

Институт космических исследований и астрономии  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН

В. И. Козлов, В. В. Козлов

# **АРИТМИЯ СОЛНЦА.**

## **В космических лучах**

4-е издание, переработанное и дополненное

Ответственный редактор  
академик Г. Ф. Крымский

Издательство ФГБУН ИМЗ СО РАН  
г. Якутск  
2019

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. – 4-е изд., перераб. и доп. – Якутск : Изд-во ФГБУН Ин-т  
мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2019. – 214 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 фрактальные 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-летней цикличности. Сейчас, это свершившийся факт.

С целью описания локальных и глобальных сбоев 11-летней цикличности с единой позиции, введен Инвариант с характерным масштабом длительности 22-летнего цикла, что предполагает консервативность системы в широком смысле, т.е. постоянство площади (энергоемкости) 22-летнего цикла. На основе чего дан предварительный прогноз восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле (2020–2030 гг.).

Нарушение инварианта 22-летнего цикла (в случае невозможности 11-летней цикличности в 25 цикле) явится указанием на нарушение консервативности системы: на относительно пониженный уровень светимости Солнца, как характеристики энергоемкости и, как следствие – на срыв режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности: многолетнее повышение радиационного фона космических лучей высоких энергий и, соответственно – повышение облачности и последующей интенсификации конвективных 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 (обновленной и дополненной) 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 аэронауки (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 астрономии (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 Геокозмософизической 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 г. – «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 ( $\approx 300$  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 ожидалось 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 Игнатъевич 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: мелко-масштабного 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, вспышкам 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  $\alpha$ , 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 (СМЕ) 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 поэтому наиболее опасного радиационного и электромагнитного шторма по флуктуациям космических лучей более чем в 10 раз ( $\approx 1$  сутки) больше заблаговременности, достигаемой на космическом аппарате ( $\approx 15$  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  $\sim 1$  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 “окрашенными”. 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 целесообразно 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 регистрировать 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  $f^\mu$  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  $\sim 100$  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 ионизирующей 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 г. 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  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  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  $10^{-4}$ –1 Гц. По мнению авторов работ /53–55/, МГД-волны эффективно модулируют интенсивность ГКЛ с энергией  $\varepsilon = 1$ –10 ГэВ, в результате чего следует ожидать существенного изменения спектра микровариаций ГКЛ, регистрируемых нейтронными мониторами в интервале  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  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  $\tau = 10$  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 ( $\sim 1$  МэВ) частиц вызывают наблюдаемую модуляцию интенсивности галактических космических лучей высокой энергии ( $\geq 1$  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  $\sim 1$  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  $\sim 1$  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 аэронауке. 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. Propagation 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. *Dynamical 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 диссертации. Изд. ИЗМИРАН. М. 1979.
25. Новиков А.М., Старина В.А., Скрыбин Н.Г. *Регистрация спектров временных вариаций интенсивности космических лучей и атмосферного давления.* // *Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэронауки.* Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1984. С.3-6.
26. Новиков А.М., Старина В.А., Скрыбин Н.Г. и др. *Пульсации космических лучей и атмосферного давления вблизи периодов 160 и 180 мин.* // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1985. Т.25. №3. 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 аэронаука.* 1984. Т.24. №4. С.682-683.
30. Стародубцев С.А. *Динамика спектров флуктуаций космических лучей перед протонными вспышками и форбуш-понижениями.* // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1985. Т.25. №6. С.997-1000.
31. Блох Я.Л., Либин И.Я., Юдахин К.Ф. *Флуктуации космических лучей на Земле во время солнечных вспышек.* // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1984. Т.24. №6. 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 аэронаука.* 1984. Т.24. №4. С.557-565.
33. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. *Флуктуационные характеристики ММП в диапазоне  $3 \times 10^{-4}$ - $10^{-2}$  Гц.* // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1985. Т.25. №6. 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 интенсивности 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 Геокозмософизической Обсерватории Тукси. // *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 Flux 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. *Propagation 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 аэрномия. 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 аэрномия. Т.26. N2. 1986. С.204-208.*
53. Berezhko E.G., Kozlov V.I., Kuzmin A.I. et al. *Cosmic Ray Intensity Micropulsations Associated 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 аэрномия. 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/:

$$y_i = \sum_{j=-m}^m h_j x_{i+j}; \quad h_j = \delta_{0j} - \left(1/2(m+1)\right) \cdot \left(1 + \cos j\pi / (m+1)\right);$$
$$\delta_{0j} = 0, \text{ при } j \neq 0;$$
$$\delta_{0j} = 1, \text{ при } j = 0;$$

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  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Оценка автокорреляционной функции процесса по данной реализации имеет вид:

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

где  $M < N$ .

Оценка спектральной плотности процесса выражается формулой /3/:

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

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;  $\chi^2$  – выбирается по числу степеней свободы  $\gamma$ ;  $n = N - m$  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  $\omega_0$ ) 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 корреляционного 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  $\sigma$ .

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:

$$\alpha'_x \leq (8\alpha_x / S) \cdot (1 + \alpha_x / 8),$$

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

$$\alpha'_x \ll \alpha_x.$$

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

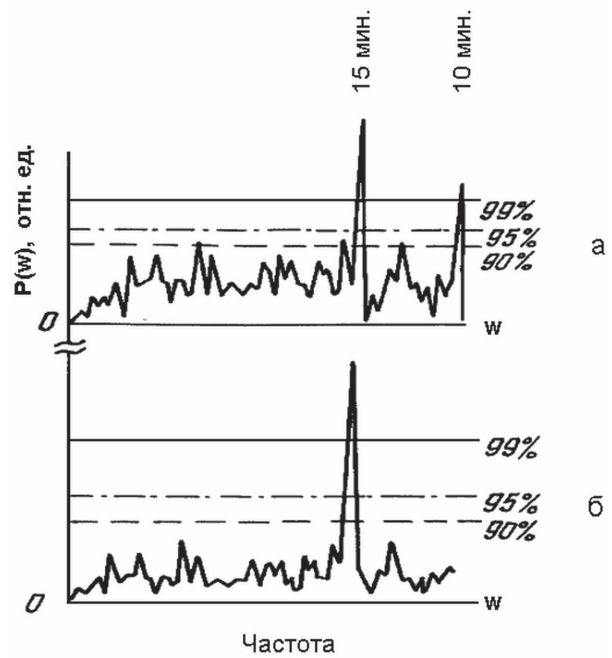
$$A = 2,3 \times P_s \text{ – для 90\% доверительного уровня } (N = \tau),$$

$$B = 3 \times P_s \text{ – для 95\% --- // ---,}$$

$$C = 4,6 \times P_s \text{ – для 99\% --- // ---,}$$

где  $P_s = 4\sigma^2/N$  – уровень шума,  $\sigma$  – 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/:

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

здесь  $t$  – время;  $\omega$  – 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:

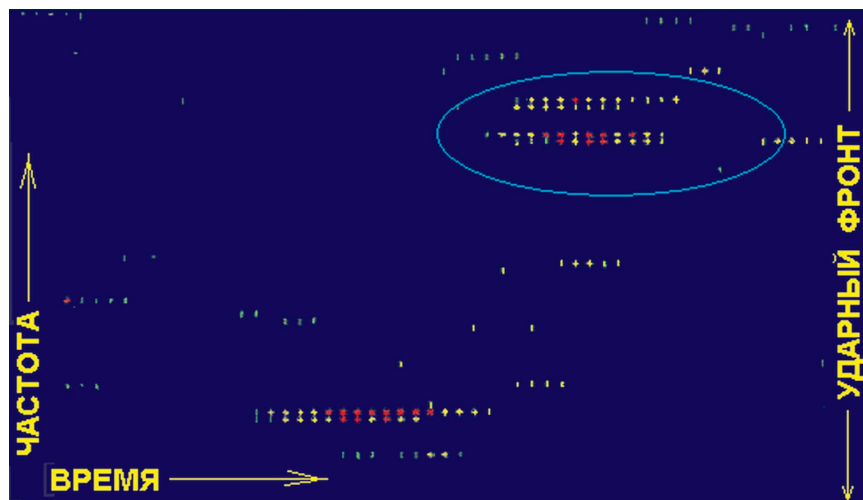
$$H = H[(\lambda - \omega_i) / \omega_i],$$

задаваемых формулой:

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

где параметр  $\alpha$  управляет разрешением по времени и частоте. Совокупность значений амплитуд  $\lg Y(\omega_i, t)$  и дает двумерное представление сигнала на плоскости  $(\omega, t)$ . 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  $I(N)$  при  $N \rightarrow \infty$  остается конечной, т.е. если  $I(N)/N \rightarrow 0$ , при  $N \rightarrow \infty$ , 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  $N \rightarrow \infty$ .

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  $\tau_{max} < \tau_{пред}$ ;

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 детерминированности 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  $\langle y(t)z(t) \rangle$ , 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  $\varepsilon$ . Определим операцию сравнения  $\langle yz \rangle$ , как число  $\varepsilon$ -совпадений между  $y$  и  $z$  в пределах коридора шириной  $\varepsilon$ . 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  $\varepsilon$ -совпадений  $n_A(\tau)$  на интервале  $[t^0, t^0 + n\Delta t]$  выразится суммой:

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

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  $\varepsilon$ , 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  $\varepsilon$ -окрестности фиксированной величины  $z^*$ :

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

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:

$$z_s = z(t_s) = z(t^0 + s\Delta t),$$

в процессе сравнения могут меняться вместе с изменением наблюдаемой величины  $y_s = y(t_s) = y(t^0 + s\Delta t)$ . 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  $\tau_{\text{lim}}$ : при  $\tau > \tau_{\text{lim}}$  наступает полная непредсказуемость поведения системы ( $R \rightarrow 0$ ) 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 вычестить (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  $\tau > \tau_{\text{det}}$ , тогда как при  $\tau < \tau_{\text{det}}$  он хотя бы частично предсказуем и в этом смысле перестает быть шумом. В интервале  $\tau_{\text{corr}} \leq \tau \leq \tau_{\text{det}}$  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  $y(t_0 + \tau) \approx y(t_0)$ , 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  $\tau_{\text{det}}$ . 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  $\tau_{\text{corr}} < \tau < \tau_{\text{det}}$  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 (корреляционного, спектрального) обычно затруднительно что либо сказать о породившем его источнике. В частности, является ли сигнал шумовым в обычном смысле (т.е. невозпроизводимым 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 удастся 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 ( $d \rightarrow \infty$ ) 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  $t, t+\tau, \dots, t+k\tau, t+(n-1)\tau$ . 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  $\tau$  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  $x_o(t_i), \dots, x_{n-1}(t_i + (n-1)\tau)$ . 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:

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

где  $\theta$  – функция Хевисайда:

$$\theta(x) = 0 \text{ при } x < 0$$

$$\theta(x) = 1 \text{ при } x > 0.$$

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  $\varepsilon$  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  $n$ .

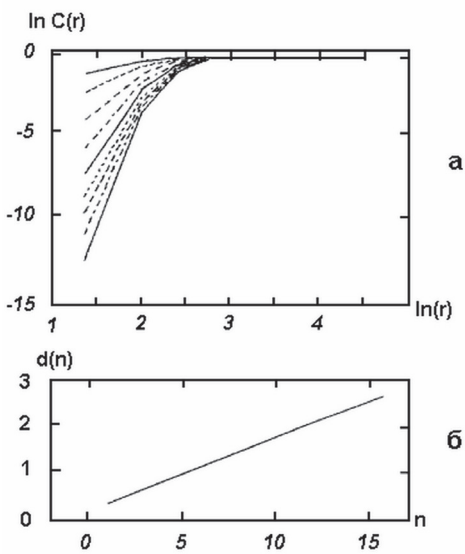
2. Получить наклон  $d$  вблизи начала координат для всех  $C_n(r)$  и определить как этот результат изменяется с увеличением  $n$ , т.е. найти зависимость  $d(n)$ .

