nmdb.eu) привело к отбраковке данных ряда высокоширотных станций по причине неустойчивости их работы. В течение работы экспертной системы в тестовом режиме в марте месяце 2015 г. было выбрано 7 станций: Apatity, Inuvik, FortSmith, Thule, Oulu, McMurdo и Terre Adelie. Результаты СУПЕР-мониторинга в марте-апреле 2015 г. приведены на рис. 8.34.

Активная область № 2297, явившаяся источником самой мощной в текущем 24 цикле геомагнитной бури, появилась с 6 на 7 марта 2015 г. на, практически, чистом от пятен солнечном диске. Важно заметить, что Земля в это время находилась в зоне прохождения границы разно-скоростных потоков солнечного ветра. Тем не менее, заметным образом в космических лучах она не проявилась: не было зарегистрировано ни высоких (прогностических), ни низких (диагностических) значений параметра флуктуаций ГКЛ. Попадание Земли в очередной высокоскоростной поток, который исходил из корональной дыры расположенной в центре солнечного диска, ожидалось 13-15 марта.

Затем, активность области № 2297 усилилась. Вспышка класса X была зарегистрирована 11 марта. В последующие 4-5 дней наблюдалось большое число больших вспышек класса M, сопровождавшихся серией мощных выбросов корональной массы. Других потенциальных источников активности в рассматриваемый период времени не наблюдалось: активная область № 2297 была единственной. Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 12.03.2015 (рис. 8.34). На третьи сутки после регистрации предвестника, с 15 до 17 марта началось увеличение потоков штормовых частиц в диапазоне энергий от

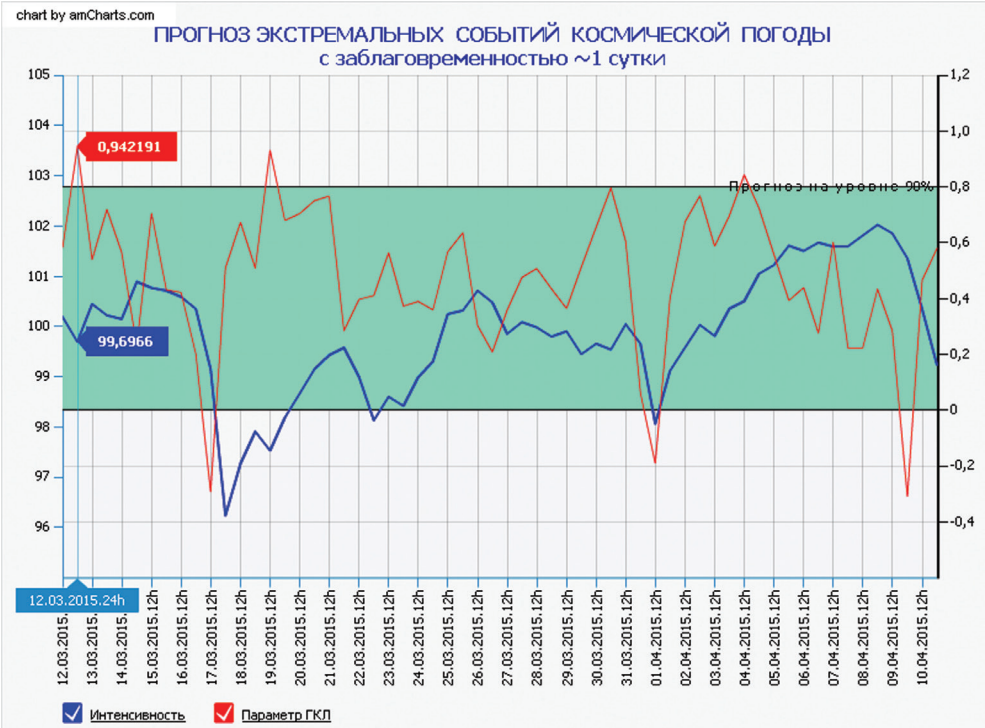


Рис. 8.34. Результаты СУПЕР-мониторинга космических лучей в режиме ТЕСТА с 12.03.2015 – 10.04.2015 г. по данным европейской Базы данных http://www.nmdb.eu. По оси ординат: шкала справа – отложены полусуточные значения интенсивности космических лучей (пунктирная кривая); шкала слева – отложены полусуточные значения параметра флуктуаций (сплошная кривая). Показан 90% уровень значимости. По оси абсцисс – время (год – месяц – день – час).

десятков КэВ до десятков МэВ. Понижение в интенсивности ГКЛ зарегистрировано на четвертые сутки после регистрации предвестника – с 16 на 17 марта, т.е. в пределах *квази-недельного* сектора ранней диагностики (см. рис. 8.34). Низкие, т.е. диагностические значения параметра флуктуаций ГКЛ это подтверждают. Максимум эффекта Форбуша с амплитудой ≈6% регистрируется 17 марта, с последующей геомагнитной бурей 17-18 марта, причем, сильнейшей (Dst≥200 nT) в текущем 24 цикле (рис. 8.35).

Таким образом, экспертная система оперативного прогноза и диагностики «Cyber-FORSHOCK» на базе СУПЕР-мониторинга по данным мировой сети полярных станций показала достаточную эффективность. Предварительная оценка вероятности прогноза геоэффективных событий Космической погоды, в данном случае, составляет величину

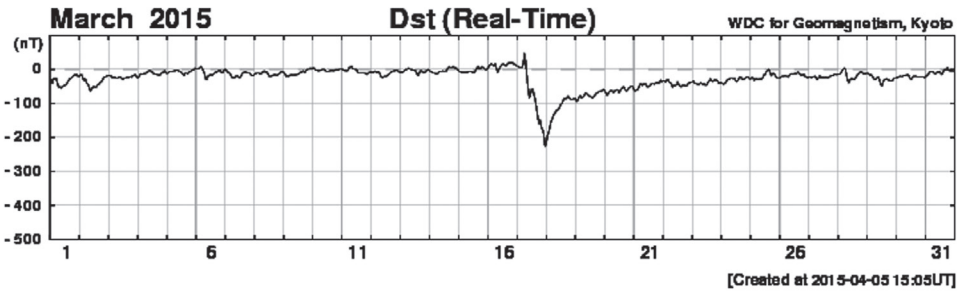


Рис. 8.35. Данные измерений Кр – индекса геомагнитной возмущенности в марте 2015 на ст. Киото.

не менее 80%. Это согласуется с оценкой оправдываемости прогноза по данным пары станций космических лучей (Тикси – Оулу) в известных событиях в октябре 2003 г. (п. 8.4, рис. 8.16-8.17). Все вместе, это оправдывает большие затраты времени, сил и средств на разработку и создание экспертной системы оперативного прогноза и диагностики на базе мониторинга космических лучей, начиная с первых шагов в обсерватории Тикси в 1981 г.

Резюме к главе 8

1. Введенный параметр флуктуаций ГКЛ, является индикатором степени турбулентности магнитного поля: **мелкомасштабного** (при максимальном значении параметра) в окрестности фронта ударной волны и *регулярного* крупномасштабного поля в области за фронтом ударной волны.

2. Траектории космических лучей во *фрактальных* магнитных полях существенно отличаются от броуновских траекторий обычной диффузии, что и обуславливает **нелокальные** свойства космических лучей во фрактальной замагниченной среде в окрестности магнитной «пробки» на ударной волне.

3. Нелокальность космических лучей проявляется в кластеризации фазового объема космических лучей или регистрации пучков частиц – эффект **«гало»** в космических лучах во время выхода *геоэффективного* источника активности (на видимую часть солнечного диска), обусловившего предпонижение в интенсивности космических лучей до начала эффекта Форбуша.

4. Получены указания на важную роль процесса нелинейной динамики осцилляций гелиосферного токового слоя во время активной фазы солнечного цикла, что указывает на возможность образования на орбите Земли **распределенного** источника мощной ударной волны.

5. Реализован способ раннего обнаружения ударных волн на базе мониторинга космических лучей по данным мировой сети полярных станций (http://www.forshock.ru/pred.html) с заблаговременностью порядка **~1** суток в виде экспертной системы «Cyber-FORSHOCK». Вероятность прогноза составляет величину **≈80%**, что существенно выше вероятности прогноза другими методами дистанционной диагностики (менее 50%).

Литература к главе 8

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики. // Методологические проблемы развития науки в регионе. Наука. Новосибирск. 1987. С.175-176.

2. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты. // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. N3. С. 407-410.

3. Крымский Г.Ф., П.А. Кривошапкин, В.П. Мамрукова, С.К. Герасимова. Поршневая ударная волна и эффект Форбуша. // Письма в астрономический журнал. 2009. Т. 35. № 10. С. 772-776.

4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика. 313 с. 1983.

5. Козлов В.И. Аномальная активность Солнца в «слабых» циклах 20 и 23 как проявление инварианта 11-летнего цикла // Солнечно-земная физика. Иркутск: ИСЗФ. Вып. 12. Т. 1. С. 32-33. 2008.

6. Козлов В.И. О связи предпонижений эффектов Форбуша с прохождением границ секторов гелиосферного токового слоя // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т.59. N4.

7. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений // Якутск. ЯНЦ СО РАН. 1993. 163 с.

8. Сытинский С.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами // Д. Гидрометеоиздат. 1987. 100 с.

9. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201109/index.html

10. Учайкин В.В. Стохастические модели в кинетической теории космических лучей. Ульяновск. УлГУ. 2011. С. 539.

11. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Москва. 2000. С. 270.

12. Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 5. С. 453-508.

13. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальные комплексы солнечной активности // Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 10. С. 857–868.

14. Козлов В.И. Способ обнаружения вспышечных ударных волн. // Авторское свидетельство СССР N 1531243 от 08.09.1989 г.

15. Козлов В.И. Способ обнаружения вспышечных ударных волн. // Авторское свидетельство СССР N 1588182 от 22.04.1990 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ
к главе 8

Приложение 8.1

Функция распределения ***Вейбулла:***

$$F(x) = 1 - \exp\{-[(x-\theta)/b]^{c}\}$$

где

$\theta < x$, $b > 0$, $c > 0$

b - параметр масштаба распределения

c - параметр (формы) распределения

θ - параметр положения распределения

Плотность распределения Вейбулла:

$$f(x) = c/b * [(x-\theta)/b]^{c-1} * \exp^{\wedge}\{-[(x-\theta)/b]^{c}\}$$

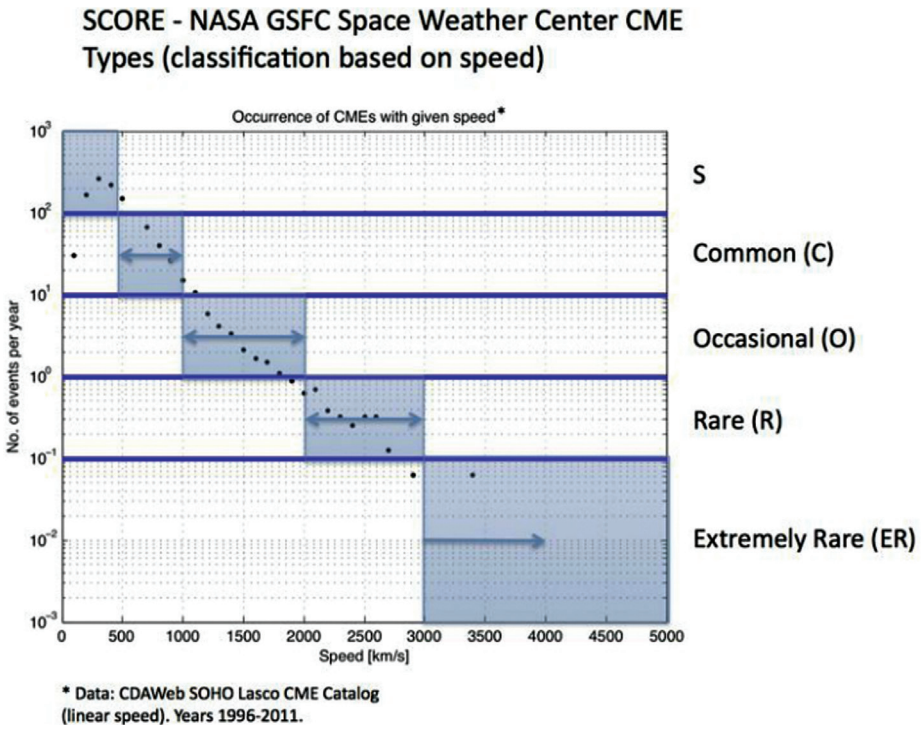
Функция надежности:

$$R(x) = 1 - F(x)$$

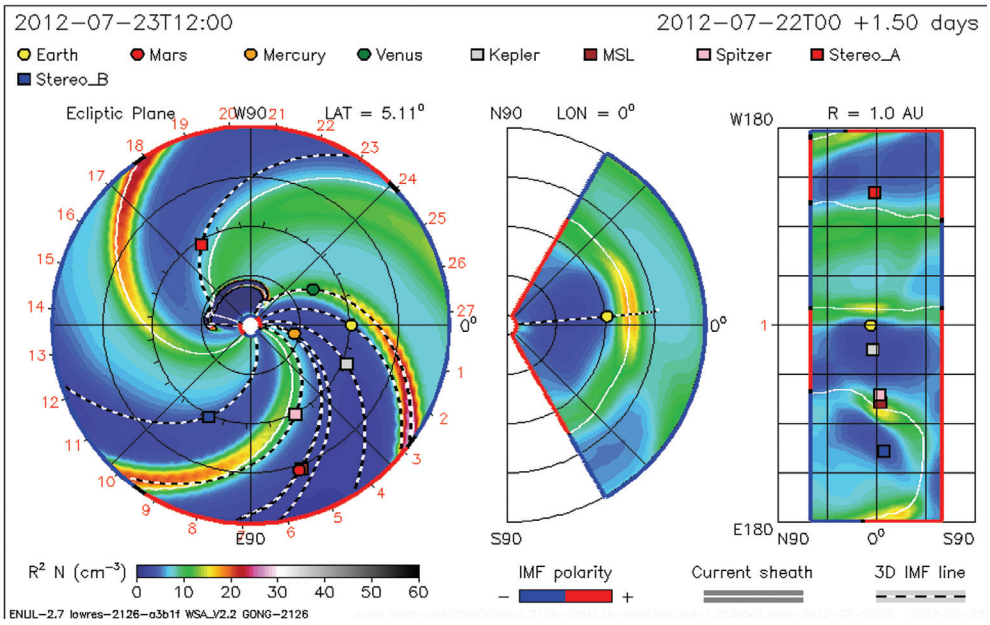
Функция РИСКА !

$$h(x)=f(x)/R(x)= [c*(x-\theta)^{(c-1)}] / b^{c}$$

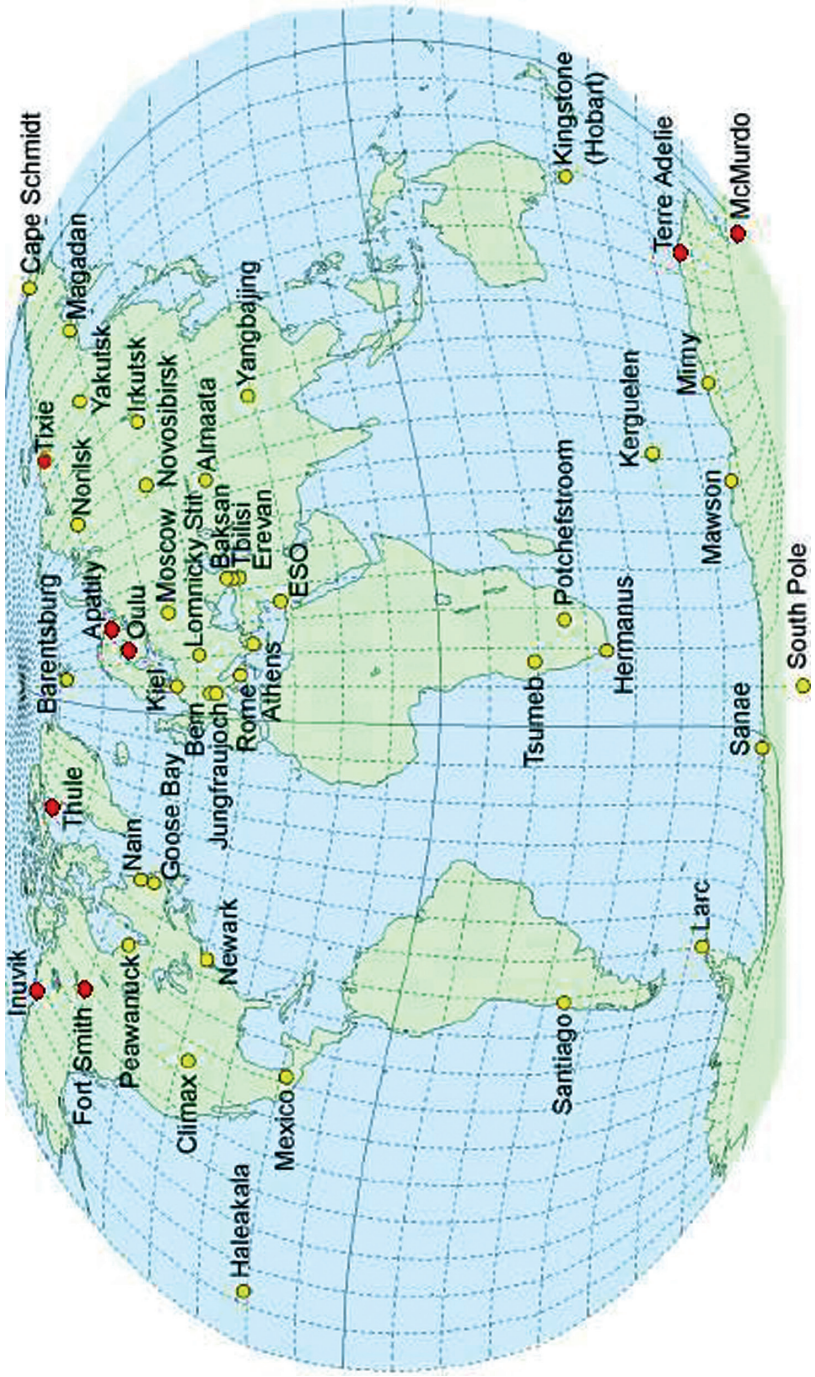
Приложение 8.2



Приложение 8.3



Приложение 8.4



Глава 9. АРИТМИЯ СОЛНЦА В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ.