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 данному аттрактору размерности  $d'$ .

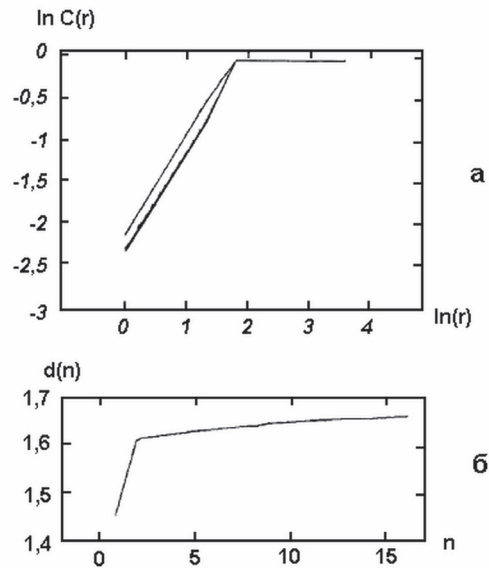
Ниже, представлены результаты контрольного расчета по определению корреляционной размерности временного ряда чисел полученного на выходе генератора пуассоновского распределения. Тестовая проверка на качество генерации сначала статистическими методами показала, что данный числовой ряд соответствует распределению 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 противоречивых 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:

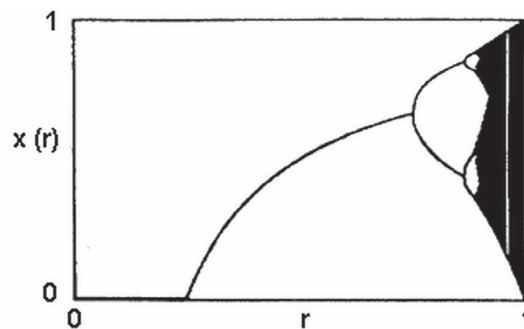
$$x_{n+1} = 4rx_n(1 - x_n),$$

при условии  $0 \leq x \leq 1$  и  $0 \leq r \leq 1$ , 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  $0,6 \leq r \leq 0,75$  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  $r \geq 0,75$ , 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.

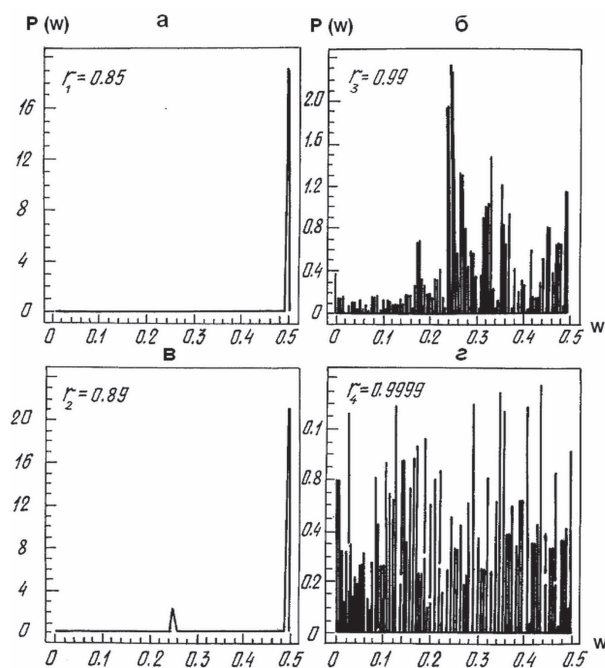
Спектральные характеристики числа состояний для 2 бифуркаций и далее, при



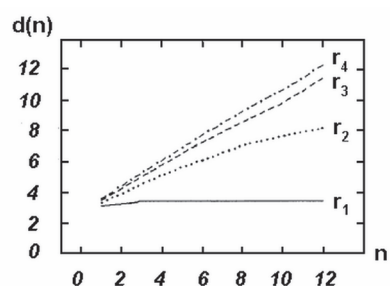
**Рис. 3.5. Эволюция развитой турбулентности по сценарию Фейгенбаума: для достаточно малого значения параметра  $r$  итерации  $x_n$  сходятся к  $x = 0$  независимо от начального условия  $x_0$ . При значениях параметра  $0,6 \leq r \leq 0,75$  имеется одно устойчивое решение, т.е. динамический режим является стационарным (бифуркации отсутствуют). Если управляющий параметр  $r \geq 0,75$ , 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.**

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 пуассоновского 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 пуассоновского 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. №8. 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. №8. 1967. С. 285-304.*
4. Любарский А.Н. *Методы исследования статистической и частотно-временной структур гелиогеофизических и гидрометеорологических характеристик. // Обзорная информация 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. Часть 1, 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

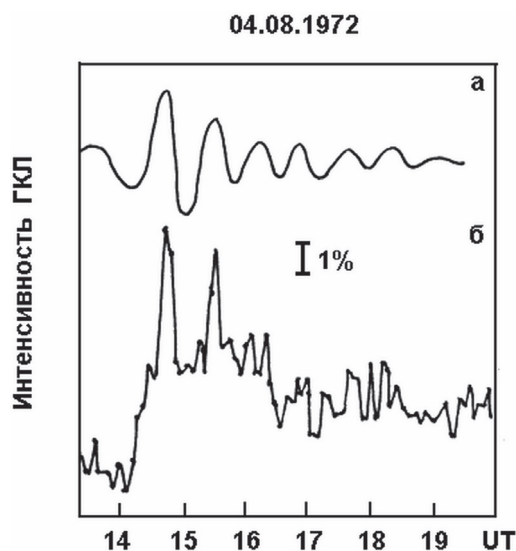


Рис. 4.1. Пример коррелированных флуктуаций во время вспышки 4 августа 1972 г. – (а). Исходные значения интенсивности галактических космических лучей по 5-минутным данным б. Тикси – (б). По оси абсцисс – мировое время в часах.

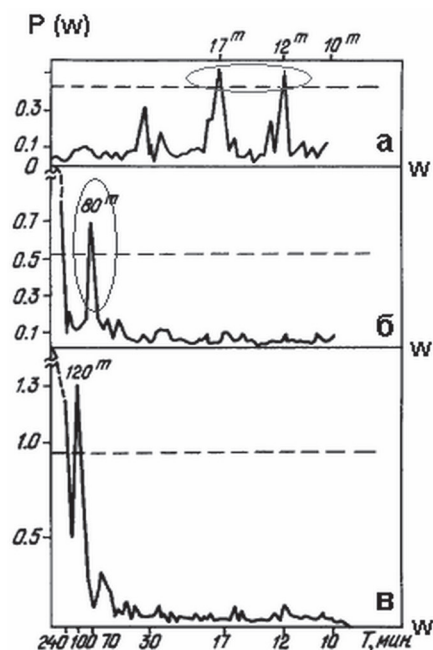
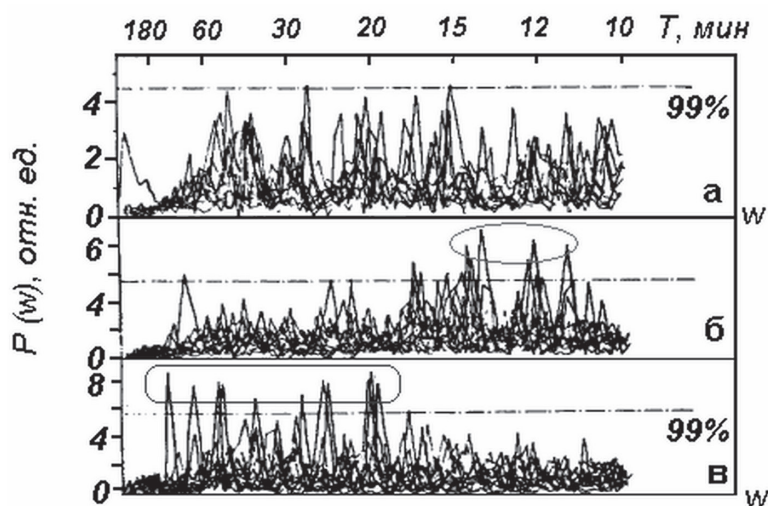


Рис. 4.2. Динамика спектра флуктуаций интенсивности галактических космических лучей в событии 3–5 августа 1972 г. по 5-мин. данным б. Тикси. По оси ординат – мощность спектра флуктуаций в относительных единицах. По оси абсцисс – периоды вариаций в минутах. В верхней части рисунка – спектр мощности за 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.

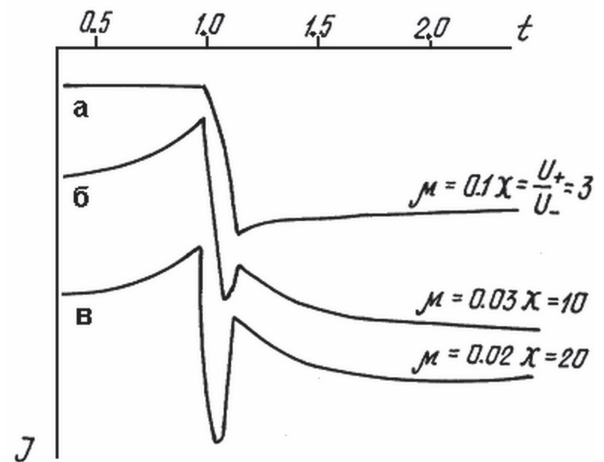
рисунка приведена шкала периодов флуктуаций. Пунктирной линией нанесен 99% доверительный уровень. Сверху вниз приведены спектры мощности за 3, 4 и 5 августа, соответственно. Динамика спектра высокочастотных флуктуаций ГКЛ наиболее выражена во время анизотропного предповышения интенсивности ГКЛ с 3 на 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 двухфронтная 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.

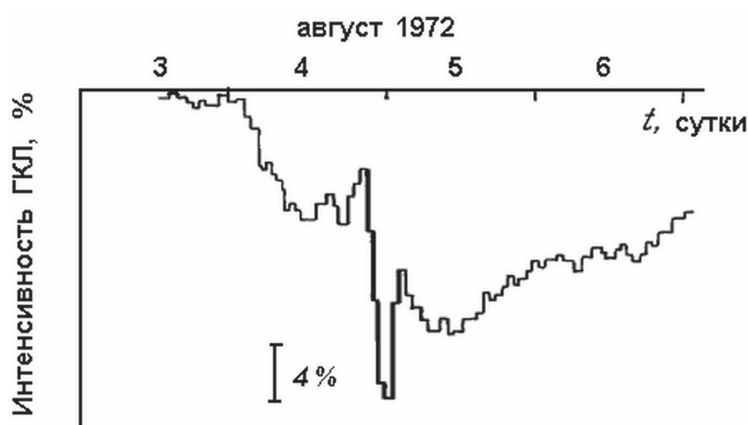
На рис. 4.4 в произвольном масштабе показаны примеры поведения рассчитанной интенсивности космических лучей при прохождении поршневой ударной волны [3]. Верхняя кривая соответствует случаю сферической симметрии, а две нижние – относятся к асимметричному выбросу газа из Солнца. Изломы кривых соответствуют 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  $\mu$  [3].



**Рис. 4.4. Двухступенчатый профиль эфф. Форбуша образованный прохождением поршневой ударной волны. Верхняя кривая соответствует случаю сферической симметрии, две нижние – случаи асимметричного 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  $\mu$  [3].**

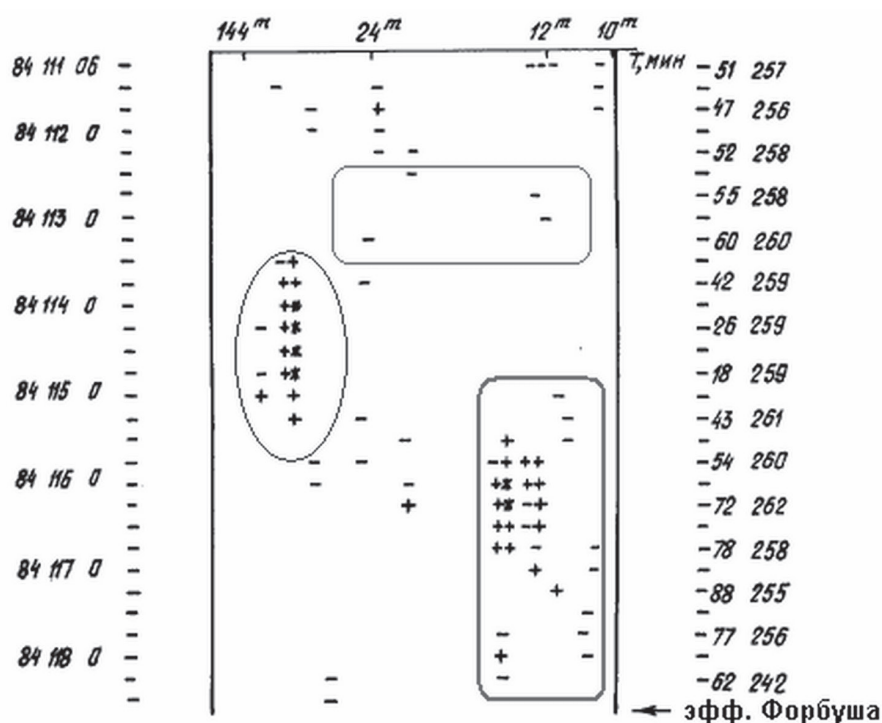
наблюдаемые на фронтах, связаны с «нагребанием» космических лучей к фронту. Понижение между фронтами связано с расширением вещества, которое хотя и мало, но эффективно благодаря малой величине коэффициента диффузии.

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 Геокозмософизической 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. Сванограмма 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 сванограммы 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

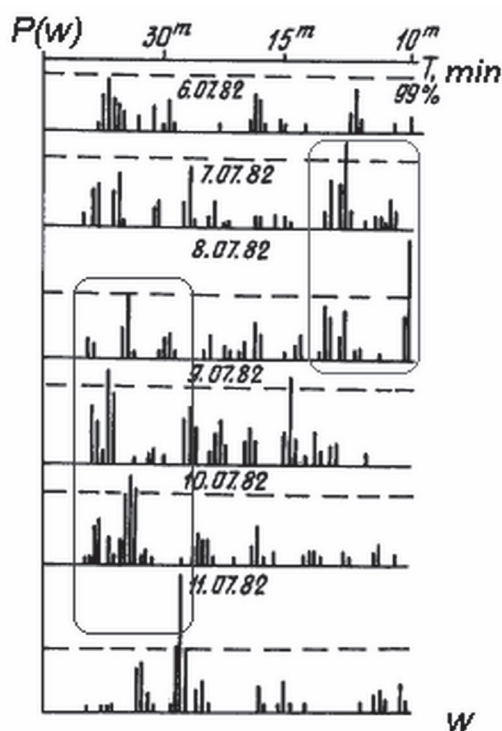
виде строки символов значимости амплитуд. Наличие пробела указывает на отсутствие амплитуд с уровнем значимости, превышающим 90%. Знак минус отражает наличие амплитуд в интервале значимостей  $90\% < P < 95\%$ , плюс – в интервале  $95\% < P < 99\%$ . Звездочка соответствует уровню значимости  $P > 99\%$ . 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  $90\% < A < 95\%$  (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.



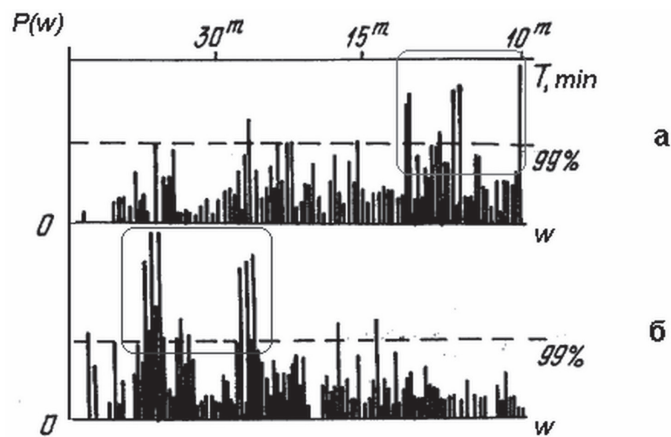
В дальнейшем, данные прямых измерений параметров солнечного ветра подтвердили факт прохождения 21–27 апреля орбиты Земли крупномасштабного возмущения. Так с 21 на 22 апреля было зарегистрировано увеличение скорости солнечного ветра до 500-600 км/с. С 24 на 25 апреля наблюдалось радиоизлучение II типа 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**

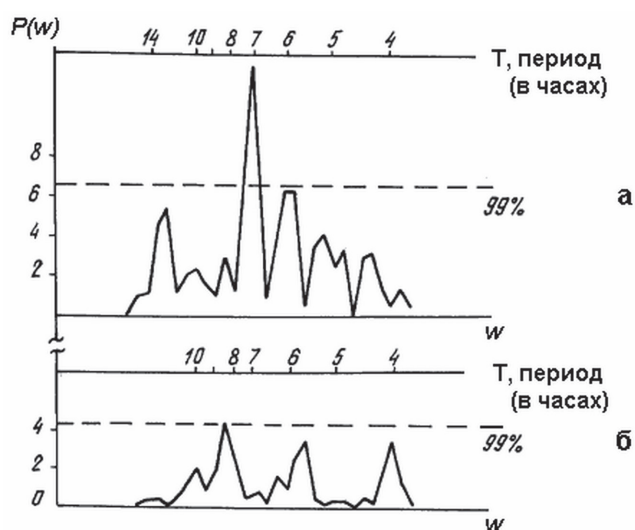


**Рис. 4.8.** Динамика кросс-спектров отдельно за те сутки, когда были зарегистрированы флуктуации интенсивности ГКЛ в течение суток до начала эфф. Форбуша (а) и кросс-спектры во время форбуш-понижений. По оси ординат – взаимная спектральная плотность в относительных единицах, по оси абсцисс (в верхней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

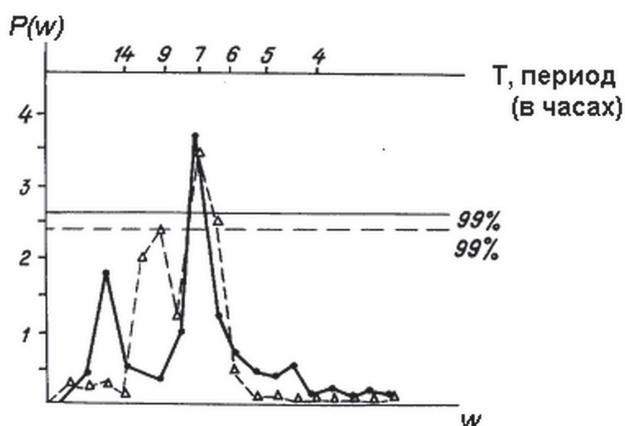
#### 4.2. Возможные источники наблюдаемой динамики.

Для решения вопроса о происхождении коррелированных флуктуаций ГКЛ наблюдаемых во время эффектов 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. рассчитанный 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  $T \approx 7$ ч наблюдаемая с 4 на 5 августа. Взаимный спектр мощности флуктуаций по данным этих же станций за период с 6-15 августа показан на рис. 4.9б. 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  $T \approx 7$ час. Достоверность наличия семичасовой осцилляции подтверждена нами независимым расчетом, проведенным методом теории цепных дробей /13/.



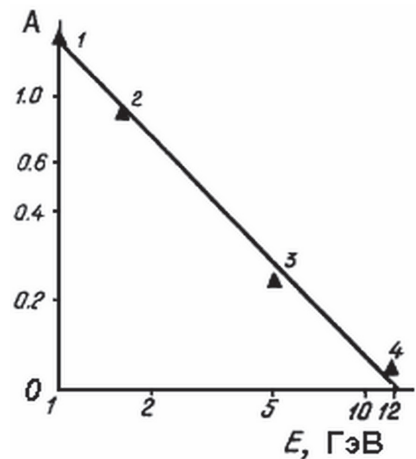
**Рис. 4.9.** Спектр мощности флуктуаций космических лучей с 1–15.08.72 г. рассчитанный по кросс-корреляционной функции часовых данных нейтронных мониторов б. Тикси и ст. Иркутск. В спектре мощности доминирует гигантская пульсация интенсивности ГКЛ с периодом  $T \approx 7$  ч наблюдаемая с 4 на 5 августа. 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 среднеширотных 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  $A(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-1}$ .

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. 4.11. 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**

13 - 21 июля 1982 г.

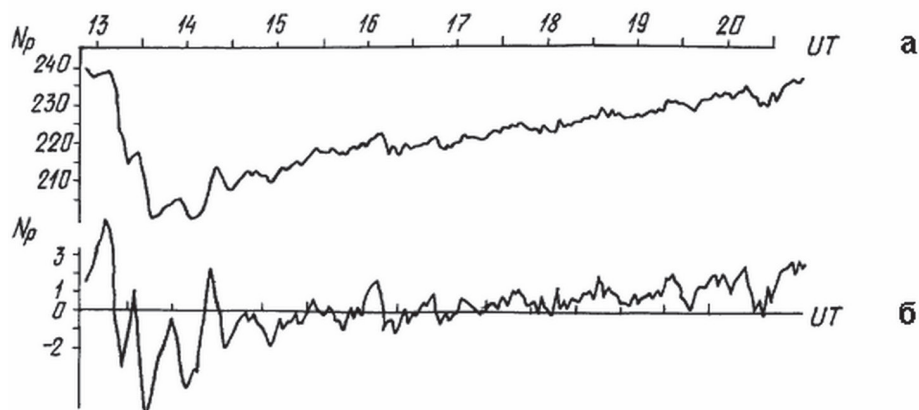


Рис. 4.12. Гигантские пульсации интенсивности космических лучей с периодом  $T \approx 10$  час. по данным якутского подземного (а) и наземного (б) комплекса в событии 13–14 июля 1982 г. /14/. С уменьшением энергии измеряемых частиц, амплитуда пульсаций увеличивается