9.1. Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

Выше, в гл. 6 (см также /1/) по исследованию флуктуаций интенсивности ГКЛ был обнаружен нестационарный переходный колебательный режим инверсии общего магнитного поля Солнца. Учитывая важность полученного вывода и его следствий, ниже проводится верификация полученных ранее результатов. С целью формализации динамики флуктуаций ГКЛ ранее был введен параметр флуктуаций космических лучей (см. п. 8.1). Для расчета параметра использовались данные высокоширотного нейтронного монитора ст. Оулу (Финляндия), практически, за всю историю их регистрации с высоким, 5-минутным разрешением. Предполагалось подтвердить (либо опровергнуть) вывод об обнаружении переходного колебательного режима смены знака поля.

Можно ожидать, что на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла эффекты Форбуша, распределены не случайно, а в виде групп или серий. После процедуры усреднения 5-минутных данных интенсивности ГКЛ за каждый солнечный оборот (27 дней), серия форбуш-понижений проявится в интенсивности ГКЛ как резкий и глубокий минимум. При усреднении индекса мерцаний космических лучей в окрестности подобного минимума и была обнаружена характерная динамика. Это указывает на ее скейлинговый, самоподобный или фрактальный характер, что подтверждается низкой, и конечной ($d = 2.5 - 3$, рис. 6.11) величиной корелляционной размерности процесса /2-3/. Низкая и конечная величина корелляционной размерности означает, в принципе, неслучайный, **негауссовый** характер флуктуаций ГКЛ. Подобное поведение флуктуаций ГКЛ на больших масштабах усреднения представляет большой интерес с различных точек зрения. Прежде всего, это важно при изучении переходного режима к активной фазе солнечного цикла. Обнаружение подобного переходного режима могло бы решить задачу прогноза активной фазы солнечного цикла.

Как уже отмечалось, максимум функции риска является, по сути – вероятностью достижения критического значения анализируемой переменной (см. Приложение 8.1 и рис. 8.6). В нашем случае, достижения критического значения интенсивности космических лучей. Эта вероятность есть – степень *коррелированности* флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла. Для расчета степени коррелированности флуктуаций (далее, параметр флуктуаций), требуется оценка параметра формы (и масштаба) эмпирического распределения Вейбулла-Гнеденко, которые и определяют степень

отклонения формы аппроксимирующей функции от нормального распределения.

9.2. Идентификация переходного режима к активной фазе солнечного цикла по космическим лучам.

*«…исследование **горизонтов прогнозирования** солнечных и гелиосферных процессов предствляется актуальной научной и практической задачей».*

Веселовский И.С., Космические исследования. 2004 г. Т. 42. №5. С. 505.

Результаты ретроспективного «мониторинга» космических лучей показаны на рис. 9.1. В анализе использованы 5-минутные данные нейтронного монитора ст. Оулу за 5 неполных циклов 20-24. Среднеоборотные, т.е. 27-дневные значения интенсивности ГКЛ представлены на графике пунктирной кривой синего цвета, шкала справа. Соответствующие 27-дневные значения параметра флуктуаций ГКЛ показаны сплошной кривой красного цвета, шкала слева. Среднеоборотные значения параметра флуктуаций ГКЛ усреднены по 3 точкам. По оси абсцисс – время в годах и соответствующие номера оборотов Солнца (по системе Бартельса).

Важно знать, как соотносятся между собой временные зависимости параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ. В этой связи, обращает на себя внимание наличие максимума в параметре флуктуаций ГКЛ, который регистрируется, как правило, за 1-2 оборота до начала резких и глубоких понижений в интенсивности ГКЛ: в 1982, 1991, 2000, 2001, 2003-2005, 2012 и 2014 годах (см. рис. 9.1). Выявленные максимумы параметра флуктуаций перед началом резких и глубоких понижений интенсивности ГКЛ имеют **систематический** характер. Это подтверждается расчетом взаимной корреляционной функции (ВКФ) между параметром флуктуаций и интенсивностью ГКЛ: величиина сдвига максимума ВКФ относительно нуля равна 1 обороту Солнца (Приложение 9.1).

Для верификации вышеуказанной взаимосвязи, был применен также известный метод «наложения эпох». К «нулевому» событию были отнесены большинство (10) периодов резких и глубоких минимумов в интенсивности ГКЛ, зарегистрированных в прошедшем 23 цикле. Во-первых, получено хорошее соответствие параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ (рис. 9.2). Величина коэффициента их линейной регрессионной связи R≈0,9. Во-вторых, подтверждается наличие значимого максимума параметра флуктуаций, в среднем, за 1-2 оборота

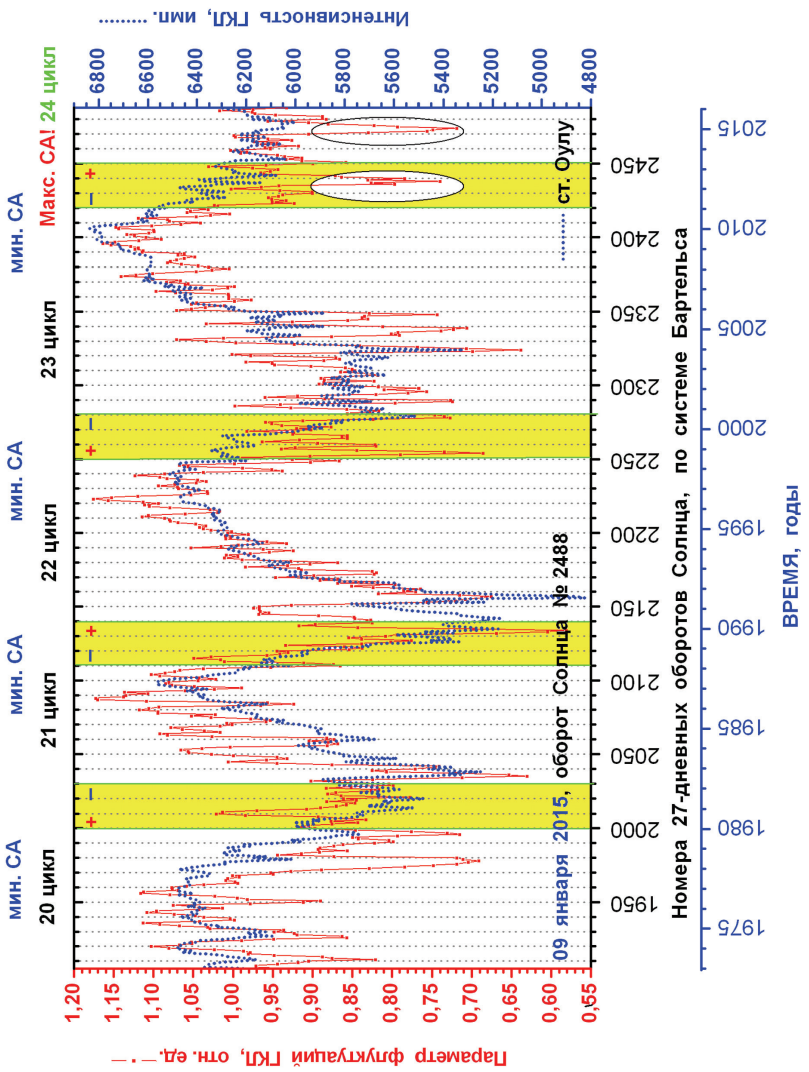


Рис. 9.1. Точечная кривая, шкала справа – 27-дневные значения интенсивности космических лучей с 1972-2015 гг. Сплошная кривая, шкала слева – сглаженные по 3 точкам 27-дневные значения параметра флуктуаций, рассчитанного за тот же период (5 неполных циклов: 20-24). Условно, показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца и периоды минимумов активности Солнца. НИЗКИЕ значения параметра флуктуаций означают ДИАГНОСТИКУ возмущенного периода. По оси абсцисс – время: годы и, соответственно, номера оборотов Солнца по системе Бартельса.

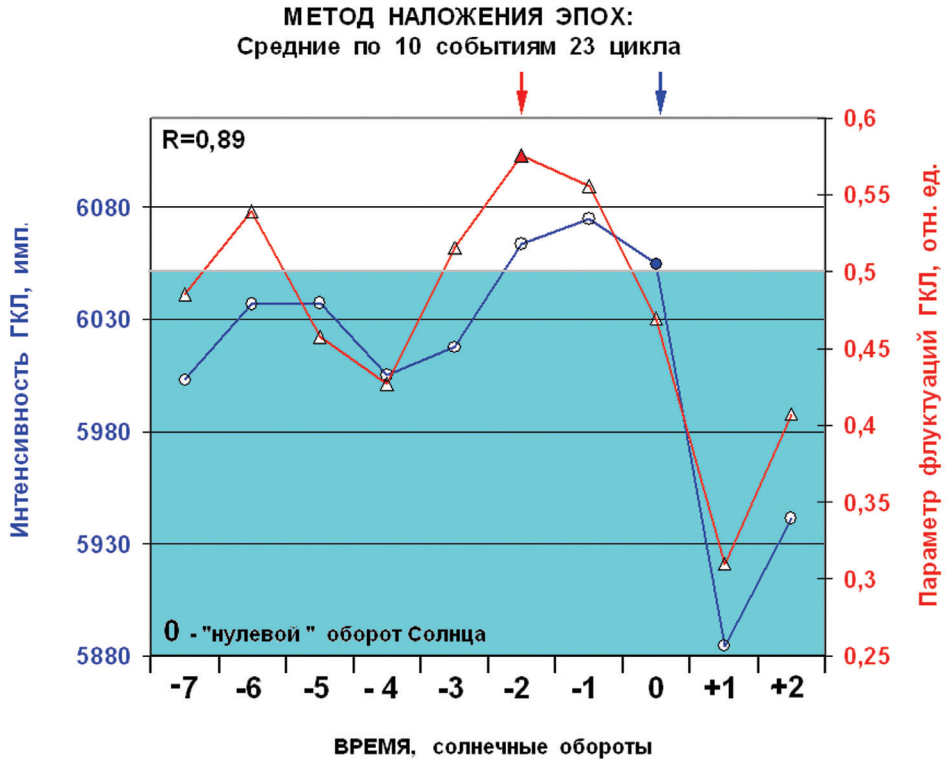


Рис. 9.2. 27-дневные значения интенсивности ГКЛ в импульсах (синяя кривая, открытые кружки – шкала слева). Кривая красного цвета, треугольники – шкала справа – параметр флуктуаций ГКЛ в относительных единицах. Результаты получены методом «наложения эпох» для 10 случаев резких и глубоких минимумов в интенсивности ГКЛ, зарегистрированных в предыдущем 23 цикле солнечной активности. По оси абсцисс – условное время в оборотах Солнца. Оборот, с которого начинается резкое и глубокое понижение в интенсивности ГКЛ, обозначен как «нулевой» оборот.

Солнца до начала глубокого минимума в интенсивности ГКЛ. Непосредственно же в период резкого и глубокого понижения в интенсивности ГКЛ регистрируются низкие, т.е. – диагностические значения параметра флуктуаций.

Полученная зависимость указывает как на диагностические, так и на прогностические возможности параметра флуктуаций. Правда, для решения проблемы среднесрочного прогноза, потребуется еще и количественный критерий принятия решения о прогнозе геоэффективного периода. Поскольку в методе наложения эпох мы имеем дело с условным, средним «событием», то и количественный критерий является усредненным. Исходя из вероятностной трактовки параметра

флуктуаций, уровень вероятности $P \geq 0{,}5$ естественно выбрать в качестве предельного, выше которого вероятность наступления геоэффективной фазы солнечного цикла можно считать значимой (см. рис. 9.2).

Таким образом, кроме значимой корреляционной связи между введенным параметром и интенсивностью, параметр флуктуаций ГКЛ содержит в себе и прогностическую информацию. Это важно для среднесрочного прогноза геоэффективных периодов 11-летнего цикла с заблаговременностью порядка **~ 1** оборота Солнца. На рис. 9.3 представлены результаты мониторинга космических лучей за период с 1999–2015 гг. Для анализа вариаций параметра с периодами более одного оборота Солнца, был исключен низкочастотный тренд, который представляет собой, фактически, 11-летнюю вариацию.

Предвестники активных фаз 24 цикла были зарегистрированы в следующие моменты времени: предвестник НАЧАЛА 24 цикла – на обороте 2407 (декабрь 2009, точечная стрелка черного цвета), предвестник фазы РОСТА – на обороте 2421 (январь 2011, сплошная стрелка черного цвета), см. также Приложение 9.2. Предвестник фазы МАКСИМУМА 24 цикла был зарегистрирован на оборотах 2434 (январь 2012, стрелка красного цвета). Результаты по прогнозу активных фаз текущего солнечного цикла (начало цикла, фаза роста и фаза максимума) были доложены авторами на всероссийской конференции в ИКИ в феврале 2012 (http://plasma2012.cosmos.ru/presentations) см. также Приложение 9.3. Предвестник фазы ЗАВЕРШЕНИЯ процесса переполюсовки магнитного поля зарегистрирован на обороте 2449 (февраль 2013, точечная стрелка синего цвета на рис. 9.3). Предвестник начала геоэффективной фазы СПАДА был зарегистрирован на обороте 2469 (июль 2014, сплошная стрелка синего цвета на том же рисунке).

Низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ, регистрируемые после предвестников на фоне низких значений интенсивности космических лучей, означают *диагностику* прогнозируемых фаз солнечного цикла. В частности, фаза **максимума** – обороты 2437–2442 (**март – июль 2012** г.). Геоэффективная фаза *спада* текущего цикла – обороты 2471–2479 (сентябрь 2014 – март 2015). Таким образом, введенный параметр флуктуаций космических лучей позволил нам с заблаговременностью порядка **~1** оборота Солнца впервые дать среднесрочный прогноз различных фаз 24 цикла: начало цикла, фазы роста и максимума текущего цикла, а также геоэффективной фазы начала ветви спада (http://www.forshock.ru/predlong.html).