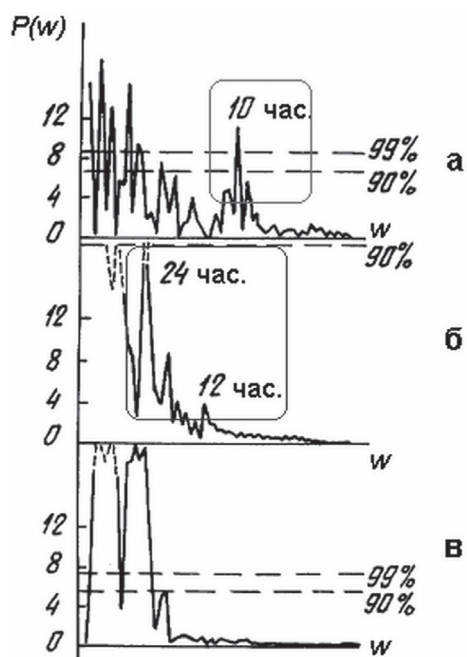
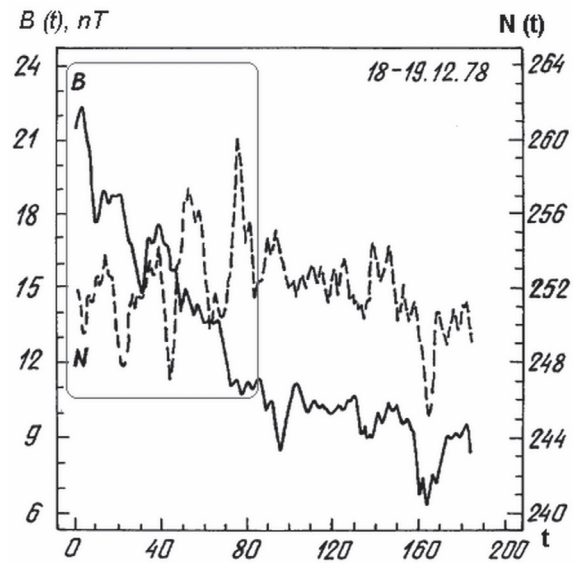


Рис. 4.13. Результаты кросс-спектрального анализа вариаций интенсивности космических лучей и атмосферного давления для 10 часовой пульсации в событии 13–15 июля 1982 г.

### 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. Анализируются 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



**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**

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).

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



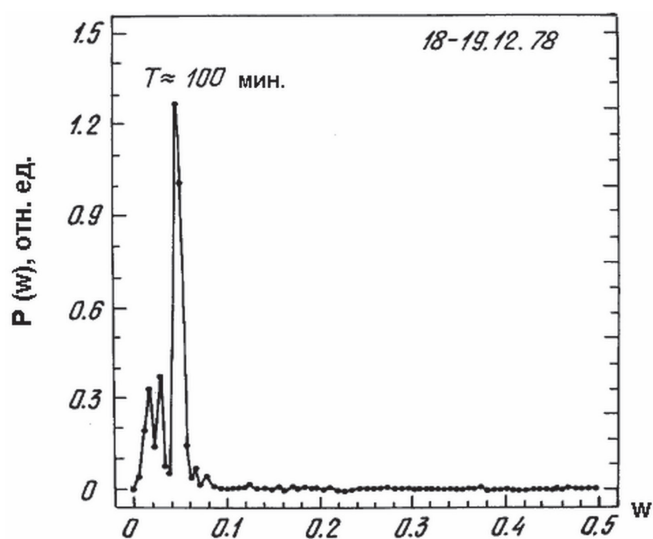


Рис. 4.15. Результаты совместного корреляционно-спектрального анализа флуктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля в событии 18-19 декабря 1978 г. По оси ординат – кросс-спектр мощности в относительных единицах, по оси абсцисс – частота флуктуаций. Общей, для обоих анализируемых параметров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

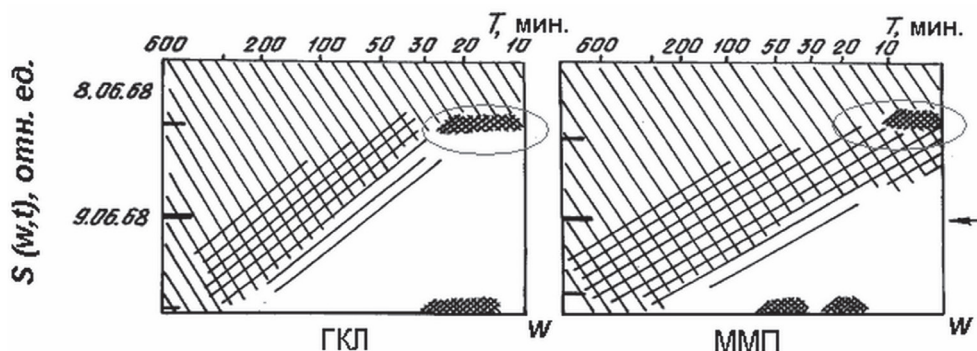


Рис. 4.16. Результаты спектрально-временного анализа (СВАН) флуктуаций интенсивности космических лучей и напряженности межпланетного магнитного поля в событии 8–10 июня 1968 г. По оси абсцисс (в верхней части рисунка) – периоды флуктуаций в минутах, по оси ординат – время. Относительные амплитуды флуктуаций 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, происходит 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  $4 \times 10^{-4}$ - $1,6 \times 10^{-2}$  Гц ( $1^m < T < 1^h$ ). Спектры представлены законом  $f^\alpha$ . Анализ показателя наклона спектра  $\alpha$  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  $\alpha$  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 укрупнению 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.**

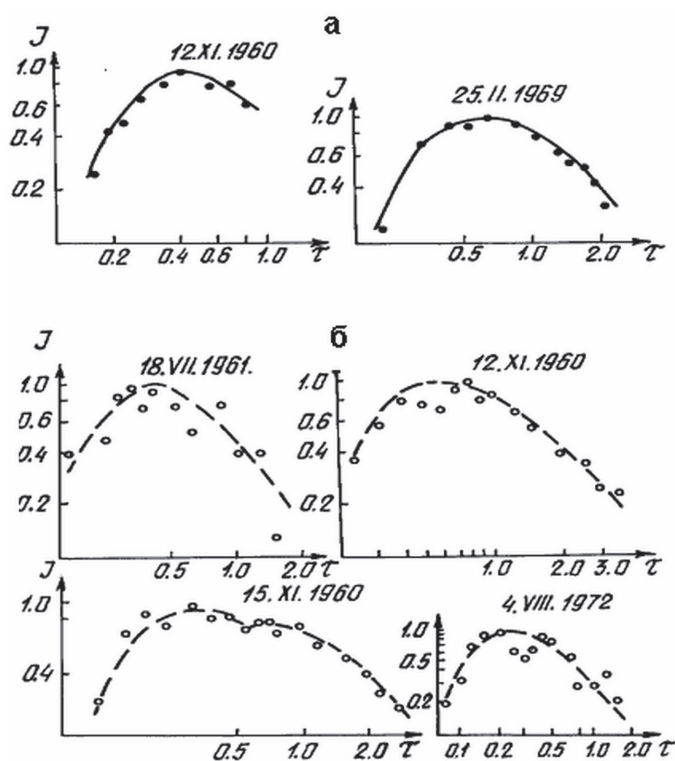
На основе анализа временных зависимостей интенсивности протонов во вспышках СКЛ можно судить о свойствах межпланетного поля

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. 4.17б). 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/).

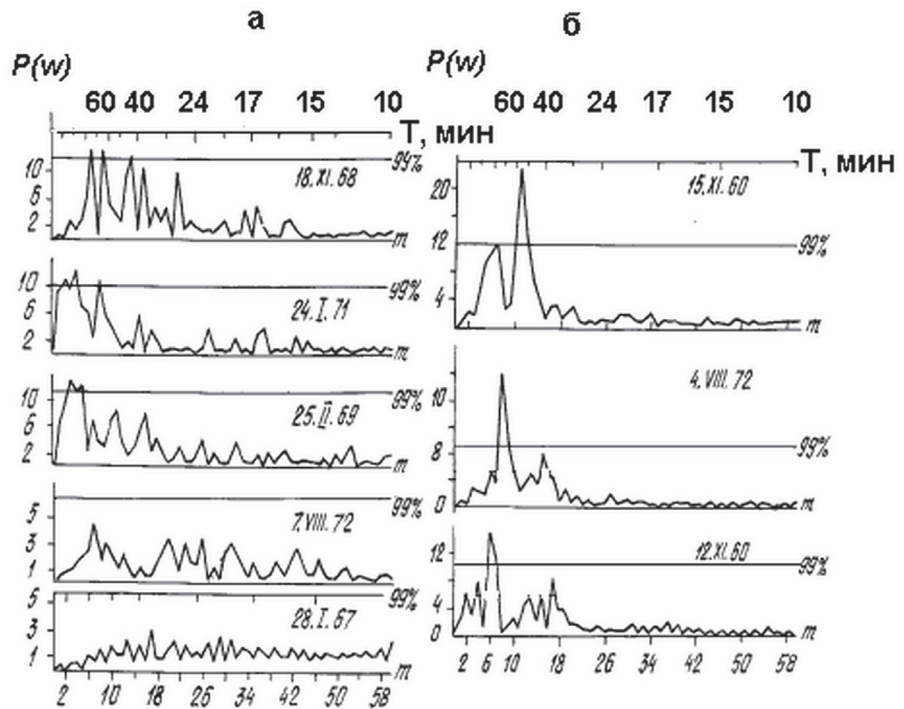
Характерно, что вспышки обладающие спектрами II класса (наличие выделенных частот) плохо описываются в диффузионном приближении. И наоборот, вспышки, характеризующиеся широким диапазоном частот, описываются диффузионными кривыми достаточно хорошо. Вышеизложенное позволяет заключить, что искажение диффузионного 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



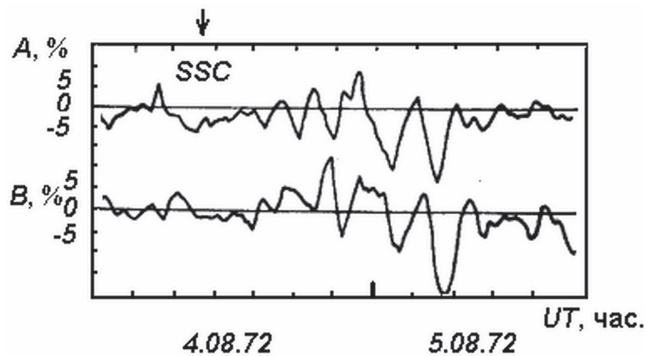
**Рис. 4.17.** Пример удовлетворительного описания моделью анизотропной диффузии вспышек первой группы 12.11.60 (первый максимум) и 25.02.69, показан в верхней части рисунка (а). Результат неудовлетворительного описания (б) той же моделью анизотропной диффузии вспышек второй группы: 12.11.60 (2 максимум), 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  $\sim 1$  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  $T \approx 100$  и 35 мин, 15.11.60 г. –  $T \approx 55$  мин, 4.08.72 г. –  $T \approx 70-80$  мин**



**Рис. 4.19. Осцилляторный характер структуры возмущения в событии 4–5 августа 1972 г. по результатам анализа поведения компонент тока (А и В) 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 ( $\approx 7$  мин) по сравнению с ранее наблюдаемыми вспышками /29/. Отличительными особенностями возрастания вспышки 04.05.60 г., отмечается в /29/, является малая продолжительность ( $\approx 1$  час) явления и резкая анизотропия потока частиц. Это показывает, что в окрестности Земли частицы почти не подвергались рассеиванию. Сдвиг направления максимальной интенсивности на  $55 \pm 5^\circ$  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 отсутствие 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 аппаратах /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 аэронауке. 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. №6. 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. №11. 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 аэронауки. 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 аэронауки. 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 аэронауки. 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 аэронауки. 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. №6. 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 аэрномия. 1991. Т.31. №4. 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 аэрномии. 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 аэрномии. 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 аэрномия. 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. // Распределение 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 аэрномия. 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 аэрномия. 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