Важно отметить, что моменты регистрации *предвестников* в космических лучах совпадают с началом *перестроек* магнитного

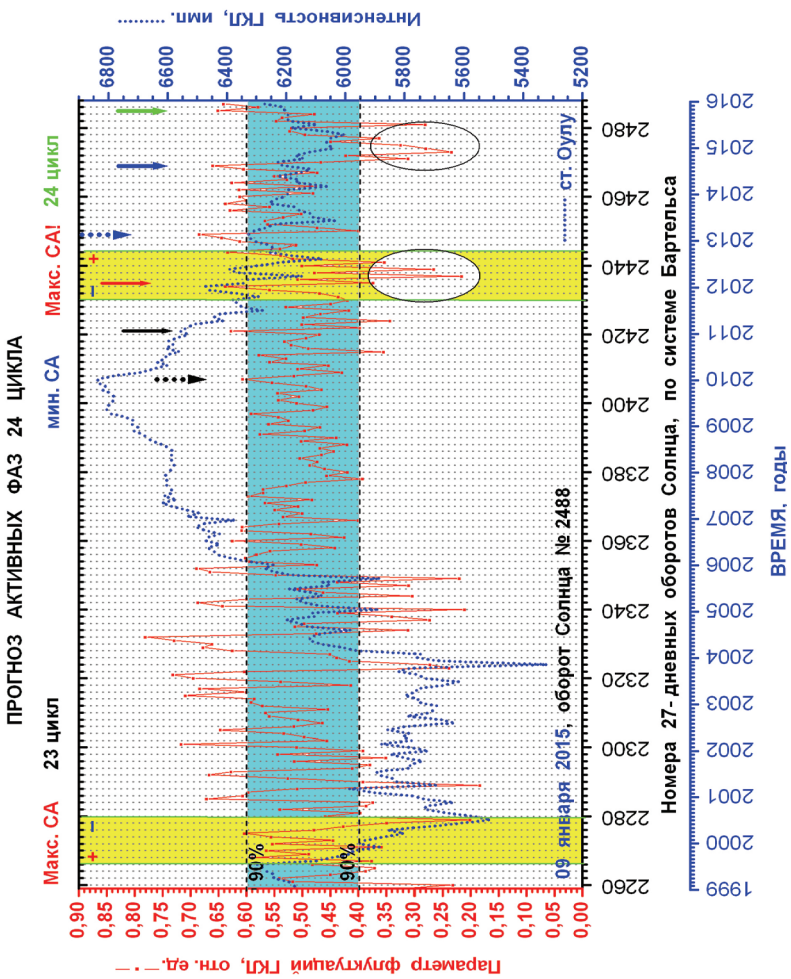


Рис. 9.3. Пунктирная кривая - 27-дневные значения интенсивности ГКЛ с 1999-2015 гг., шкала справа. Сплошная кривая – соответствующие значения параметра флуктуаций ГКЛ, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Предвестники: НАЧАЛО 24 цикла показано точечной стрелкой, фазы РОСТА текущего цикла – сплошной стрелкой черного цвета, фазы МАКСИМУМА 24 цикла – сплошной стрелкой красного цвета, завершение фазы ПЕРЕПОЛЮСОВКИ – пунктирной стрелкой синего цвета, геоэффективной фазы начала ветви СПАДА – сплошной стрелкой синего цвета. НИЗКИЕ значения параметра флуктуаций означают ДИАГНОСТИКУ активных фаз солнечного цикла.

поля в комплексах активности на Солнце (которые были выявлены А.В. Мордвиновым, А.А. Головко и С.А. Язевым, СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА, вып. 25, 2014 г.). Причем, перестройки эти наблюдаются на фазе роста и спада обоих максимумов в среднегодовых значениях чисел Вольфа зарегистрированных в 2012 и 2014 гг., т.е. на фазе максимальной изменчивости активности Солнца (Приложение 9.4). В частности, в *феврале* 2010 г. (предвестник зарегистрирован на месяц ранее – в декабре 2009 – январе 2010 г., на обороте 2407). Далее, в *январе-марте* 2011 г. (предвестник зарегистрирован ранее – в январе 2011 г., на обороте 2421). Затем, в *феврале – марте* 2012 г. (предвестник зарегистрирован – в январе 2012 г., на обороте 2434). На стадии завершения инверсии магнитного поля Солнца в *июле – октябре* 2013 г. (предвестник зарегистрирован в феврале 2013 г., на обороте 2449) и на геоэффективной фазе начала ветви спада 24 цикла в *сентябре* 2014 г. (предвестник зарегистрирован в июле 2014 г., на обороте 2469). Таким образом, можно сделать вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором начала **перестройки** магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

9.3. Инвариант: «амплитуда цикла – длительность переполюсовки» 11-летнего цикла.

*«Почему Природа близка к симметрии, **почти** симметрична? … объяснение почти полной симметрии таково: Бог создал законы не совсем симметричными, чтобы мы не стали завидовать их совершенству!»*

Ричард Фейнман. Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее. М. 2011.

Как следует из полученных результатов, наибольший размах вариации параметра флуктуаций ГКЛ достигают в окрестности максимума и на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла (см. рис. 9.3). Для изучения динамики вариаций параметра флуктуаций ГКЛ в течение солнечного цикла, удобно воспользоваться методом вейвлет-анализа вариаций. Результаты такого анализа приведены ниже. В минимуме 23 цикла (с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца) явно выражена годовая вариация: максимумы годовой вариации в минимуме 11-летних циклов 21 и 23 на вейвлет-диаграмме показаны зеленым цветом (рис. 9.4-9.5). Напротив, в четном 22 цикле, с положительным знаком общего магнитного поля Солнца, годовая вариация отсутствует (рис. 9.6). Доминирование *годовой* вариации в минимуме

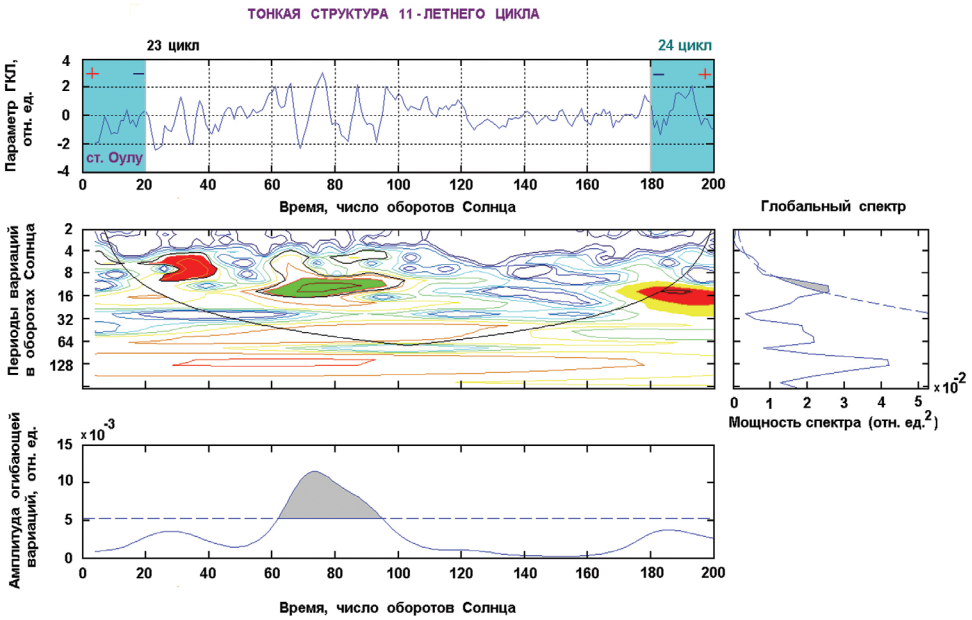


Рис. 9.4. Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 23 цикле и в начале 24 цикла. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют традиционная нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В минимуме нечетного 23 цикла с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца доминирует годовая осцилляция. На стадии фазы переполюсовки 24 цикла доминирует необычная ГОДОВАЯ вариация. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.

11-летнего цикла с *отрицательным* знаком общего магнитного поля Солнца согласуется с выводами, вытекающими из модели 11-летнего цикла, развиваемой академиком Г.Ф. Крымским /4/.

В максимуме и на геоэффективной фазе начала ветви спада циклов 21 и 23 – доминирует нестационарная **полугодовая** вариация: рис. 9.4-9.5. Нестационарная полугодовая вариация обусловлена, по нашим представлениям, переходным колебательным процессом смены знака или инверсии общего магнитного поля Солнца, т.е. переполюсовкой (см. выше, п. 6.3, а также /1,5/). Чем выше амплитуда цикла в максимуме, тем короче фаза переполюсовки, после завершения которой, начинается восстановление интенсивности ГКЛ. И, наоборот, чем ниже амплитуда цикла, тем продолжительнее фаза переполюсовки. Длительность процесса переполюсовки для «низких» циклов 20 и 23, фактически, вдвое превышает таковую для более высоких циклов 21

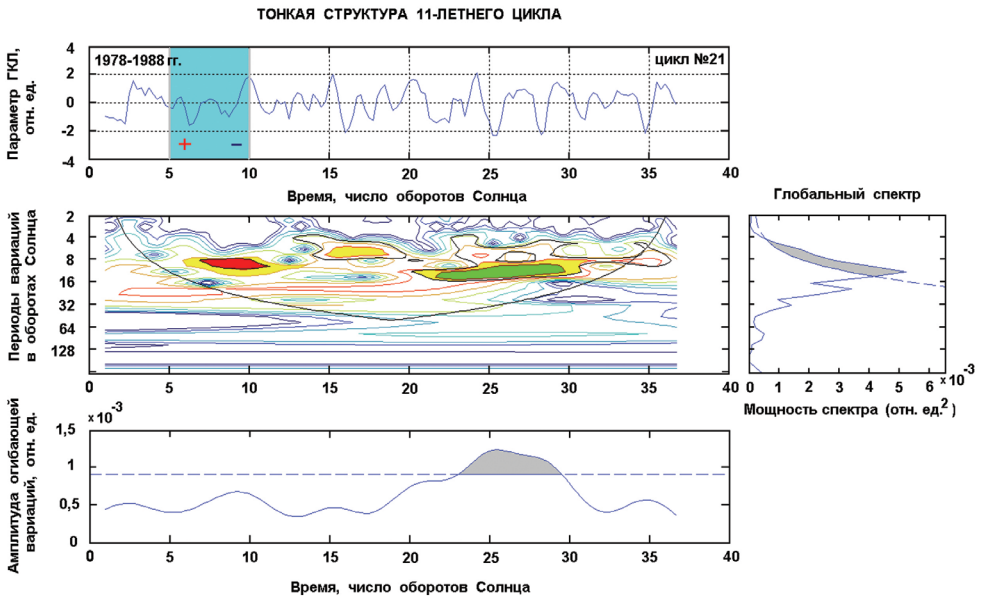


Рис. 9.5. Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 21 цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют традиционная нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В минимуме нечетного 21 цикла с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца доминирует традиционная годовая осцилляция. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.

и 22. Выявленная *обратная* зависимость указывает на возможное наличие ИНВАРИАНТА: «амплитуда 11-летнего цикла – длительность переполюсовки».

Похожая зависимость между длительностью и амплитудой 11-летнего цикла была получена относительно недавно в работе /6/: «время достижения максимума 11-летнего цикла *обратно* пропорциональна корню квадратному из его амплитуды» (см. также Приложение 9.5). Кроме того, само по себе наличие переходного колебательного процесса смены знака общего магнитного поля Солнца позволяет с *единых* позиций понять возможную причину появления «провала(ов) Гневышева» /7,8/, наблюдаемого в окрестности максимума 11-летнего цикла, в том числе, так называемые – «квази-двухлетние», а также «*полугодовые*» вариации межпланетного магнитного поля /9/.

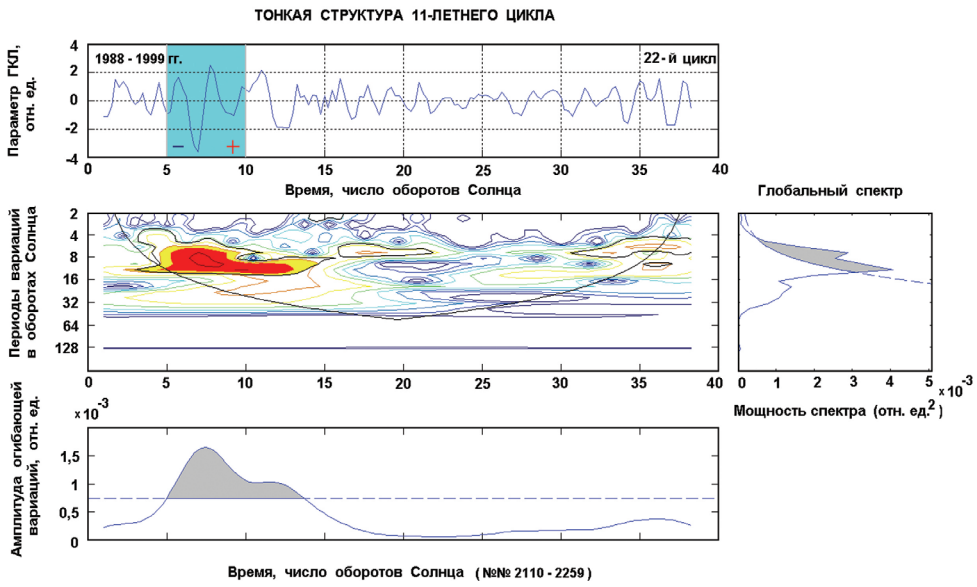


Рис. 9.6. Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 22 цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют традиционная нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.

9.4. Особенности процесса переполюсовки в новом 24 цикле.

Переходный колебательный процесс переполюсовки в новом **24** цикле характеризуется не привычной полугодовой вариацией, как это было в циклах 21-23, а вариацией с характерным масштабом *~1 год* (рис. 9.4). Это согласуется с современными данными солнечных наблюдений /10-11/, где отмечается квазипериодическая или импульсная структура фазы роста нового 24 цикла с периодом ~1 год. Ниже, проведен совместный анализ интенсивности космических лучей, параметров солнечного ветра: дисперсии ММП, скорости солнечного ветра и потока низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ.

Для анализа использовались данные прямых измерений на космическом аппарате ACE /12/. Действительно, на фазе роста и в окрестности максимума нового 24 цикла заметно выражена **годовая** вариация дисперсии ММП и скорости плазмы солнечного ветра (рис. 9.7-9.8). Это совпадает с годовой, в среднем, периодичностью регистрации предвестников, зарегистрированных нами в анализируемый период (см. рис. 9.3). Местоположение *максимума 24 цикла* подтверждается регистрацией *максимума потока* низкоэнергичных частиц с энергией

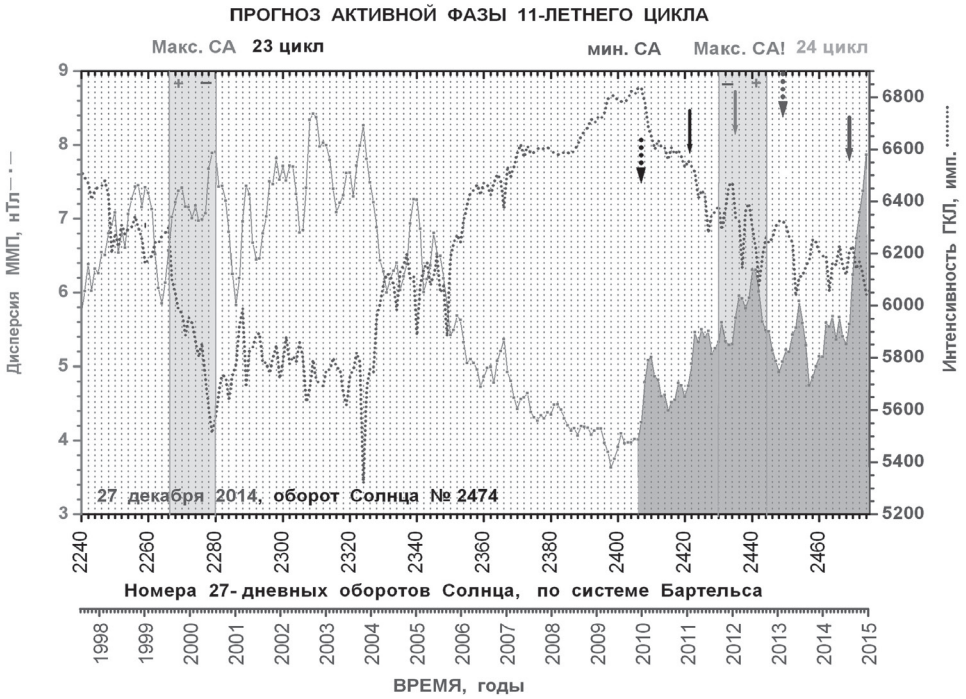


Рис. 9.7. Сопоставление 27-дневных значений интенсивности ГКЛ (пунктирная кривая) и напряженности межпланетного магнитного поля (сплошная кривая) по данным космического аппарата ACE /12/, в 23-24 циклах солнечной активности: 1997-2014 гг. Предвестники в космических лучах показаны вертикальными стрелками. Все предвестники предшествуют глобальным максимумам в напряженности магнитного поля. Как в параметре флуктуаций ГКЛ, так и в напряженности магнитного поля регистрируется годовая вариация.