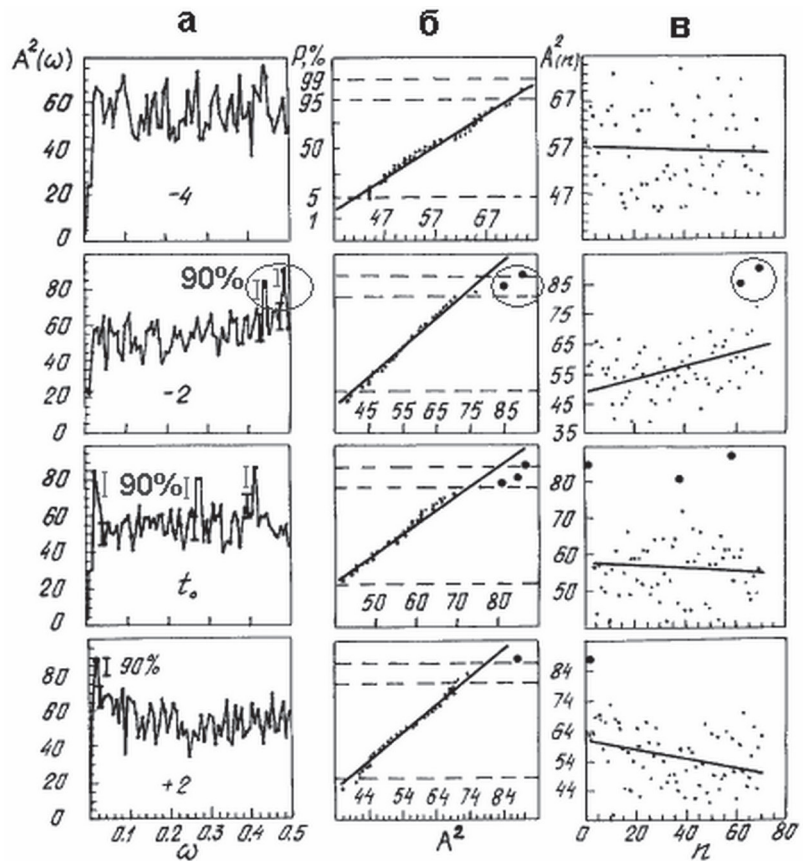
### 5.1 Средние характеристики частотного спектра флуктуаций.

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  $t_0$  выбран день начала форбуш-понижений интенсивности ГКЛ. Спектры мощности рассчитывались для каждого из 11 событий за 14 дней до и 5 дней после дня  $t_0$ . Далее, среднесуточные спектры суммировались и усреднялись по 11 событиям. На рис. 5.1а слева приведены в относительных единицах усредненные таким образом частотные спектры флуктуаций ГКЛ за «-4», «-2», « $t_0$ » и «+2» дни. По оси  $\omega$  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  $t_0$  спектр практически плоский, то в «-2» день увеличена мощность высокочастотного участка спектра. В день  $t_0$  происходит 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»,  $t_0$  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 мощностей флуктуаций космических лучей в 11 событиях ударных волн 1978–1982 гг. методом наложения эпох относительно «нулевого» дня  $t_0$  – день регистрации ударной волны. Приведены средние (по 11 событиям) спектры мощностей за «-4», «-2», « $t_0$ » и «+2» дни, соответственно (а). По оси  $\omega$  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 мощностей, 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»,  $t_0$  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  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – амплитудный спектр. С целью вычисления инверсионного индекса число инверсий для начала полагаем  $I = 0$ . Далее, сравниваем  $A_i$  с  $A_{i+1}$ , где  $i = 1, 2, \dots, N-1$ ; 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:

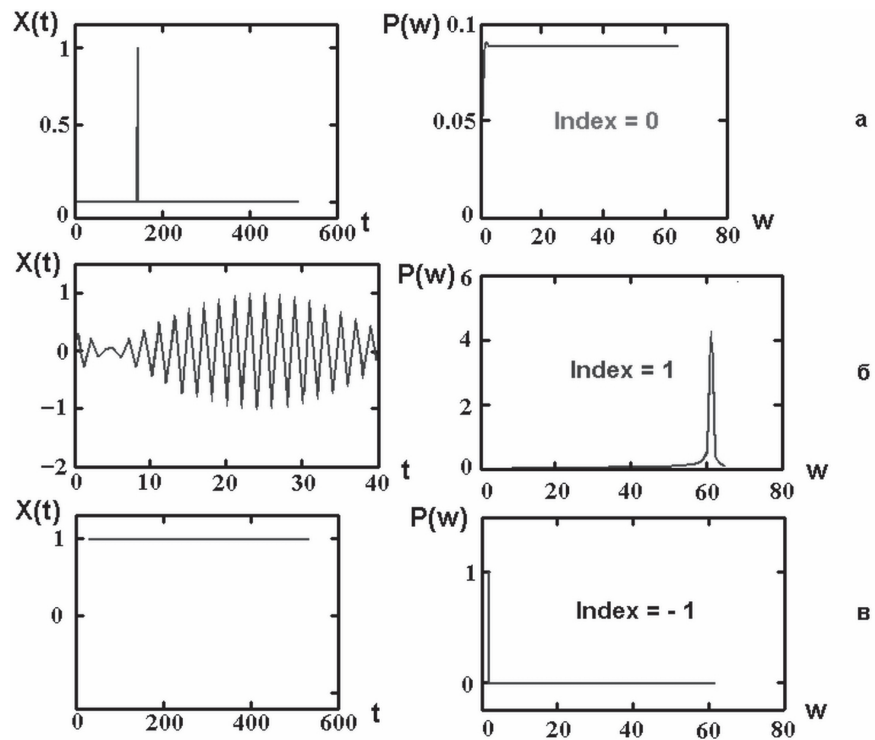
$$I_{max} = C_n^2 = N! / 2!(N-2)! .$$

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:

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

Из этого выражения следует, что при  $I_{min} = 0$ ,  $\mu_{min} = -1$ , при  $I = I_{max}$   $\mu_{max} = 1$ , т.е.  $\mu_i$ -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 гармоник 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  $\mu_{min} = -1$**

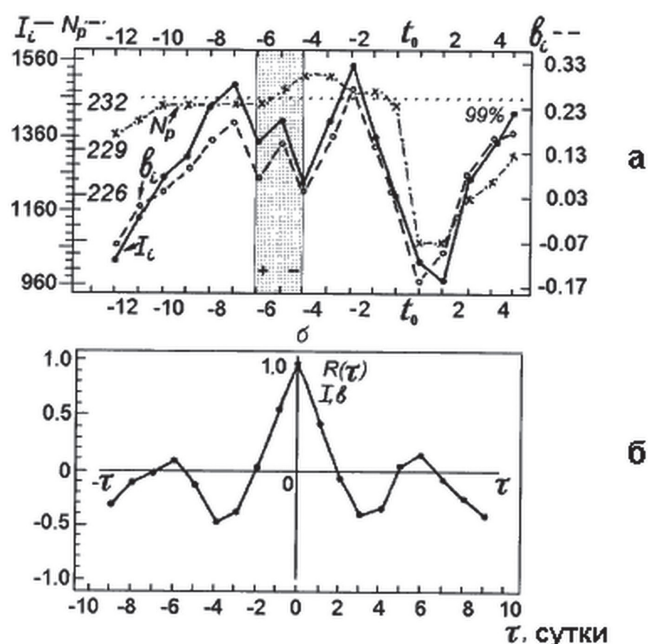
идеальный случай соответствует максимально возможному значению спектрального индекса мерцаний  $\mu_{max} = 1$ . Предельный случай минимально возможного значения индекса мерцаний соответствует спектру мощности, взятому от «константы» (нижняя часть рис. 5.2). В этом (альтернативном предыдущему) случае, в спектре мощности доминирует гармоника на «нулевой» частоте, индекс мерцаний которой минимален и равен  $\mu_{min} = -1$ . Таким образом, для реальных спектров  $\mu_i$ -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  $T \approx 4 \pm 1$  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 ( $\mu_i$ ) 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  $\sigma_B$ ,  $B_z$ -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  $t_0$ .

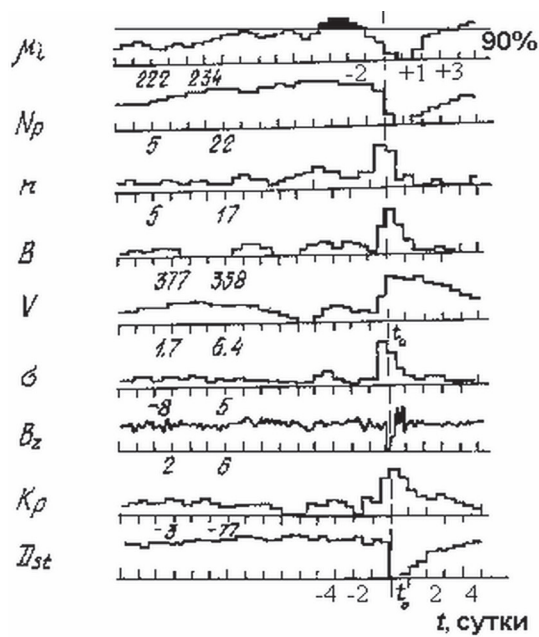


**Рис. 5.3.** Метод наложения эпох для среднесуточных значений индекса мерцаний космических лучей, относительно того же «нулевого» дня « $t_0$ ». В верхней части рисунка (а), проведено сопоставление спектральных индексов мерцаний  $I_i$  космических лучей с показателями наклона  $b_i$  спектров (пунктирная кривая) и интенсивности космических лучей  $N$  для каждого (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  $\sigma_B$ , 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  $\mu_i$  с анализируемыми параметрами видно, что максимум индекса мерцаний наблюдаемый в «-2» день регистрируется уже в достаточно возмущенных условиях ( $n \approx 10 \text{ см}^{-3}$ ,  $B \approx 10 \text{ нТл}$  и  $V \approx 400 \text{ км/с}$ ).