~1 МэВ весной-летом 2012 г. (рис. 9.9). Таким образом, данные прямых измерений на космических аппаратах подтверждают наличие годовой «волны переполюсовки» в текущем 24 цикле и местоположение его максимума весной-летом 2012 г.

Годовая вариация является, очевидно, признаком аномальности текущего 24 цикла. Более «низкочастотная», т.е. годовая волна переполюсовки, означает большую длительность процесса переполюсовки в новом 24 цикле (см. также Приложение 9.6). Из факта большей (2011–2013 гг.) длительности переполюсовки следовало ожидать низкую амплитуду максимума текущего 24 цикла, что и было зарегистрировано в марте-июле 2012 г. (см. рис. 9.3). Это, несомненно, аргумент в пользу гипотезы об инвариантности бинарной связи: «амплитуда 11-летнего цикла – длительность переполюсовки».

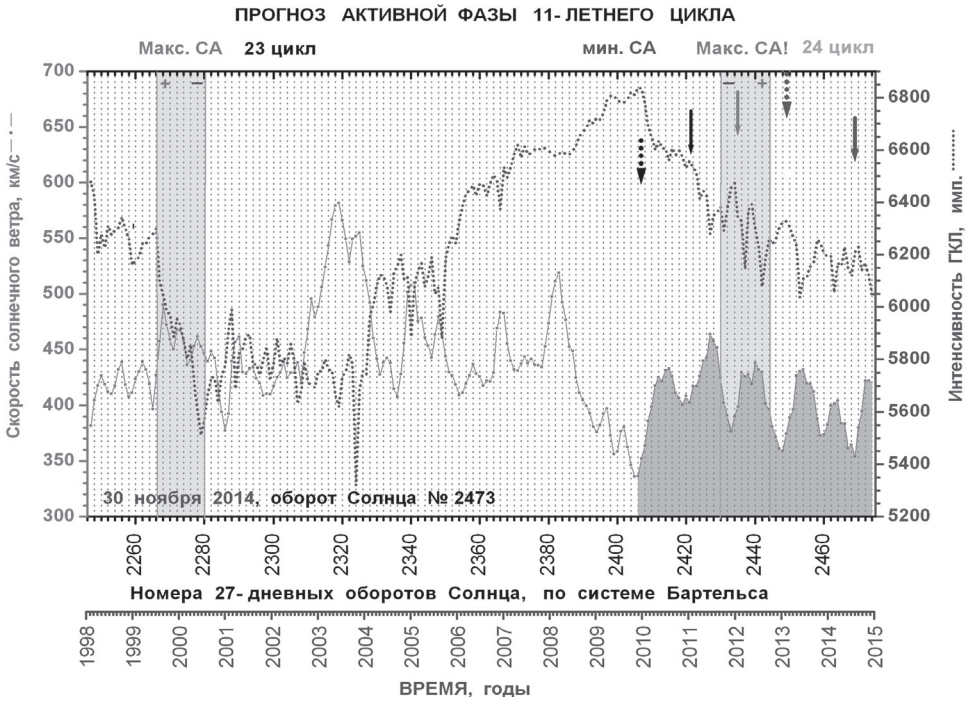


Рис. 9.8. Сопоставление 27-дневных значений интенсивности ГКЛ (пунктирная кривая) и скорости солнечного ветра (сплошная кривая) по данным космического аппарата ACE /12/, в 23-24 циклах солнечной активности: 1997-2014 гг. Предвестники в космических лучах показаны вертикальными стрелками. Все предвестники предшествуют глобальным максимумам в скорости солнечного ветра. И в параметре флуктуаций ГКЛ и в скорости солнечного ветра регистрируется годовая вариация.

9.5. Параметр флуктуаций космических лучей как индикатор турбулентности магнитного поля.

Важно сравнить параметр флуктуаций ГКЛ с ключевым параметром модуляции $k = \omega\tau$, введенным в работе /13/ для характеристики степени регулярности поля. Здесь ω – гирочастота частиц в регулярном магнитном поле, т – среднее время между актами рассеяния частиц. Параметр модуляции предполагается постоянным для всей гелиосферы и не зависящим от энергии частиц, хотя и будет меняться с циклом солнечной активности. Предположено, что величина параметра модуляции отражает отношение между напряженностью регулярного и турбулентного поля. Регулярное поле в период максимума много меньше турбулентного. Напротив, напряженность турбулентного поля максимальна во время максимума цикла: сначала она линейно растет со временем, достигая максимума во время переполюсовки и, затем, линейно уменьшается.

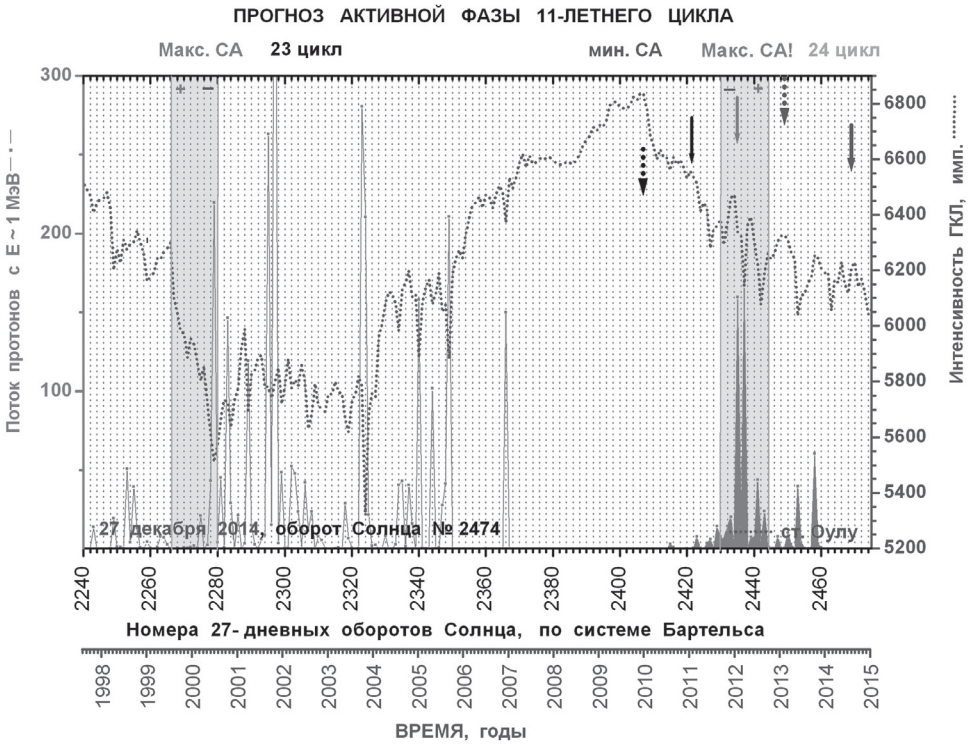


Рис. 9.9. Сопоставление 27-дневных значений интенсивности ГКЛ (пунктирная кривая) и величины потока низкоэнергичных протонов с энергий ~1 МэВ ветра (сплошная кривая) по данным космического аппарата ACE /12/, в 23-24 циклах солнечной активности: 1997–2014 гг. Предвестники в космических лучах показаны вертикальными стрелками.

Связь параметра флуктуаций ГКЛ со степенью турбулентности магнитного поля Солнца следует из результатов сопоставления параметра ГКЛ с «показателем эффективности солнечного мультиполя», который отражает вклад квадрупольной компоненты солнечного магнитного поля. Этот показатель (рис. 9.10) был введен ранее в работах группы ИЗМИРАН /14-15/. Он хорошо ($R = 0{,}83$) коррелирует с основным параметром солнечной активности – числами Вольфа (рис. 9.11). Ниже, проведено сопоставление введенного нами параметра флуктуаций ГКЛ с «показателем эффективности солнечного мультиполя» ИЗМИРАН. Их сравнение показывает, что **огибающие** вариаций параметра флуктуаций ГКЛ и вариаций «показателя эффективности солнечного мультиполя», в среднем, согласуются между собой (рис. 9.12). Это подтверждается достаточно высоким ($R = -0{,}74$) значением коэффициента их кросс-корелляции, точнее – антикорелляции (рис. 9.13).

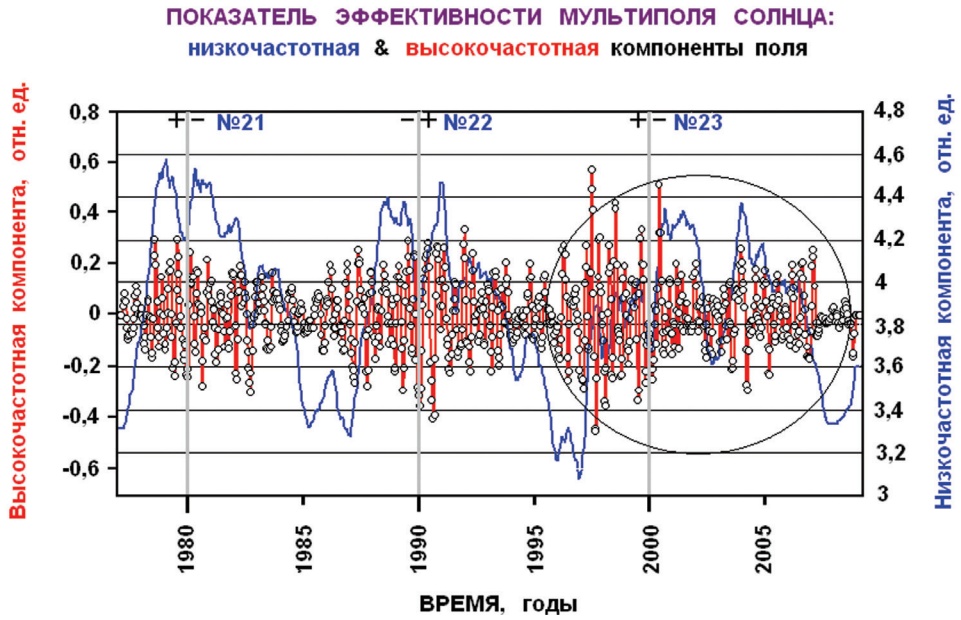


Рис. 9.10. Показатель эффективности солнечного мультиполя Солнца: низкочастотная компонента – сплошная кривая синего цвета, шкала справа; высокочастотная компонента – кривая красного цвета, открытые кружки, шкала слева. По оси абсцисс – время, годы.

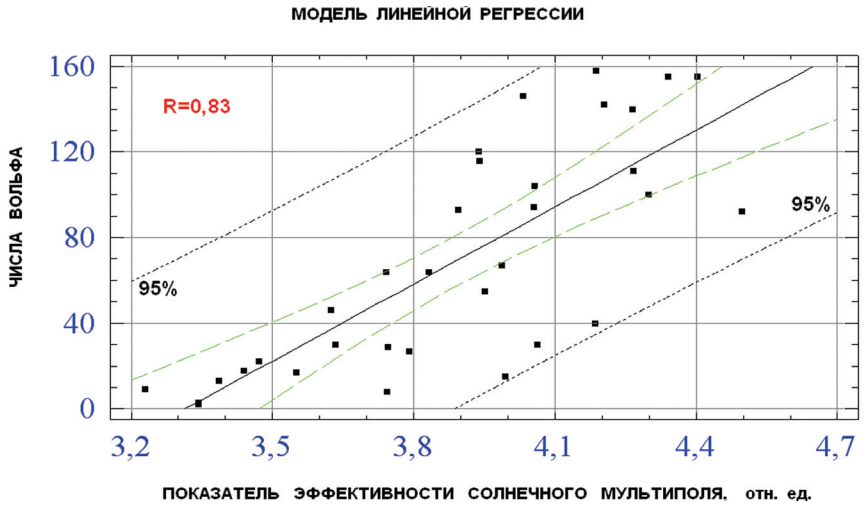


Рис. 9.11. Оценка корреляционной связи (R=0,83) между числами Вольфа и показателем эффективности солнечного мультиполя по модели линейной регрессии. Показан 95%-ный уровень значимости.

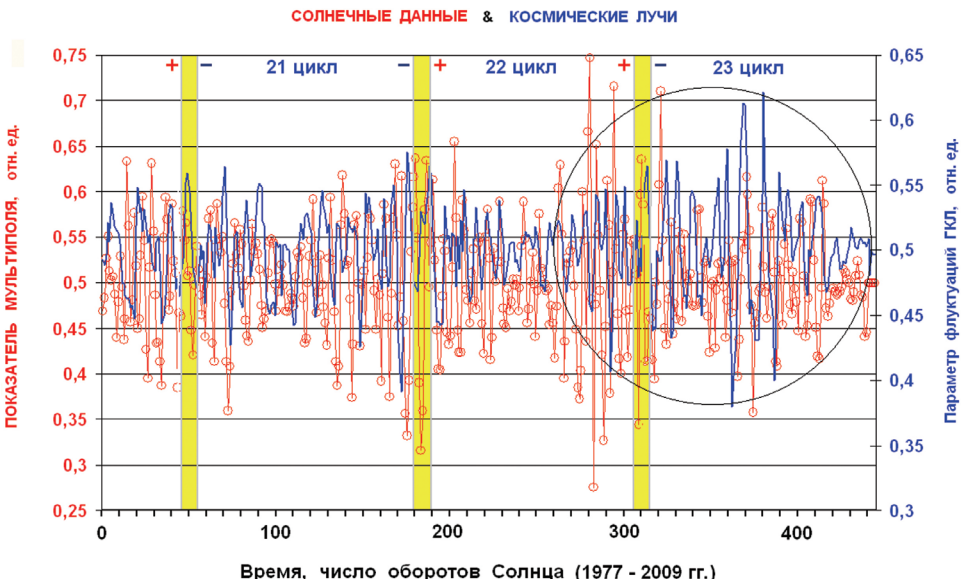


Рис. 9.12. Индекс мультиплетности солнечного магнитного поля, открытые кружки – шкала слева и параметр флуктуаций космических лучей = шкала справа (синяя кривая). По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов (с 1977 – 2008 гг.). Показаны номера циклов, условно, отмечены периоды смены знака общего магнитного поля Солнца. Огибающая вариаций параметра флуктуаций космических лучей и индекса мультиплетности достигают максимума, практически, одновременно.