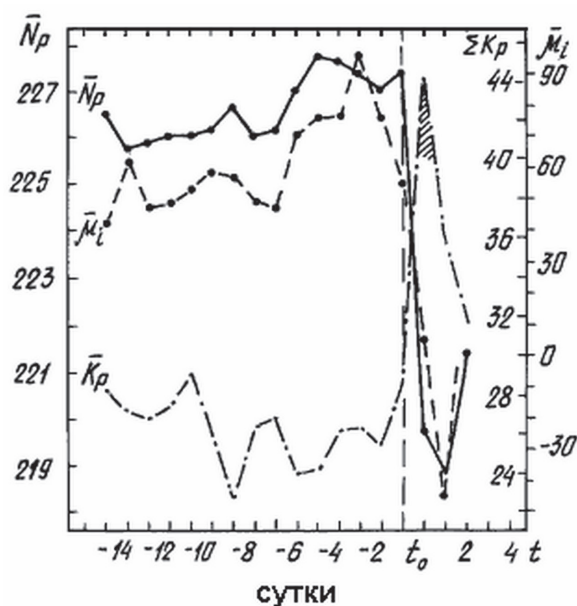
Выше, в п. 3.4 рассматривался способ определения эмпирических вероятностей статистического «прогноза» посредством расчета коэффициентов взаимной корреляции между прогностическим индексом  $z(t)$  и прогнозируемым параметром  $y(t)$ . Прогнозируемыми параметрами в нашем случае, являются понижения интенсивности 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  $\mu_p$ , интенсивности космических лучей  $N_p$  и параметров солнечного ветра: плотности плазмы  $n$ , напряженности магнитного поля  $B$ , ее дисперсии  $\sigma$  и южной компоненты поля  $B_z$ , скорости солнечного ветра  $V$ , а также индексов геомагнитной возмущенности ( $K_p$  и  $D_{st}$ -вариация), 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

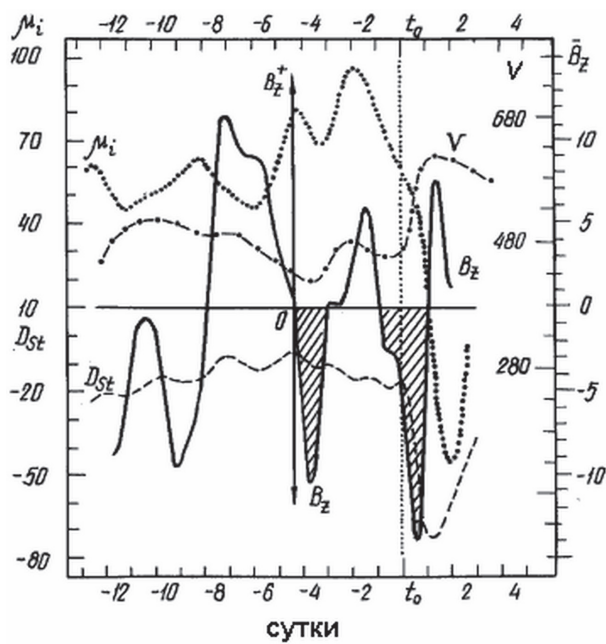


**Рис. 5.5.** Результат метода наложения эпох для спектрального индекса мерцаний  $\mu_i$  – пунктирная линия (шкала справа), интенсивности космических лучей  $N_p$  – сплошная кривая (шкала слева), и индекса геомагнитной активности  $K_p$  – штрихпунктирная линия (шкала, в правой части рисунка), с увеличенной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

космических лучей дана в левой части рисунка, справа – шкала индексов  $K_p$  и  $\mu_i$ . Вертикальной пунктирной прямой отмечен день регистрации ударных волн – день  $t_0$ . 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 одновременного 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  $\mu_i$  (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

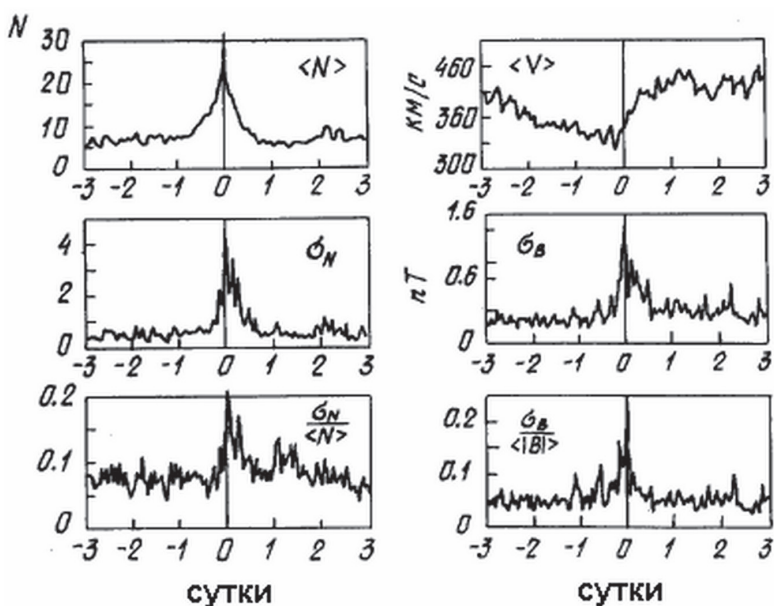
В этот период прекращается падение скорости солнечного ветра и начинается ее возрастание, что обычно также указывает на пересечение границ секторов ММП [1]. С момента прохождения секторной границы начинается «предпонижение» и  $D_{st}$ -вариации (рис. 5.6).

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  $\approx 99\%$ . Это следует из результатов тестирования по критерию  $\chi^2$ . 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 газокINETического давления к магнитному (параметр  $\beta$ ) 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  $L \sim 10^{-2}$  а. е. ( $\sim 10^{11}$  см) соответствует временному интервалу  $T = 10-15$  мин.

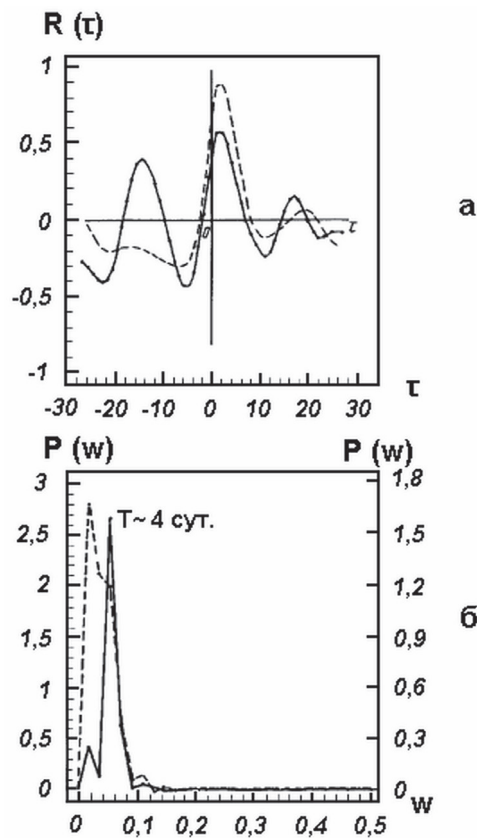


**Рис. 5.7. Поведение плотности плазмы солнечного ветра, ее дисперсии и нормированной дисперсии в окрестности границы сектора межпланетного магнитного поля (в левой части рисунка). Справа – поведение скорости солнечного ветра, дисперсии напряженности магнитного поля и ее нормированной дисперсии /2/**

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  $\tau$ ) 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.

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 СМЕ-событиями, имеют тенденцию появляться в активных областях лежащих в основании шлемовидных стримеров формирующих гелиомагнитный экватор.

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



**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.**

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  $\pm 1$  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 наклона (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  $5 \pm 1$  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 возрасть (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 укрупнения 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.

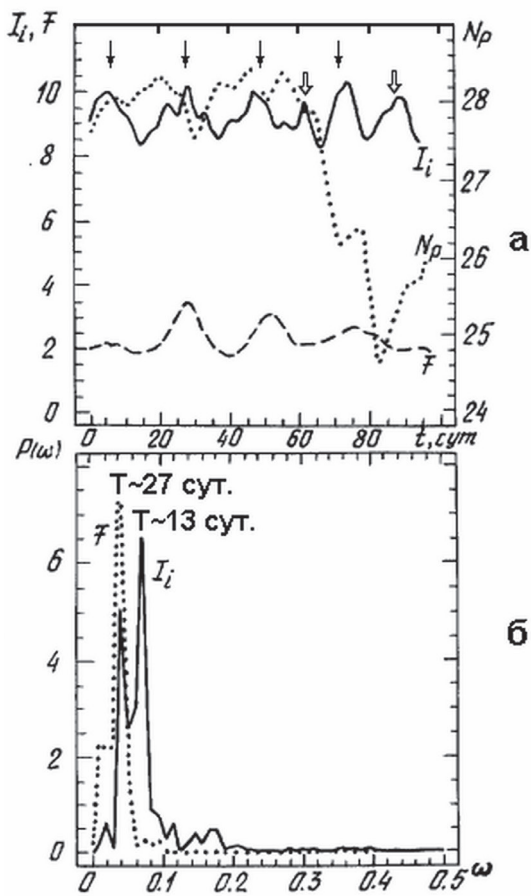
В последнее время, пристальное внимание ряда исследователей обращено на изучение структуры эффекта Форбуша. Результаты четырех групп исследователей (русской, американской, итальянской и японской) сводятся, в частности, к выявлению двухступенчатой структуры форбуш-понижений, но интерпретация ее различна.

По представлениям итальянской группы /24/, двухступенчатость объясняется наличием на классическом профиле эффекта Форбуша анизотропного возрастания интенсивности космических лучей длительностью от 5-20 час («реак»). 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.

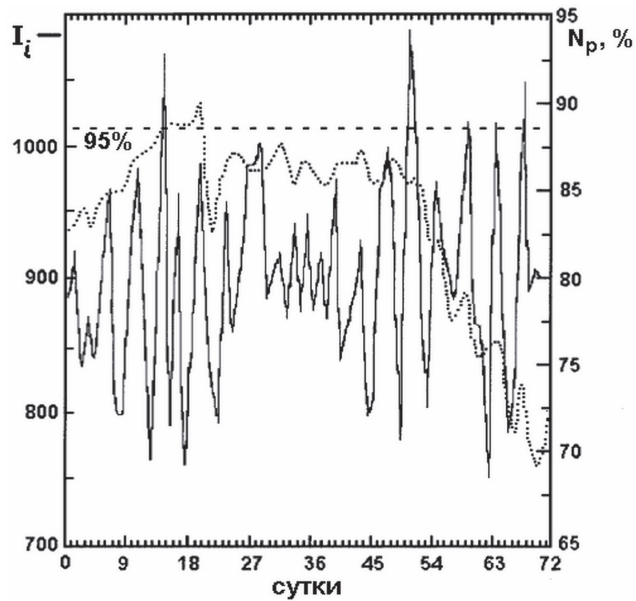
Для количественного изучения вариаций индекса мерцаний ГКЛ в первом квартале 1991 г., высокочастотная часть вариаций с периодом  $T \approx 4$  сут была исключена (рис. 5.9а). Видно, что в относительно



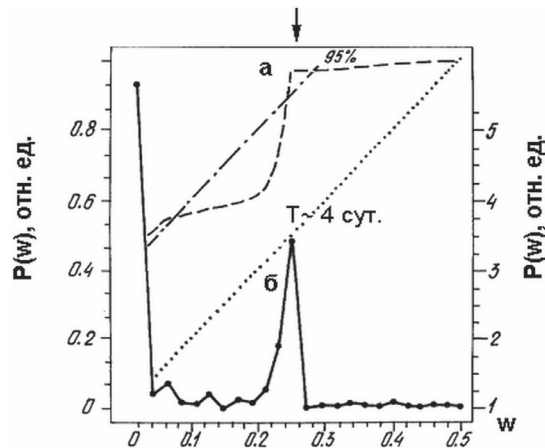
**Рис. 5.9.** Интенсивность космических лучей – точечная кривая, индекс мерцаний космических лучей – сплошная линия и поток радиоизлучения – пунктирная кривая в марте 1991 г. (а). Спектры анализируемых вариаций за тот же период (б): индекса мерцаний – сплошная кривая, и потока радиоизлучения – точечная 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  $T = 13\text{--}14$  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/.