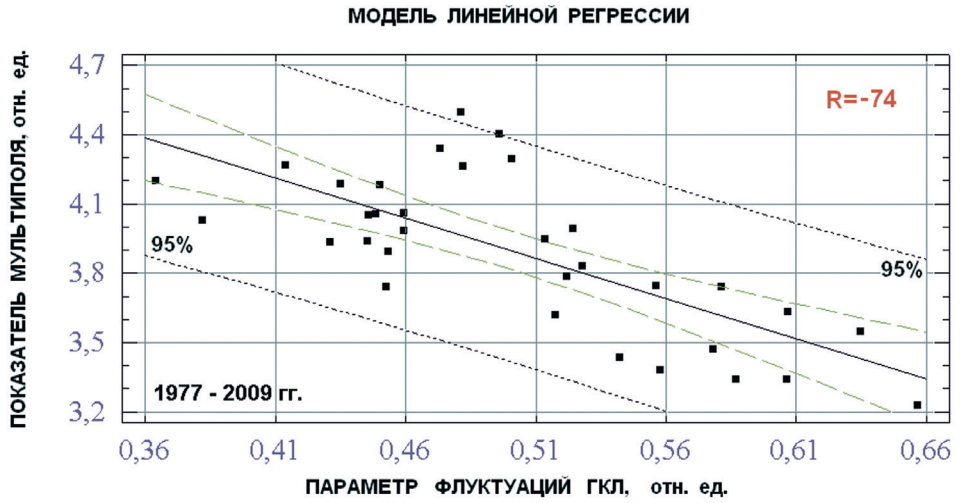


Рис. 9.13. Оценка корреляционной связи (R=-0,74) между показателем солнечного мультиполя и параметром флуктуаций космических лучей по модели линейной регрессии. Показан 95%-ный уровень значимости.

Параметр флуктуаций ГКЛ, являясь индикатором степени турбулентности магнитного поля, в указанном смысле, является обратным по отношению к степени регулярности магнитного поля k – ключевому параметру модуляции в модели 11-летнего цикла. Подобно турбулентной компоненте межпланетного магнитного поля, огибающая вариаций параметра флуктуаций ГКЛ (при исключении тренда, с периодом более одного года) достигает максимума на фазе инверсии поля, точнее, на стадии *завершения* переполюсовки общего магнитного поля Солнца в 1982, 1991 и 2003 гг. (см. рис. 9.10 и 9.12.). Таким образом, *высокие* значимые значения параметра флуктуаций ГКЛ является – индикатором *мелкомасштабноой* турбулентности магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

Этот вывод подтверждается результатами анализа флуктуационной компоненты солнечного магнитного поля независимой группой исследователей (Приложение 9.7). Флуктуационная компонента надежно регистрируюеся именно во время ИНВЕРСИИ магнитного поля Солнца (Приложение 9.8). При этом *максимальные* значения высокочастотной компоненты поля регистрируются на стадии *завершения* переполюсовки, в частности, в 1982, 1991 и 2003 гг. В космических лучах стадия завершения переполюсовки проявляется в виде резких и глубоких понижений интенсивности ГКЛ в начале ветви *спада* 11-летнего цикла. Наилучшим же образом, стадия завершения переполюсовки проявляется в параметре флуктуаций ГКЛ: в 1972, 1982, 1991, 2003 и 2014 гг. (рис. 9.14).

9.6. Эффект увеличения длительности 23 цикла в космических лучах.

Действительно, именно в начале ветви спада каждого 11-летнего цикла: 1972, 1982, 1991, 2003 и в 2014 гг. наблюдается достаточно резкие и глубокие понижения интенсивности ГКЛ. Указанные периоды известны как геоэффективные фазы начала ветви спада 11-летнего цикла. На их местоположение и указывают *низкие*, т.е. *диагностические* значения параметра флуктуаций космических лучей. Наличие 11-летней цикличности в параметре флуктуаций ГКЛ – очевидно. Это следует из простого сопоставления значений интенсивности (пунктирная кривая – открытые кружки, шкала справа) и введенного параметра флуктуаций ГКЛ (сплошная кривая – треугольники, шкала слева).

Оценка их связи с использованием модели линейной регрессии, указывает на хорошую ($R \geq 0{,}77$) корреляционную связь параметра флуктуаций с интенсивностью ГКЛ. Относительно связи параметра флуктуаций ГКЛ с традиционными индексами солнечной и геомагнитной

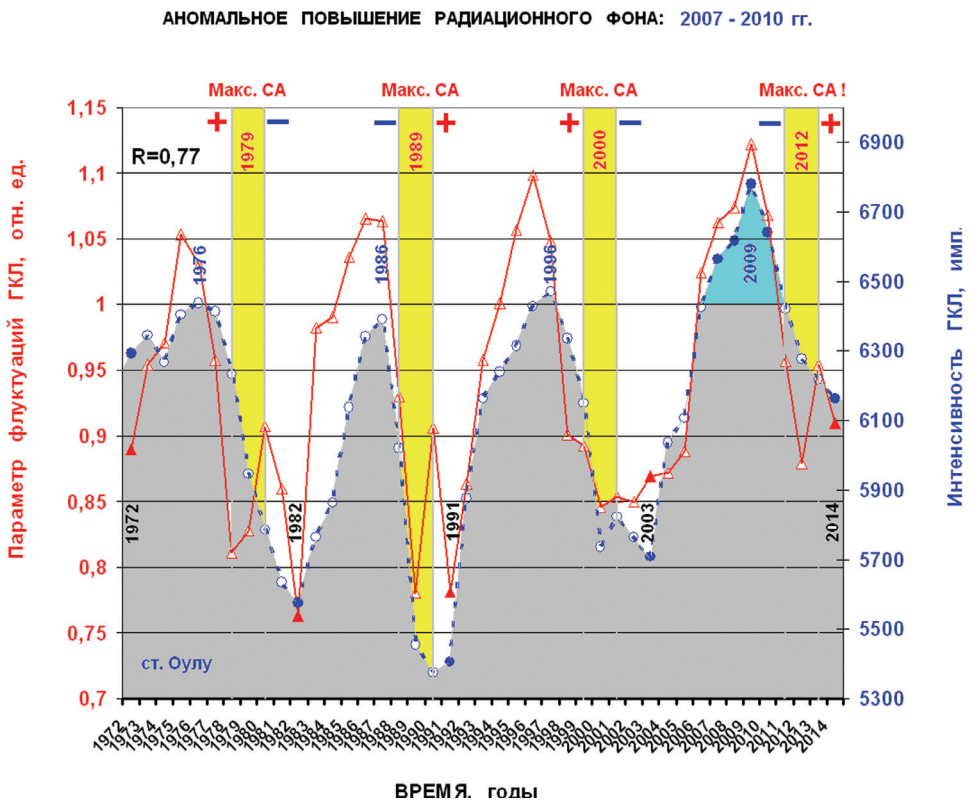


Рис. 9.14. Точечная кривая, шкала справа – среднегодовые значения интенсивности космических лучей с 1972–2014 гг. Сплошная кривая, шкала слева – соответствующие значения параметра флуктуаций, рассчитанного за тот же период (5 неполных циклов: 20-24). Условно, показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца и периоды минимумов и максимумов активности Солнца. Низкие значения параметра флуктуаций означают диагностику возмущенного периода. По оси абсцисс – время: годы и, соответственно, номера оборотов Солнца по системе Бартельса.

активности следует сказать следующее. Корреляция параметра флуктуаций с интенсивностью ГКЛ $R = 0{,}80$; с числами Вольфа ($R = -0{,}74$); с индексом «электрического поля солнечного ветра» $R = -0{,}76$. Наибольшее значение имеет антикорреляция параметра флуктуаций ГКЛ с D_{st}-вариацией ($R = 0{,}85$). Корреляционная матрица связей параметра флуктуаций ГКЛ с индексами солнечной активности, параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности приведена в Приложении 9.9.

Очевидно, что найденная корреляционная связь обусловлена 11-летней вариацией в анализируемых параметрах. Это подтверждается результатами вейвлет-анализа (диаграмма в средней части рис. 9.15):

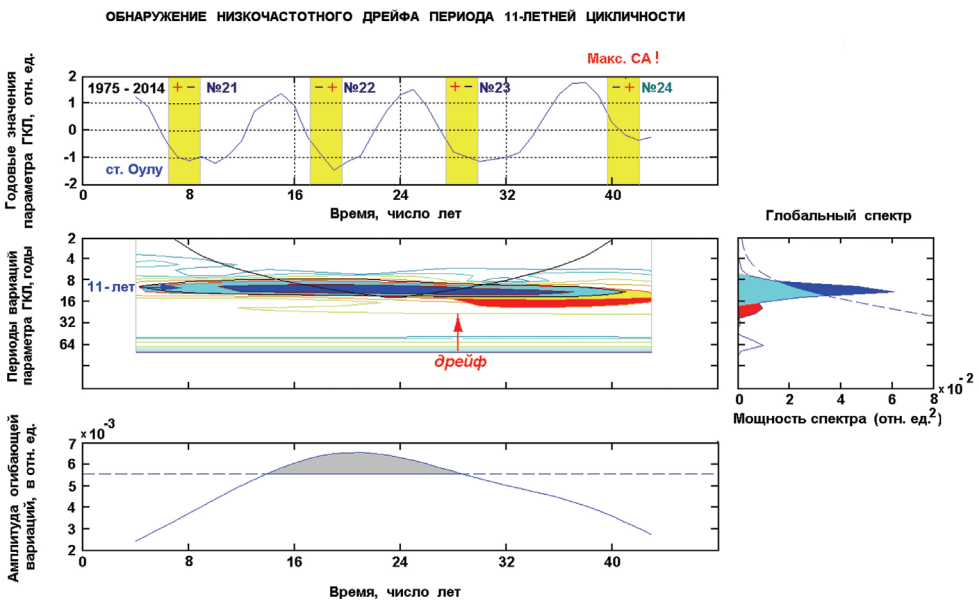


Рис. 9.15. Вверху – временной ход параметра флуктуаций 43 года, с 1972-2014 гг. Ниже, амплитудно-частотно-временная диаграмма эволюции 11-летней вариации за исследуемый период. Справа – глобальный спектр вариаций в целом. Внизу – огибающая амплитуд вариаций. Местоположение 11-летней вариации на диаграмме показано горизонтальной стрелкой слева. Вертикальная стрелка, указывает на начало низкочастотного дрейфа периода 23 цикла. Условно, показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца и, соответственно, номера солнечных циклов.

11-летняя вариация в параметре флуктуаций галактических космических лучей выявляется достаточно отчетливо. Обращает на себя внимание появление «*низкочастотного дрейфа*» периода 11-летней вариации, т.е. *увеличение длительности* солнечного цикла № 23. Этот важный для дальнейшего результат, подтверждает наш вывод, полученный ранее по индексу мерцаний ГКЛ (п. 6.1, рис. 6.9). И это естественно, так как индекс мерцаний и параметр флуктуаций ГКЛ ведут себя похожим образом: коэффициент их взаимной корреляции не менее 0,6 на уровне значимости 95% (рис. 9.16).

Увеличения длительности 23 цикла следовало ожидать, если предложенная нами гипотеза об инварианте «амплитуда 11-летнего цикла – длительность переполюсовки», действительно имеет место. Вывод об увеличении длительности солнечного цикла № 23 был сделан в 2006 г. /1/. Сейчас этот вывод подтвердился на новой базе, с использованием параметра флуктуаций ГКЛ. Существенно, что сам факт увеличения длительности 23 цикла является независимым экспериментальным

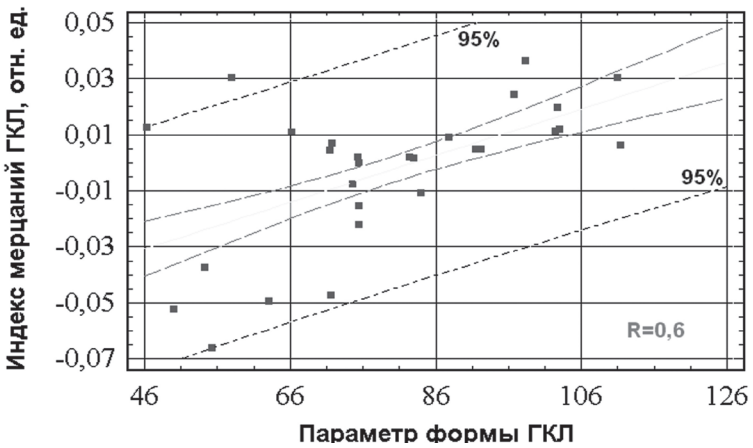


Рис. 9.16. Оценка регрессионной связи между индексом мерцаний космических лучей и вновь введенным параметром флуктуаций ГКЛ по данным за 23 цикл солнечной активности. Коэффициент взаимной корреляции составляет величину R=0,6 на уровне значимости 95%.

свидетельством в пользу реальности вышеуказанного инварианта, его ожидаемым следствием.

9.7. Предвестник сбоя 11-летней цикличности Солнца в космических лучах на языке «фазовых портретов».

*«…Здесь любая динамическая система имеет свой уникальный след – фазовый портрет. И среди них встречаются фазовые портреты довольно **странные**».*

Деменок С.Л. ФРАКТАЛ. Между мифом и ремеслом. СПб. 2011. 296 стр. 142.

Почему так важен факт увеличения длительности 11-летнего цикла? Дело в том, что появление низкочастотной «подложки» в спектре 11-летнего цикла может предшествовать сбою 11-летней цикличности /16/. И наши исследования это подтверждают /17/. Сбой 11-летней цикличности проявляется не только в изменении длительности цикла, но и его амплитуды. Рекордно высокое значение интенсивности ГКЛ в четырехлетний период 2007-2010 гг. (рис. 9.14) связано, в первую очередь, с ослаблением глобального дипольного поля Солнца. И такие данные уже появились. Как показано в работе /18/, магнитный момент солнечного диполя в 2008 г. снизился до значений, характерных для начала XX века (Приложение 9.10). Причем, в настоящее время аномально низки и локальные поля /19/. Такой длительный период с полным исчезновением солнечных пятен наблюдался лишь в начале прошлого века.

Важно заметить, что гипотеза о наличии инварианта «амплитуда 11-летнего цикла – длительность переполюсовки» явилась логическим следствием целостного подхода к анализу вариаций. Дальнейшее развитие целостного подхода естественно завершить анализом «фазовых портретов» солнечных циклов на комплексной фазовой плоскости. С этой целью, применим метод траекторного анализа колебаний на комплексной фазовой плоскости с использованием аналитического сигнала. Аналитический сигнал является математической моделью исходного сигнала. На комплексной плоскости он отображается вектором, модуль и фазовый угол которого изменяются от аргумента, а проекция сигнала на вещественную ось равна значению исходного сигнала (см. Приложение 9.11).

«Фазовые портреты» 11-летннй цикличности приведены на рис. 9.17. Они рассчитывались по среднегодовым значениям параметра флуктуаций ГКЛ. В верхней части рисунка, показан временной ход аннализируемого параметра. На шкале времени приведены номера циклов. Наибольшую площадь, описывает траектория 23 цикла (показана красным цветом). Увеличение площади цикла начинается с 2006 г. (точка на фазовой траектории № 32). *Наибольшая* площадь, заметаемая фазовой траекторией, считается (по Г.В. Куклину /20/, Приложение 9.12) признаком аномального цикла перед «фазовой катастрофой».

В таком случае, сейчас мы, как минимум, находимся на стадии неординарного спада солнечной активности и, как максимум – в начальной фазе длительного сбоя 11-летней цикличности Солнца, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Прежде всего, имеется в виду аномально высокий, по сравнению с большинством циклов прошлого века, уровень интенсивности космических лучей в 2007-2011 гг. (заштрихованная область на рис. 9.14). В результате, на языке «фазовых портретов» получено независимое подтверждение вывода /1/ о предвестнике сбоя 11-летней цикличности Солнца в современную эпоху – эпоху «Космической эры».

9.8. Инвариант с характерным масштабом 22-летнего цикла.

«…И была ли опровергнутая гипотеза бесплодной? Нисколько! Она, можно сказать, принесла больше пользы, чем иная верная гипотеза: не только потому, что она вызвала ***решающий опыт****, но и потому, что, не будь ее, этот опыт был бы произведен* наудачу*, и в нем не увидели бы ничего чрезвычайного».*

Анри Пуанкаре. «О НАУКЕ. Наука и гипотеза». 1983. М. Наука. С. 97.