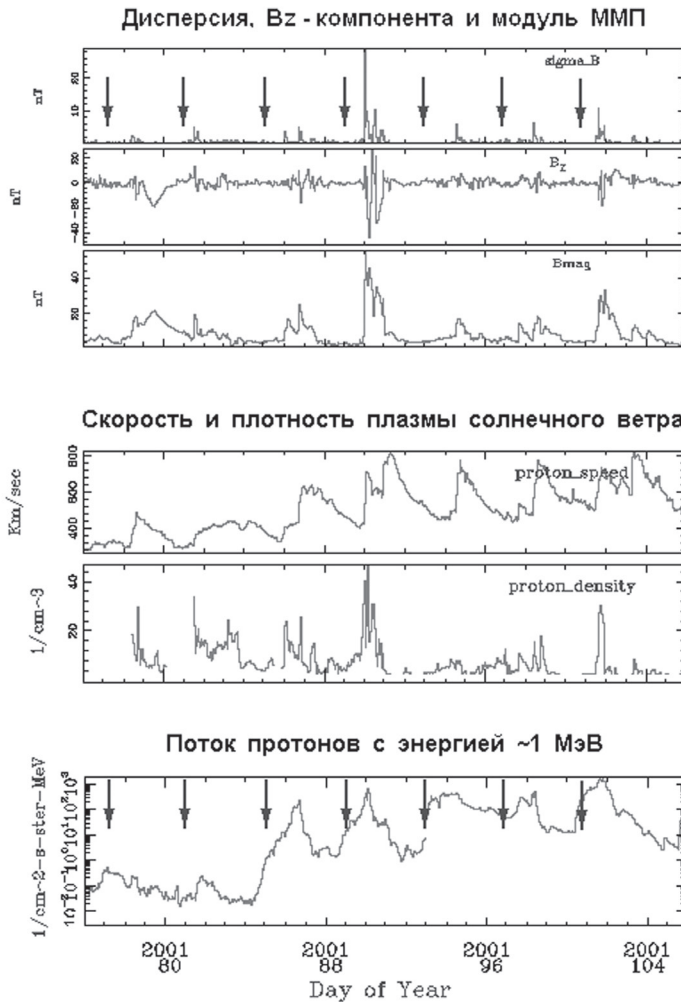


**Рис. 5.10.** Тонкая структура понижений интенсивности космических лучей с характерным казинедельным периодом  $T \approx 4$  суток во время форбуш-понижений в апреле и июне 1991 г. Точечная линия – интенсивность космических лучей. Сплошная кривая – индекс мерцаний. Указан 95%-ный уровень значимости



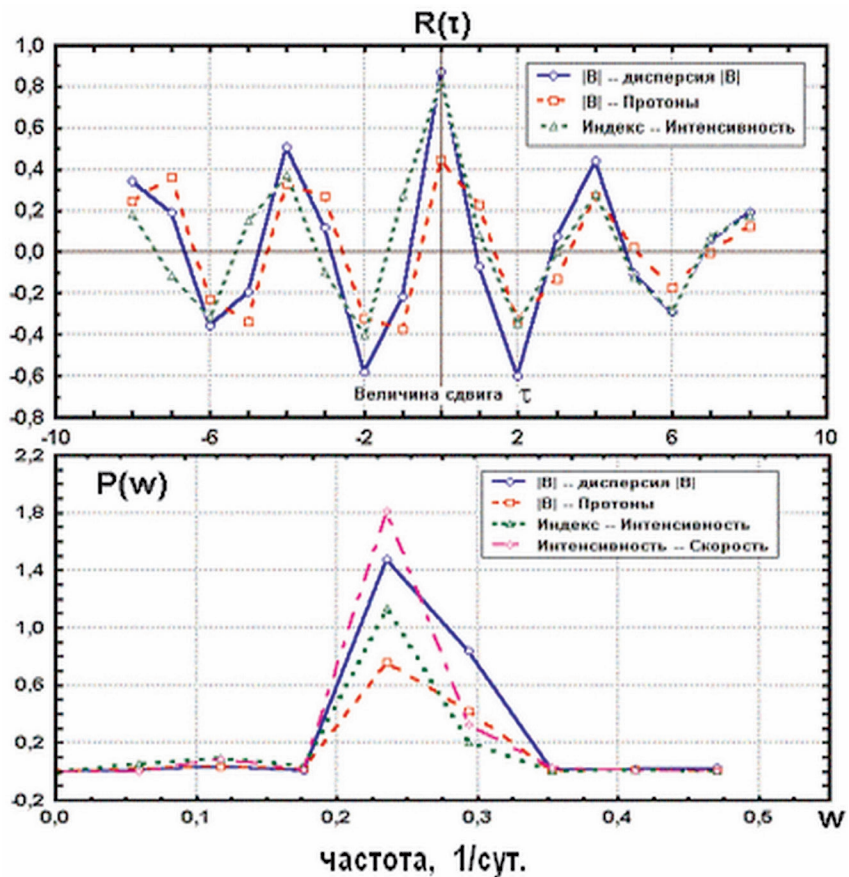
**Рис. 5.11.** Взаимный спектр индекса мерцаний и интенсивности космических лучей в интегральном (а – пунктирная кривая) и традиционном представлении (б – сплошная линия). В интегральном представлении взаимного спектра показан 95%-ный уровень значимости. В обоих случаях доминирует явно выраженная осцилляция с периодом  $T \approx 4$  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  $\sim 1$  МэВ и скорости солнечного ветра для экстремальной ситуации в марте-апреле 2001 г. (рис. 5.13).



<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>

**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  $\sim 1$  МэВ

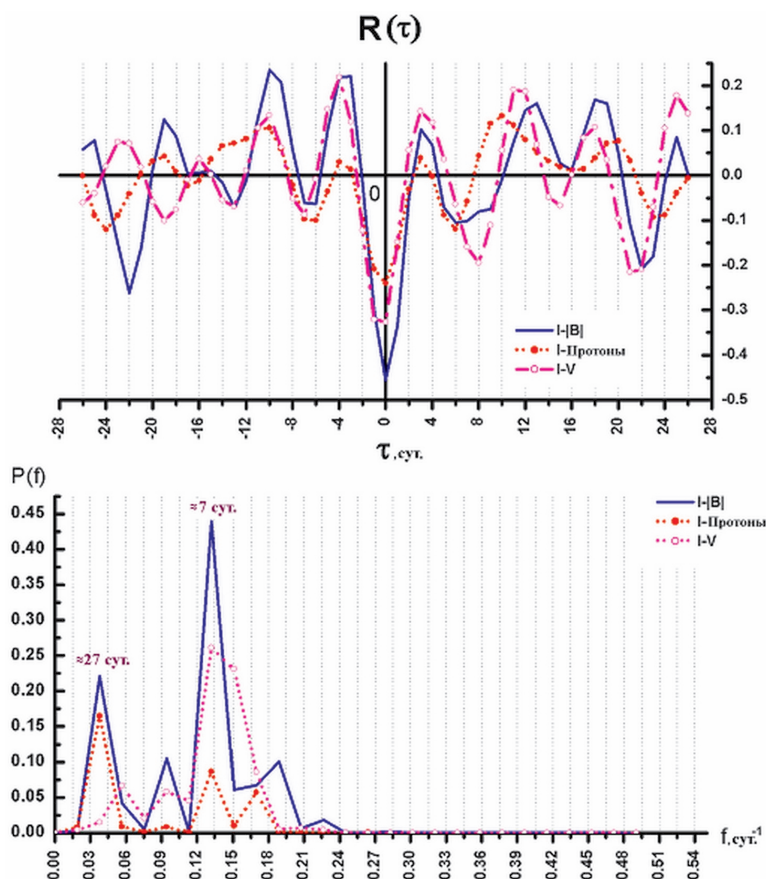


**Рис. 5.13. Результаты расчета взаимных корреляционных функций (в верхней части рисунка) и спектров мощностей (внизу) индекса мерцаний, интенсивности ГКЛ, дисперсии ММП, потока протонов с энергией ~1 МэВ и скорости солнечного ветра для экстремальных событий в марте-апреле 2001 г.**

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 того 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  $\sim 1$  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 « $t_0$ ») происходит 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  $14 \pm 1$  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 взрономия*. 1983. Т.23. №6. 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 Results 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 токового слоя. // *Тез. док. Всесоюзной конференции: Физика Солнца*. Алма-Ата. 1987. С. 52.
8. Perez Enriquez 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 heliospheric 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: Reliability of Global-Scale Determinations at 1 AU.: *Abstr. AGU Fal. Meet. San Francisco. 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 Currents 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 Sheet 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. Geophys. Res.* Vol.98. N. A3. P. 3585-3603.
16. Eselevich V.G., and Filippov M.A. An Investigation of the Heliospheric 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 Heliospheric Current Sheet on the Propagation of Flare-associated interplanetary shock waves. // Proc. 1 SOLTIP Simp. Prague. 1992. Vol.2. P. 294-305.

20. Eseevich 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 Geoeffectiveness 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 Shock 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 аэронауке. 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.

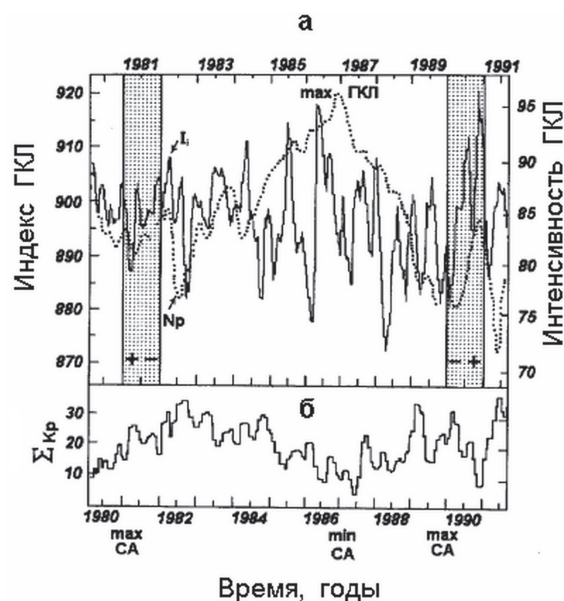
31. Sunderson T.R., Appourchaux T., Hoeksema J.T., Harvey K.L. Observations of the Sun`s magnetic field during the recent solar maximum // J. Geophysical Res. 2003. V. 108. No. A1. P. 1035.

## 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 г.). 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 г. Для устойчивости оценок полученные данные сглажены по 3 точкам методом скользящего среднего.

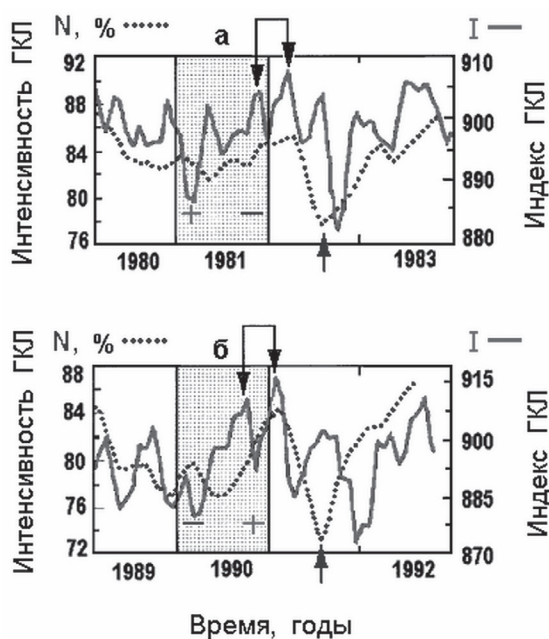
На рис. 6.1 приведены графики среднеоборотных значений интенсивности ГКЛ – пунктирная кривая (шкала справа) и спектрального



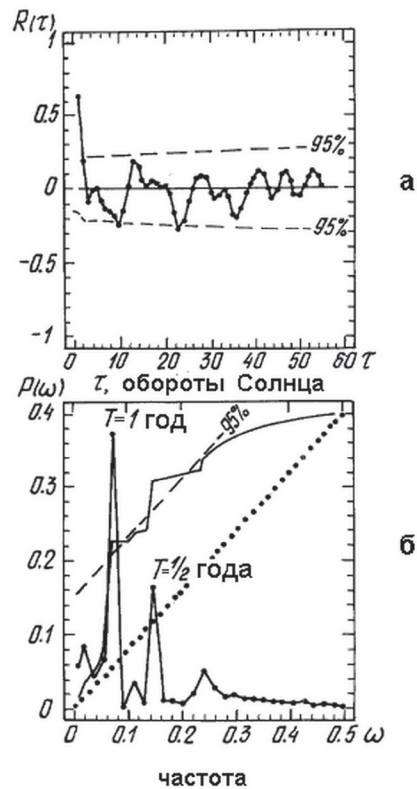
**Рис. 6.1. Графики среднеоборотных значений интенсивности ГКЛ в относительных единицах – пунктирная кривая (шкала справа) и спектрального индекса мерцаний – сплошная кривая (шкала слева). Ниже, представлены соответственно данные по K-индексу. Временной ход интенсивности космических лучей, в целом, описывает 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,



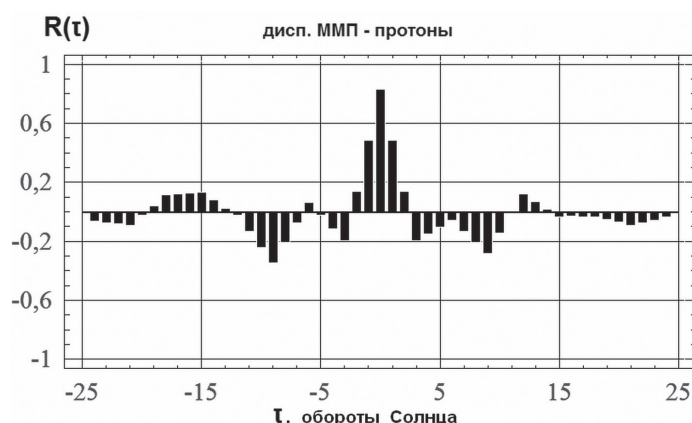
**Рис. 6.2.** Раздельное (по циклам) представление 27-дневных значений интенсивности космических лучей и индекса мерцаний, относительно периода смены знака общего магнитного поля Солнца в 21 и 22 циклах



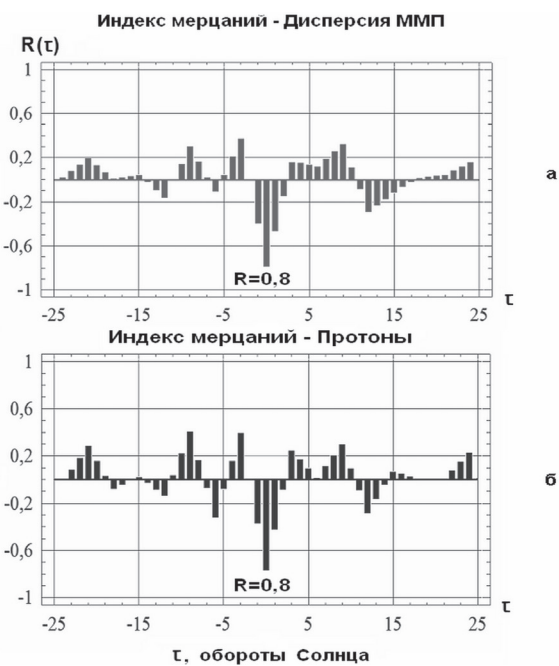
**Рис. 6.3. Результаты корреляционно-спектрального анализа 27-дневных значений индекса мерцаний космических лучей за оба цикла 21 и 22. В спектре на уровне 95% доминируют полугодовая и годовая вариации**

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  $\sim 1$  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



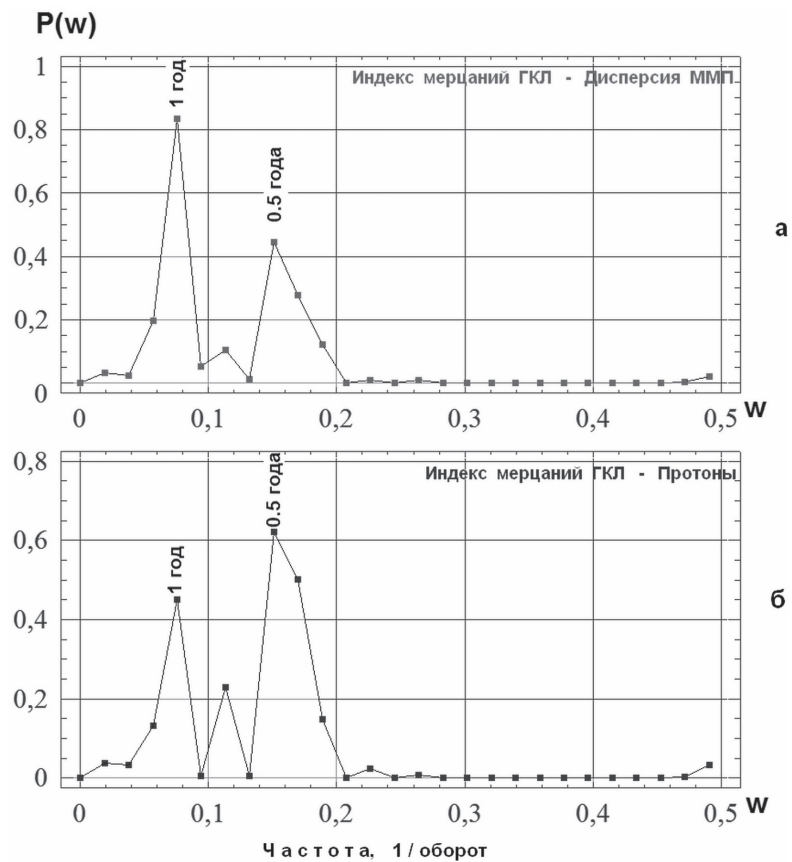
**Рис. 6.4.** Взаимная корреляционная функция между дисперсией ММП и потоком низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией  $\sim 1$  МэВ. По оси абсцисс – величина сдвига по времени  $\tau$ . Величина коэффициента кросс-корреляции  $R = 0,8$



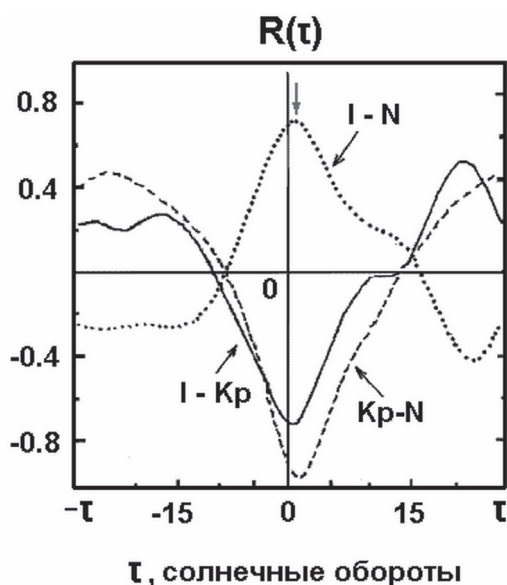
**Рис. 6.5.** Взаимные корреляционные функции между индексом мерцаний ГКЛ и дисперсией ММП (верхняя часть рисунка) и между индексом мерцаний и потоком низкоэнергичных частиц космических лучей с энергией  $\sim 1$  МэВ. По оси абсцисс – величина сдвига по времени  $\tau$ . Величина коэффициента кросс-корреляции 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. При этом, 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  $\sim 1$  МэВ**

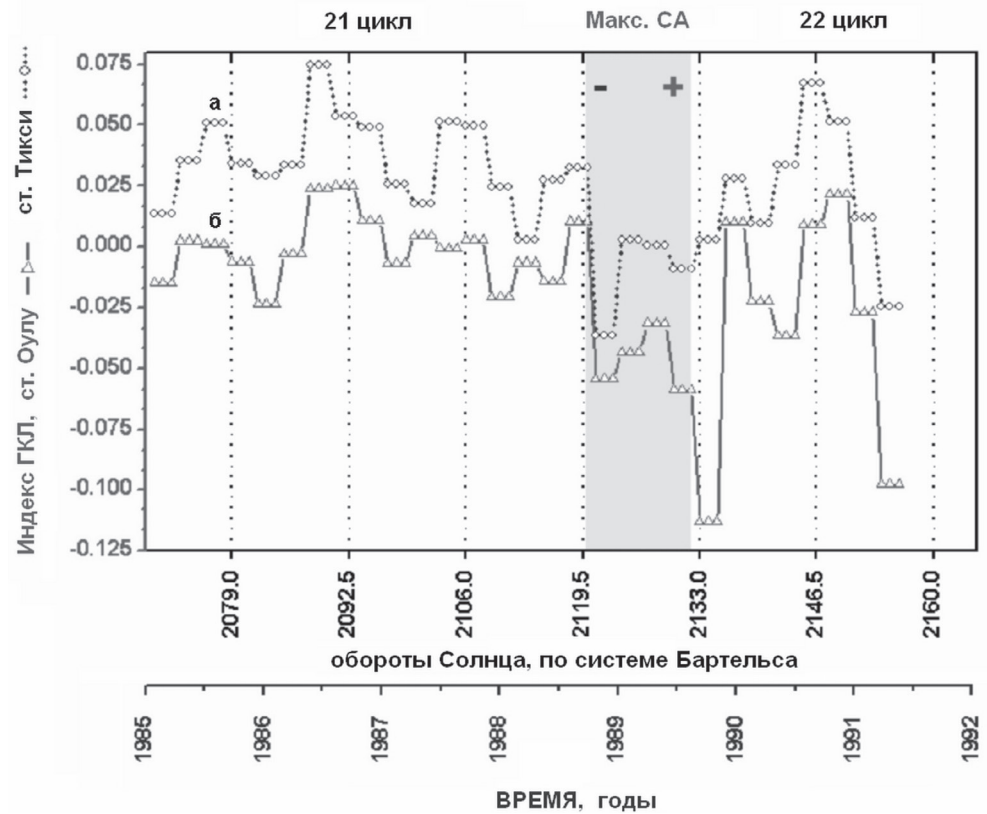


**Рис. 6.7. Результаты взаимного корреляционного анализа: между индексом мерцаний и интенсивностью космических лучей (I-N), индексом мерцаний и  $K_p$ -индексом геомагнитной активности (I- $K_p$ ). Коэффициент взаимной корреляции  $R_{max}(\tau) \approx -0.7$  при числе коррелируемых точек  $n=160$ , 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 (предвышения), достигая своего максимума до начала понижения. Минимальное значение индекса мерцаний достигает, как правило, в минимуме понижений интенсивности ГКЛ. Только подобная «сфазированность» индекса мерцаний и интенсивности ГКЛ на стадии подобных предвышений 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.