Выше, было установлено, что эффект увеличения «площади цикла», по сути – предвестник сбоя 11-летней цикличности. Ввиду важности

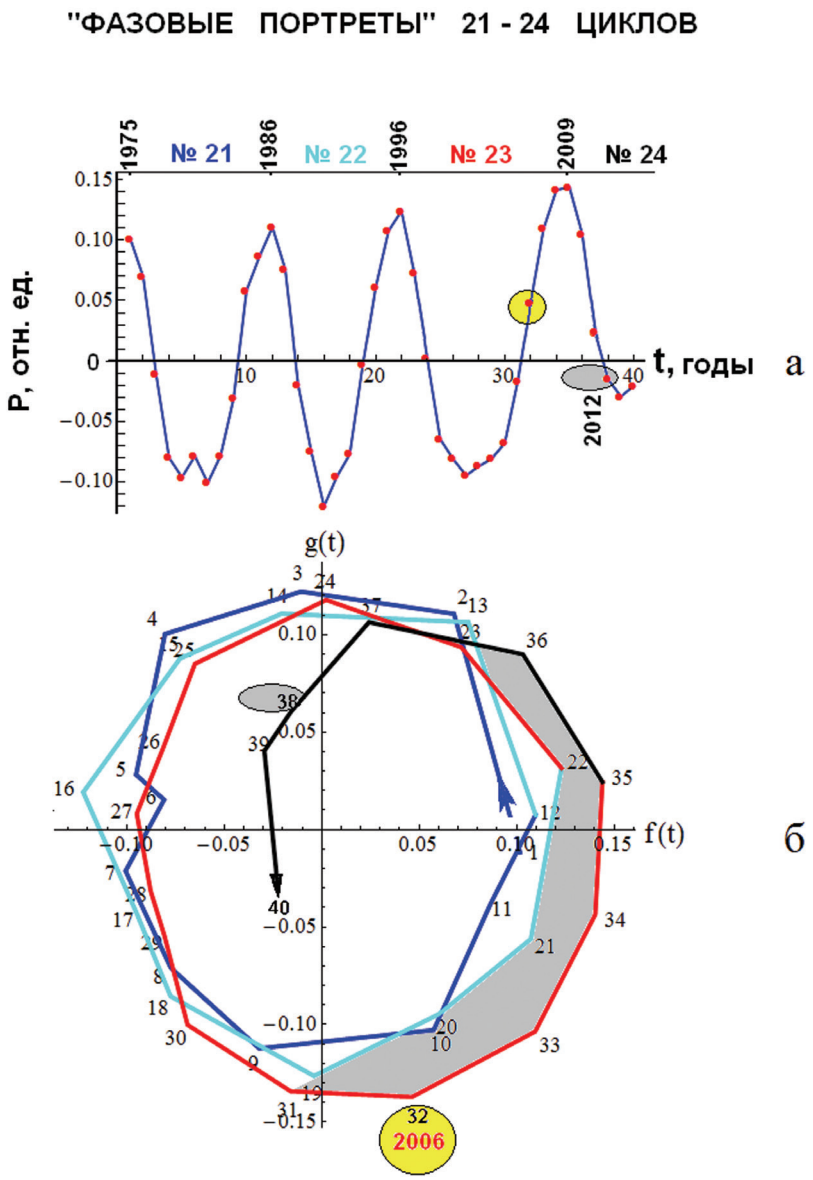


Рис. 9.17. «Фазовые портреты» последних 4-х неполных циклов №№ 21-24 (с 1975-2014 гг.) рассчитанные по среднегодовым значениям параметра флуктуаций космических лучей. Вверху – временной ход среднегодовых значений параметра флуктуаций космических лучей. Показаны номера соответствующих циклов. Наибольшую площадь имеет 23 цикл. Наибольшая площадь 23 цикла является предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности, т.е. предвестником «фазовой катастрофы» 24 цикла.

этого, оценку площади цикла желательно получить разными способами: по оценке площади заметаемой под кривой временного хода 11-летнего цикла и по оценке площади заметаемой фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости. Физический смысл площади цикла представляется более прозрачным во втором варианте (площадь, заметаемая фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости), нежели в первом. Площадь, заметаемая фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости, имеет, как известно, размерность «фазового объема» или ДЕЙСТВИЯ, с размерностью «энергия **x** время». В этом смысле, для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой его *энергоемкости*.

Ниже приводится средняя оценка площадей, т.е. энергетических характеристик 21-24 циклов для параметра флуктуаций ГКЛ двумя указанными способами. Площади для циклов 21 и 22, практически одинаковы (рис. 9.18). Неизменность площади, как характеристики энергоемкости, указывает на *консервативность* системы в течение двух последовательных циклов 21 и 22. Консервативность, в указанном смысле, нарушается для двух последующих циклов 23 и 24 (рис. 9.18). Неконсервативность системы означает наличие циклов с различной

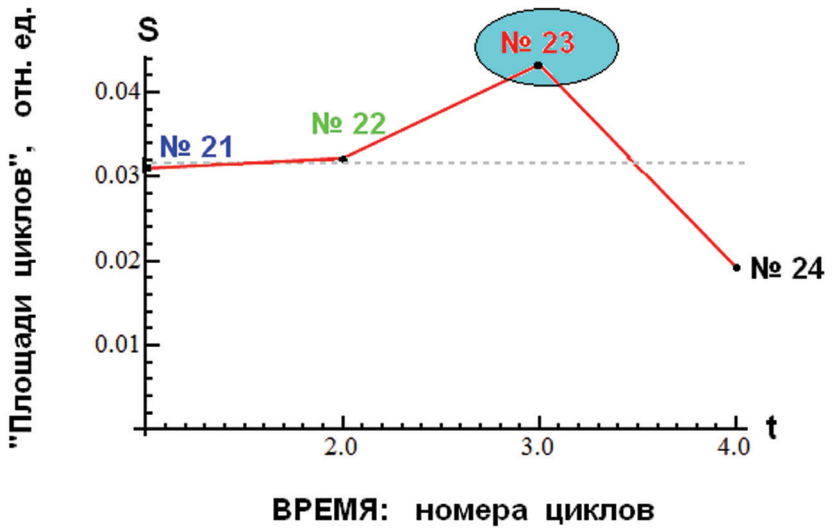


Рис. 9.18. Оценка площадей заметаемых под кривыми 11-летних циклов 21-24 (с 1975-2014 гг.) по их «фазовым портретам», рассчитанным по среднегодовым значениям параметра флуктуаций космических лучей. Показаны номера циклов. Наибольшую площадь имеет 23 цикл. Наибольшая площадь 23 цикла является предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности, т.е. предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах.

энергоемкостью (разными площадями). Это и наблюдается в циклах 23 и 24: максимальная площадь приходится на 23 цикл, с последующим явным спадом площади «сбойного» 24 цикла.

Усреднение площади пары циклов 23 и 24, практически, сохраняет неизменность площадей пар 11-летних циклов: 21-22 и 23-24, т.е. неизменность площадей соседних 22-летних циклов. Это может означать консервативность системы (Солнца) в *широком* смысле, т.е. наличие ИНВАРИАНТА с характерным масштабом длительности физического **22**-летнего цикла: после (возможно) локального сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах, функционирование системы (Солнца) в следующем **25** цикле должно … восстановиться!? Сохранение консервативности системы в широком смысле, т.е. наличие инварианта физического 22-летнего цикла, отражает дискретный (за 22-летний цикл), автоколебательный режим «стравливания» или регуляции энергии стабилизирующий температуру Солнца. В этом, физический смысл инварианта 22-летнего цикла.

Следовательно, если инвариант физического 22-летнего цикла действительно имеет место, то после (возможно) локального сбоя в 23-24 циклах, 11-летняя цикличность должна восстановиться к **25** циклу. В этом случае, текущий минимум активности Солнца в 23-24 циклах будет иметь статус «**локального**», как и в случае локального (по нашему определению) сбоя, имевшего место в циклах 19-20. Таков наш прогноз на базе «первых принципов», т.е. на основе гипотезы о наличии инварианта физического 22-летнего цикла.

9.9. «Фазовая катастрофа» 11-летней цикличности как нарушение инварианта 22-летнего цикла.

«…Блажен, кто посетил сей Мир
в его минуты роковые!»
Ф.И. Тютчев. 1836 г.

В случае нарушения инварианта с характерным масштабом физического 22-летнего цикла, т.е. нарушения консервативности в широком смысле, мы сталкиваемся с ситуацией «фазовой катастрофы». Примером тому, являются глобальные минимумы, известные как: минимум Маундера, минимум Дальтона и минимум Глайсберга (см. рис. 9.19). Качественные данные по космическим лучам с высоким разрешением за период ранее, чем 1968 г., к сожалению, попросту отсутствуют. И потому метод построения «фазовых портретов» на комплексной фазовой плоскости мы применим к числам Вольфа.

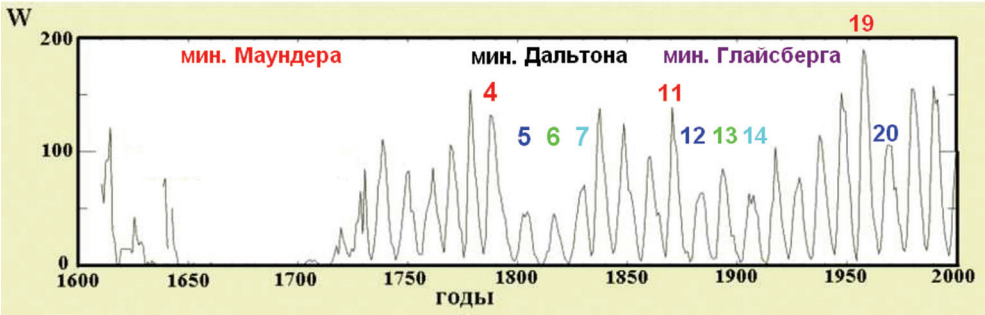


Рис. 9.19. Числа Вольфа с 1600 по 2000 гг. Отмечены номера солнечных циклов и указано местоположение глобальных минимумов активности Солнца: минимума Маундера, минимума Дальтона и минимума Глайсберга. По оси абсцисс – время, годы.

Анализировались четверки циклов 4-7 и 11-14 и (рис. 9.20 – 9.21). Циклы 4 и 11 являются циклами с фазовыми портретами максимальной площади, после которых наблюдается явный спад площади цикла: площадь фазового портрета последующего цикла заметно меньше предыдущего. Наибольшие площади циклов **4** и **11** оказываются предвестниками «фазовых катастроф»: глобальных минимумов Дальтона и Глайсберга.

Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла означает, очевидно, неконсервативность системы: срыв режима регуляции колебаний (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца, т.е. «фазовую катастрофу». Очевидно, это и произошло во время глобальных минимумов Маундера, Дальтона и Глайсберга. Таким образом, по космическим лучам с высоким разрешением открываются уникальные возможности мониторинга срыва режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца. В частности, это будет возможно в современную эпоху, если 11-летняя цикличность не восстановится к 25 циклу. В этом случае, статус сбоя 23-24 циклов изменится с локального на – **глобальный**!

9.10. Последствия затяжного спада активности Солнца в современную эпоху.

«Не дай вам Бог
жить в эпоху перемен»
Конфуций

Затяжной спад солнечной активности приводит к долговременному увеличению *радиационного фона* – интенсивности ГКЛ (см. рис. 9.1, 9.3 и 9.14). Увеличение интенсивности ГКЛ способствует, как известно,

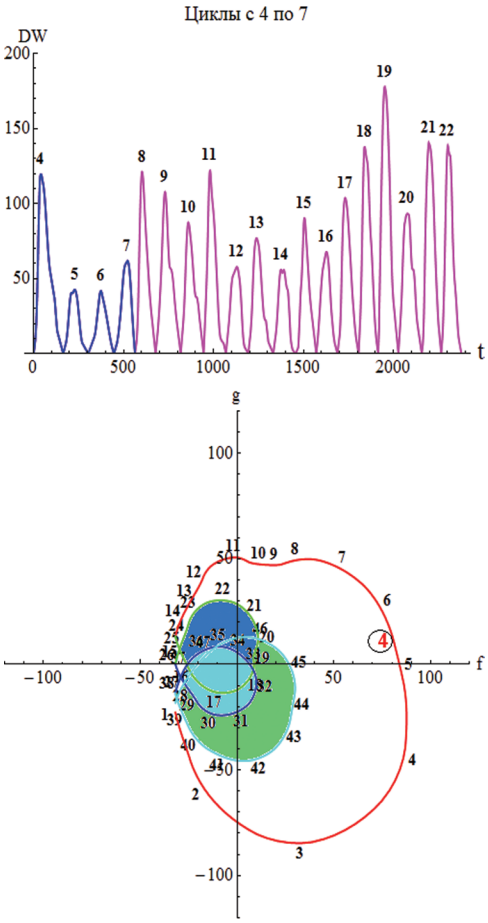


Рис. 9.20. Результаты траекторного анализа среднемесячных значений чисел Вольфа за четыре 11-летних цикла 4-7 (эпоха глобального «минимума Дальтона»). Вверху – временные вариации циклов с 4-22. Отмечены номера циклов. Ниже – фазовые траектории циклов на комплексной фазовой плоскости для циклов 4-7. Наибольшую площадь имеет цикл № 4, который является предвестником «фазовой катастрофы» эпохи глобального «минимума Дальтона».

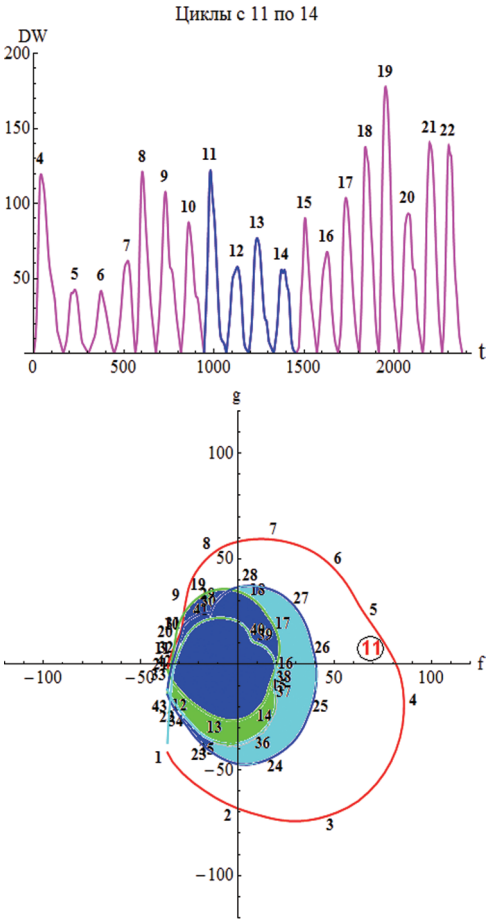


Рис. 9.21. Результаты траекторного анализа среднемесячных значений чисел Вольфа за четыре 11-летних цикла 11-14 (эпоха глобального «минимума Глайсберга»). Вверху – временные вариации циклов с 4-22. Отмечены номера циклов. Ниже – фазовые траектории циклов на комплексной фазовой плоскости с №№ 11-14. Наибольшую площадь имеет цикл № 11, который является предвестником «фазовой катастрофы» эпохи глобального «минимума Глайсберга».

усилению процесса облакообразования, *интенсификации* конвективных процессов в атмосфере и, как следствие, увеличению количества осадков и понижению температуры в планетарном масштабе. В этом состоит альтернатива процессу глобального потепления /1, 21/. Очевидно, все это будет иметь существенное значение лишь в случае не восстановления 11-летней цикличности, т.е. нарушения инварианта 22-летнего цикла: срыва режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца.

Нарушение инварианта 22-летнего цикла, т.е. реализация сценария затяжного сбоя 11-летней цикличности в **25** цикле (2020-2030 гг.), могла бы означать реальность нелинейных режимов эволюции общего магнитного поля Солнца. Очевидно, что сбой 11-летней цикличности по сценарию «фазовой катастрофы», отличается от общепринятого в настоящее время, сценария «линейной суперпозиции» периодических волн (11 лет, 200 лет и т. д.). В соответствии со сценарием «линейной суперпозиции», наступление затяжного сбоя 11-летней цикличности ожидается лишь в середине 21 века.

Долгосрочный прогноз активности Солнца важен при планировании долгосрочных экспериментов в Космосе и осуществлении *длительных* полетов человека к Луне и планетам солнечной системы, которые уже запланированы на ближайшее десятилетие. Без возможности обеспечения долгосрочных прогнозов большинство экспериментов в околоземном космическом пространстве и, прежде всего, пилотируемые дальние перелеты будут обречены. Не следует также забывать и о том, что в условиях *повышенного* радиационного фона *увеличивается* вероятность мутаций не только в генетическом материале человека, животных и растений, но и различных вирусов. И к этому следует быть готовыми. Так что еще неизвестно, что хуже – экстремальная солнечная активность или ... ее отсутствие.

Резюме к главе 9

1. Высоки**е** значимые значения параметра флуктуаций ГКЛ является индикатором мелкомасштабноой турбулентности магнитного поля на **переходном** режиме к активной фазе солнечного цикла. Напротив, *низкие* значения параметра флуктуаций являются индикатором крупномасштабной структуры с *регулярным* полем непосредственно во время активной фазы солнечного цикла.

2. Дан прогноз активных фаз солнечного цикла с заблаговременностью порядка **~1** оборота Солнца. Предвестник в космических лучах

является индикатором начала **перестройки** магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла. Максимум *спорадической* активности текущего 24 цикла зарегистрирован весной – летом 2012 г., завершение фазы переполюсовки – лето 2013 г. а, с 2014 на 2015 гг. – регистрируется геоэффективная фаза начала ветви спада текущего 24 цикла.

3. ***Обратная зависимость*** длительности процесса переполюсовки от амплитуды 11-летнего цикла положена в основу гипотезы об **инварианте** 11-летнего цикла: «амплитуда цикла – длительность переполюсовки», который описывает вариации амплитуды и длительности цикла в пределах постоянства его площади – характеристики *энергоемкости* цикла.

4. На основе гипотезы об инварианте 11-летнего цикла, в 2006 г. был дан прогноз **сбоя** 11-летней цикличности, т.е. *увеличении* длительности 23 цикла /1/, подтвердившийся в дальнейшем данными солнечных наблюдений.

5. Инвариант с характерным масштабом длительности 22-летнего цикла предполагает постоянство площади заметаемой 22-летним циклом, как это наблюдалось, например, во время «**локальных**» минимумов: циклы 19-20 и, возможно, 23-24, на основе чего дан предварительный прогноз *восстановления* 11-летней цикличности в *25* цикле (2020-2030 гг.).

6. Не восстановление 11-летней цикличности в **25** цикле (2020–2030 гг.), будет означать смену статуса сбоя 11-летней цикличности в 23-24-25 циклах с *локального* на … **глобальный,** что означает режим «фазовой катастрофы» или срыв режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца.

Литература к главе 9

1. Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20-23 циклах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 47-55. 2007.

2. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 95-99. 1999.

3. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 100-104. 1999.

4. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П. Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41, № 4. С. 444–449. 2001.

5. Kozlov V.I., Kozlov V.V., Markov V.V. Effect of Polarity Reversal of Solar Magnetic Field in Cosmic Ray Fluctuations // Proceeding on ISCS-2003 Symposium «Solar Variability as an Input to the Earth's Environment». Tatranska Lomnica. Slovakia. P. 117-120. 2003.

6. Кононович Э.В. Аналитические представления средних вариаций солнечной активности в течение цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 3. С. 316-323. 2005.

7. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальная магнитология и опорные точки солнечного цикла // Астрономический журнал. Т.80. № 11. С. 1034-1045. 2003.

8. Bazilevskaya G.A., Kraynev M.V., Makhmutov V.S., Sladkova A.I. Long-term changes in galactic cosmic ray variations caused by the solar rotation // Proceeding 24-th ICRC. Vol. 4. P. 572-576. 1995.

9. Сарычев В.Т. Тренды и секторная структура межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 3. С. 309-316. 2006.

10. С.А. Язев. Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности // Солнечно-земная физика. Вып. 16. С. 94-101. 2010.

11. Д.В. Мордвинов, С.А. Язев, Ч. Лхагважав, Д. Батмунх. Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. Вып. 7. С. 10-15. 2011.

12. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/

13. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., В.Г., Мамрукова В.П., Герасимова. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей высоких энергий. 1. Базовая модель модуляции космических лучей с циклом солнечной активности // ЖЭТФ. Т. 131. Вып. 2. С. 214-221. 2007.

14. Иванов Е.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Крупномасштабная структура солнечных магнитных полей и корональные выбросы массы // Письма в Астрономический журнал. Т. 74. № 2. С. 273-277. 1997.

15. Ivanov E.V., Obridko V.N. The Cyclic Variations of the CME Velocity // Solar Phys., Vol. 198, P. 179-196. 2001.

16. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели // Москва-Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2003.

17. V.I. Kozlov, V.V. Kozlov. "Cosmic ray fluctuation parameter as indicator of 11-year cycle activity growth phase". IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series 409. 2013. (012160 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012160).

18. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в Астрономический журнал. Т. 35. №4. С. 279-285. 2009.

19. Белов А.В., Гайдаш С.П. Аномально низкая солнечная и геомагнитная активность в 2007 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 595-602. 2009.

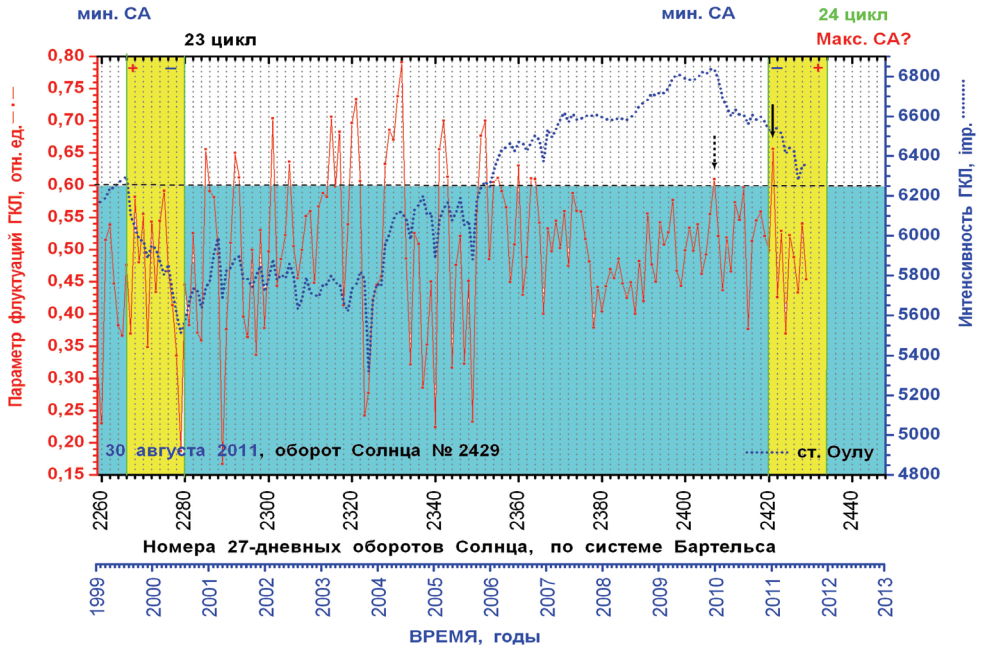
20. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. Изд-во «Наука». 296 с. 1986.

21. Крымский Г.Ф. Космические лучи и околоземное пространство // Солнечно-земная физика. ИСЗФ СО РАН. Иркутск. Вып. 2 (115). С. 42-45. 2002.

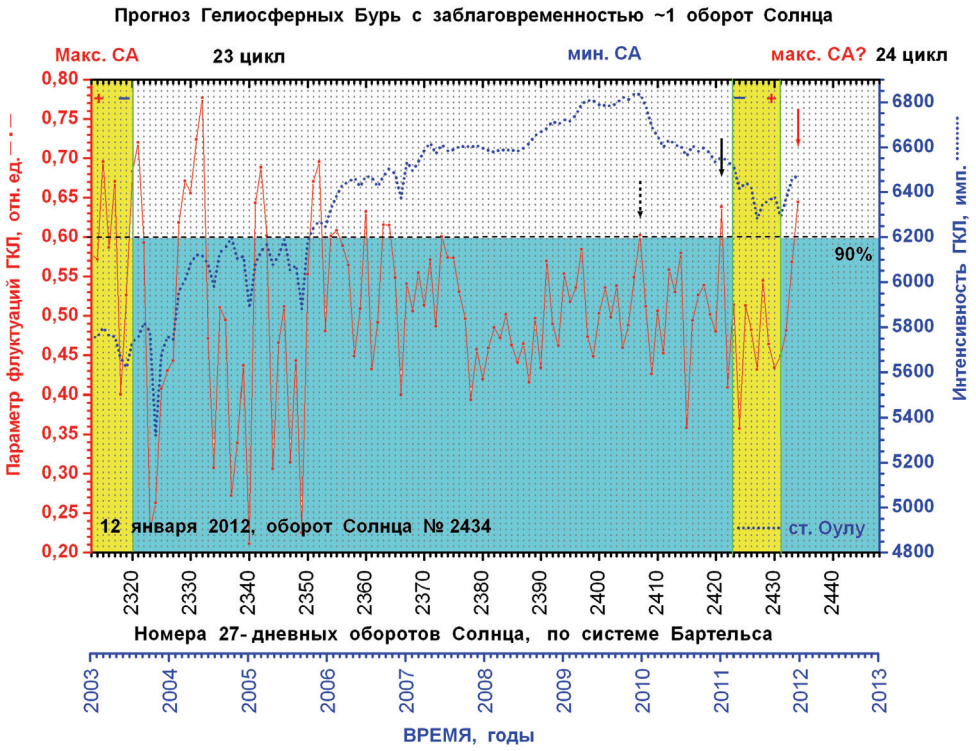
ПРИЛОЖЕНИЯ
к главе 9

Приложение 9.1

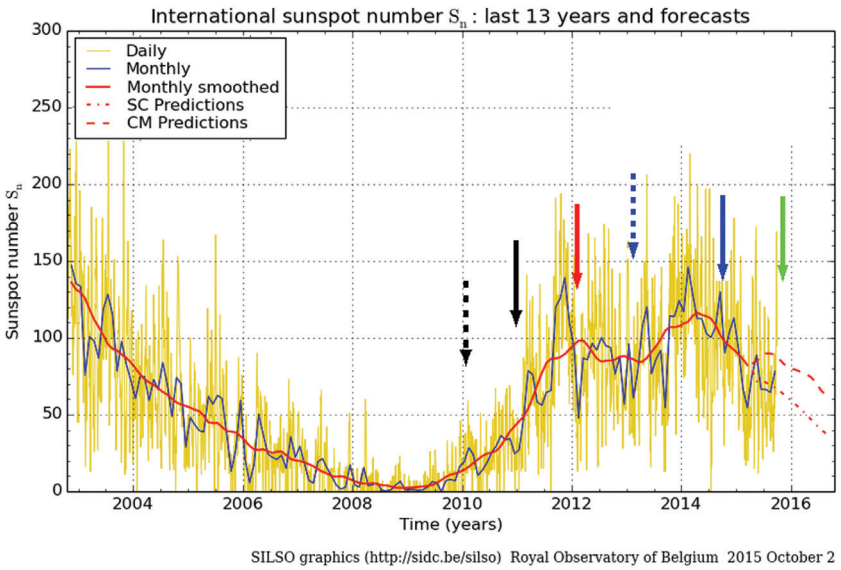
Приложение 9.2



Приложение 9.3

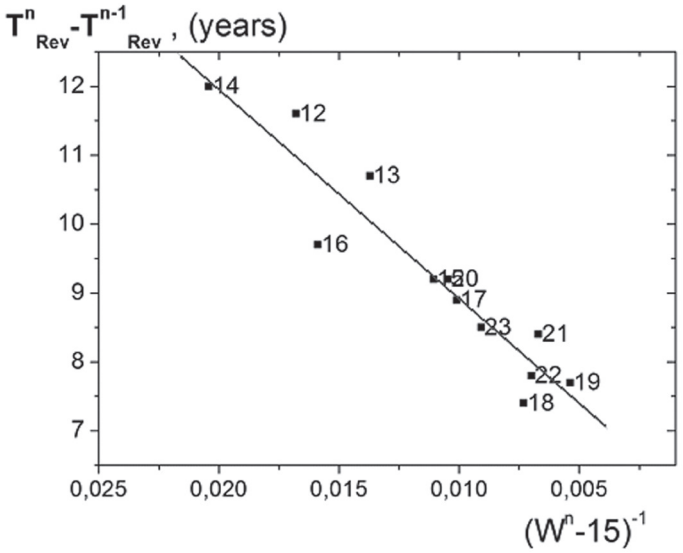


Приложение 9.4



Приложение 9.5

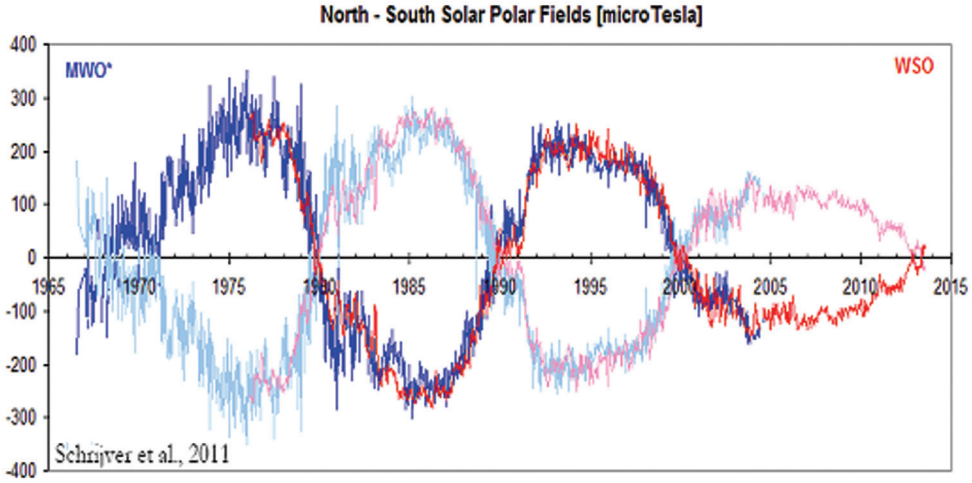
СВЯЗЬ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ИНВЕРСИЯМИ ПОЛЯ И АМПЛИТУДОЙ ЦИКЛА



А.Г. Тлатов (Кисловодская Горная станция ГАО РАН).

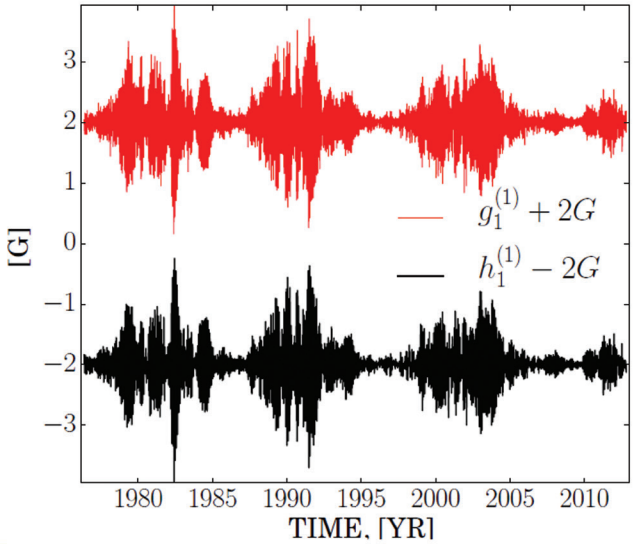
IX ежегодная конференция "ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ", ИКИ, Москва, 10 - 14 февраля 2014.

Приложение 9.6



Приложение 9.7

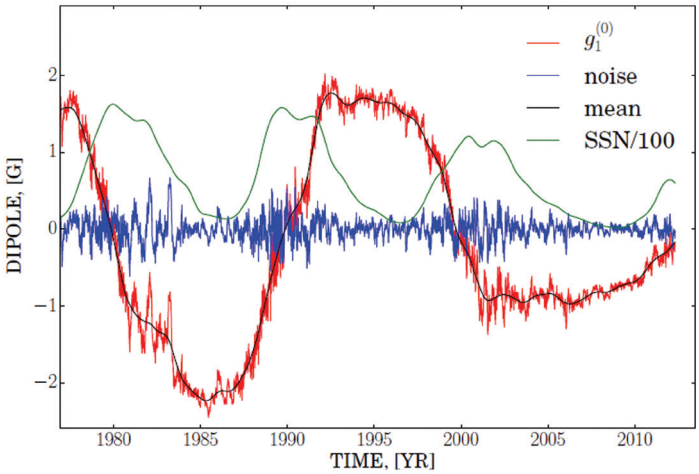
ФЛУКТУАЦИОННАЯ КОМПОНЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА



Д.Д. Соколов (МГУ), В.В. Пипин (ИСЗФ, Иркутск), Д. Мосс (Университет, Манчестер), J.T. Hoeksema (Stanford University).

IX ежегодная конференция "ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ", ИКИ, Москва, 10 - 14 февраля 2014.

Приложение 9.8



Д.Д. Соколов (МГУ), В.В. Пипин (ИСЗФ, Иркутск), Д. Мосс (Университет, Манчестер), J.T. Hoeksema (Stanford University).

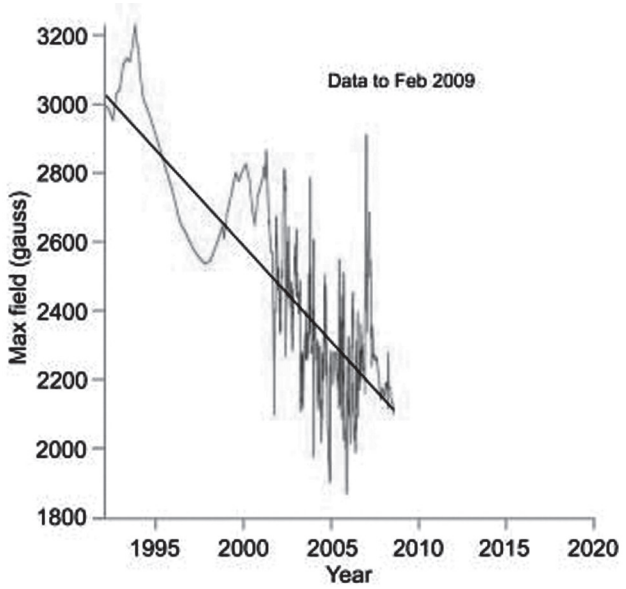
IX ежегодная конференция "ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ", ИКИ, Москва, 10 - 14 февраля 2014.

""... во время ИНВЕРСИИ магнитный момент ... ЦЕЛИКОМ обусловлен магнитными флуктуациями"

Приложение 9.9

	Параметр ГКЛ	Интенс. ГКЛ	Число больших магнитных бурь	Числа Вольфа (число пятен)	Индекс Мультип. солн. магн. поля	Число больших событий электр. поля
Параметр ГКЛ	1	0,80	- 0, 85	-0,74	-0,77	-0,76
Интенс. ГКЛ	0,80	1	- 0,89	- 0,87	-0,68	- 0,67
Число больших магнитных бурь	- 0, 85	- 0,89	1	0,86	0,74	0,83
Числа Вольфа (число пятен)	-0,74	- 0,87	0,86	1	0,83	0,59
Индекс Мультип. солн. магн. поля	-0,77	-0,68	0,74	0,83	1	0,61
Число больших событий электр. поля	-0,76	- 0,67	0,83	0,59	0,61	1

Приложение 9.10



Приложение 9.11

Аналитическим сигналом, отображающим вещественный сигнал **s(t)**, называют **обратное преобразование Фурье спектра S(ω)** сигнала **s(t)** только по **положительным** частотам:

$$z_s(t) = (1/\pi) \int_0^{\infty} S(\omega)\ \exp(j\omega t) = \mathrm{Re}\ z(t) + j\cdot \mathrm{Im}\ z(t)$$

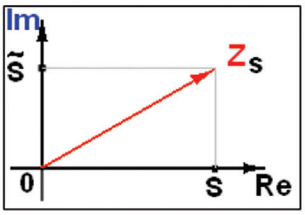
при этом, **реальная** часть аналитического сигнала $z_s(t)$ - равна **самому** сигналу **s(t)**.

мнимая часть аналитического сигнала $z_s(t)$ является **аналитически сопряженной** с его действительной частью Re z(t) = s(t) через преобразование Гильберта:

$$\mathrm{Im}\ z(t) = \tilde{s}(t) = TH[s(t)] = s(t) * hb(t), \quad \text{где } hb(t) = 1/(\pi t) \text{ - оператор Гильберта}$$

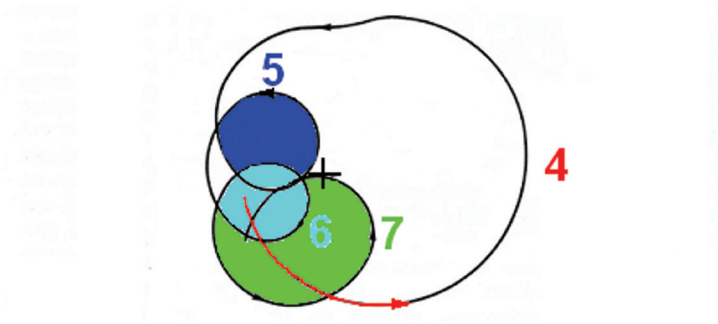
Таким образом, $z_s(t) = s(t) + j\cdot \tilde{s}(t)$, $\quad \tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau}\, d\tau$

где индексом $\tilde{s}(t)$ **обозначен сигнал**, ***аналитически сопряженный*** с сигналом **s(t)**.



На комплексной плоскости Аналитический Сигнал отображается **вектором**, **модуль и фазовый угол** которого изменяются от аргумента, а проекция сигнала на вещественную ось равна значению исходного сигнала **s(t)**. **Аналитический сигнал** представляет собой его **новую математическую модель**.

Приложение 9.12



"Фазовые портреты" 11-летних циклов: 4 - 7.

Куклин Г.В. 1982. Препринт Сиб.ИЗМИР АН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография посвящена изучению групповых свойств космических лучей, т.е. коррелированных флуктуаций или мерцаний космических лучей в окрестности переходных режимов солнечного ветра различных масштабов: в окрестности магнитных «пробок» на ударных волнах и на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

До начала семидесятых годов значимых коррелированных флуктуации космических лучей зарегистрировано не было. Притом, что к тому времени уже имелись теоретические предпосылки к их обнаружению в окрестности ударных волн (Д. Кеннел и Р.З. Сагдеев, 1967; Г.Ф. Крымский, 1969). И только целенаправленный поиск коррелированных флуктуаций космических лучей в окрестности ударных волн, позволил достичь результата. Он был получен с использованием модифицированного спектрально-временного анализа.

Нелокальные свойства замагниченной среды, проявляющиеся в коррелированности флуктуаций космических лучей в окрестности магнитных «пробок» на ударных волнах, могут быть использованы для прогноза ударных волн с заблаговременностью ~1 сутки. А на больших масштабах и… активной фазы солнечного цикла. Так, был дан прогноз максимума нового 24 цикла, с заблаговременностью ~1 оборот Солнца.

На основе мониторинга космических лучей сделан следующий вывод: МАКСИМУМ **спорадической** активности текущего цикла пройден **весной-летом 2012** г. Действительно, в последней декаде июля 2012 г. была зарегистрирована самая мощная ударная волна за весь 24 цикл. В том же 2012 г. регистрируется и наиболее экстремальное значение потока низкоэнергичных протонов. С 2014 на 2015 гг. регистрируется геоэффективная фаза СПАДА текущего цикла. Обе эти геоэффективные фазы уверенно определяются по *наиболее низким* за цикл, значениям параметра флуктуаций космических лучей: в 2012 и 2014 гг. Сделан вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором начала **перестройки** магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

Явно нестационарный характер процессов вблизи ударных волн и на геоэффективных фазах солнечного цикла указывал на необходимость применения методов анализа флуктуаций адекватных изучаемому явлению. Так был обнаружен переходный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца в космических лучах. Параметры процесса переполюсовки оказались связанными с такими характеристиками солнечного цикла, как амплитуда и длительность. В итоге, была предложена гипотеза о возможном существовании инварианта: «амплитуда цикла – длительность переполюсовки» 11-летнего цикла.

При наличии подобного инварианта, из факта *низкой* амплитуды 23 цикла следовало ожидать *увеличения* длительности 23 цикла солнечной активности, что и было подтверждено результатами вейвлет-анализа. Вывод об ожидаемом увеличении длительности 23 цикла подтвердился впоследствии данными прямых измерений параметров солнечного ветра и данными солнечных наблюдений.

Гипотеза о наличии инварианта «амплитуда – длительность» 11-летнего цикла явилась логическим следствием целостного подхода к анализу изучаемых вариаций. Развитие такого подхода было естественно завершить анализом «фазовых портретов» солнечных циклов на комплексной фазовой плоскости. Площадь, заметаемая фазовой траекторией на фазовой плоскости, имеет размерность «фазового объема» или «действия», с размерностью «энергия **x** время». В этом смысле, для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой его *энергоемкости*.

Инвариант с характерным масштабом длительности 22-летнего цикла предполагает постоянство площади заметаемой 22-летним циклом, как это наблюдалось, например, во время «локальных» минимумов: циклы 19-**20** и, возможно, 23-**24**. На основе этого, нами дается предварительный прогноз *восстановления* 11-летней цикличности в *25* цикле (2020-2030 гг.).

В случае нарушения инварианта с характерным масштабом физического 22-летнего цикла, т.е. в случае НЕ восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле (2020-2030 гг.), статус сбоя 23-24-25 циклов изменится с локального на – **глобальный**. В этом случае, сбой 23-24-25 циклов можно будет классифицировать как «*фазовую катастрофу*» (по Г.В. Куклину, 1982) или срыв режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца в современную эпоху – эпоху «Космической эры». Подобно тому, что наблюдалось во время глобальных минимумов Маундера, Дальтона или Глайсберга, со всеми вытекающими отсюда последствиями: многолетнего *повышения* радиационного фона космических лучей высоких энергий и, как следствие – повышение облачности и последующей *интенсификации* конвективных процессов в атмосфере, сопровождающейся увеличением количества осадков и … *понижением* температуры в планетарном масштабе.

В заключение, мы выражаем глубокую благодарность сотруднику Лаборатории теории космической плазмы ИКФИА Плотникову Игорю Яковлевичу за активное участие в анализе данных измерений параметров солнечного ветра, программной реализации и проведение расчетов методом аналитического сигнала на комплексной фазовой плоскости.

Особую признательность выражаем академику Гермогену Филипповичу Крымскому за постоянное внимание и помощь с его стороны в решении различного рода научных проблем, неизбежно возникавших по мере разработки этой интересной, но непростой темы в течение всего периода исследований (1972-2013 гг.).

Авторы благодарны также Илье Усоскину, Университет г. Оулу, геофизическая обсерватория Соданкила (Финляндия, http://cosmicrays.oulu.fi/) за любезно предоставленные 5 минутные кондиционные данные измерений нейтронного монитора.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ответственного редактора 5

ВВЕДЕНИЕ 6

Глава 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ 16
1.1. Актуальность проблемы прогноза Космической погоды 16
1.2. Принцип теле-видения космических «целей» 16
1.3. Коррелированные флуктуации космических лучей как индикатор состояния Космической Погоды 18
Литература к главе 1 19

Глава 2. ПРОБЛЕМА ИЗУЧЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ 21
2.1 Особенности поведения флуктуаций космических лучей в окрестности ударной волны. 21
2.2. Постановка задачи исследования коррелированных флуктуаций космических лучей 22
2.3. О флуктуациях интенсивности космических лучей по данным нейтронных мониторов 23
Литература к главе 2 28

Глава 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ. 33
3.1. Метод корреляционно-спектрального анализа 33
3.2. Нелинейная фильтрация случайной компоненты. 34
3.3. Модификация спектрально-временного анализа 36
3.4. Степень частичной детерминированности как вероятность . . . 38
3.5 Степень детерминированности процесса по оценке его корреляционной размерности 44
Литература к главе 3 52

Глава 4. ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ 54
4.1. Результаты спектрально-временного анализа 54
4.2. Возможные источники наблюдаемой динамики 60
4.3. Совместный анализ флуктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля. 64
4.4. Структура ударных волн и распространение солнечных космических лучей 67
4.5. О механизме образования макро- и тонкой структуры эффекта Форбуша. 72
Литература к главе 4 73

Глава 5. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ . . . 77
5.1 Средние характеристики частотного спектра флуктуаций 77
5.2 Введение спектрально-временного индекса мерцаний 79
5.3 Количественное описание динамики частотного спектра флуктуаций 81
5.4 Обнаружение структурной перестройки гелиосферного токового слоя в активный период 84
5.5. Масштабно-инвариантные свойства динамики флуктуаций космических лучей 90
Литература к главе 5 96

Глава 6. СКЕЙЛИНГОВЫЕ СВОЙСТВА ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ В ОКРЕСТНОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА . . . 100
6.1. Скейлинговые свойства динамики флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла 100
6.2. Количественная оценка скейлинговых свойств наблюдаемой динамики 107
6.3. Обнаружение переходного колебательного процесса переполюсовки общего магнитного поля Солнца. 111
Литература к главе 6 116

Глава 7. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОГНОЗУ УДАРНЫХ ВОЛН НА БАЗЕ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 120
7.1. Космическая погода в Арктике 120
7.2. Создание автоматизированной системы раннего обнаружения ударных волн на базе мониторинга космических лучей 124
7.3 Результаты первого эксперимента по прогнозу Космической погоды 126
Литература к главе 7 131

Глава 8. «ЗАГОРИЗОНТНОЕ» ОБНАРУЖЕНИЕ ГЕОЭФФЕКТИВНОГО ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ «ГАЛО» В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ. 132
8.1 Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходных режимах солнечного ветра 132
8.2. Экспертная система раннего обнаружения межпланетных ударных волн «Cyber-FORSHOCK» 138
8.3. Выявление предвестника ударных волн методом «наложения эпох» по ансамблю событий 140
8.4. Проявление динамики осцилляций гелиосферного токового слоя в космических лучах 144
8.5. «Загоризонтное» обнаружение геоэффективного источника активности на Солнце по эффекту «гало» в космических лучах . . 150
8.6. Нелокальные свойства космических лучей. 157

8.7. Увеличение надежности прогноза ударных волн по данным мировой сети полярных станций 168
Литература к главе 8 173
ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 8 175

Глава 9. АРИТМИЯ СОЛНЦА В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ 178
9.1. Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на активной фазе солнечного цикла 178
9.2. Идентификация переходного режима к активной фазе солнечного цикла по космическим лучам 179
9.3. Инвариант «амплитуда цикла – длительность переполюсовки» 11-летнего цикла. 184
9.4. Особенности процесса переполюсовки в новом 24 цикле. 187
9.5. Параметр флуктуаций космических лучей как индикатор степени турбулентности магнитного поля. 189
9.6. Эффект увеличения длительности 23 цикла в космических лучах. 193
9.7. Предвестник сбоя 11-летней цикличности Солнца в космических лучах на языке «фазовых портретов» 197
9.8. Инвариант с характерным масштабом 22-летнего цикла 198
9.9. «Фазовая катастрофа» 11-летней цикличности – как нарушение инварианта 22-летнего цикла. 200
9.10. Последствия затяжного спада активности Солнца в современную эпоху 201
Литература к главе 9 204
ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 9 207

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 213

Валерий Игнатьевич Козлов
Вячеслав Валерьевич Козлов

АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах.

Монография издается в авторской редакции.

ИД 05324 от 09 июля 2001 г.
Формат 70х100 1/16.
Бумага писчая № 1. Усл. печ. л. 17,7. Уч.-изд. л. 13,0.
Тираж 50 экз. Заказ № .

Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения СО РАН.
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН.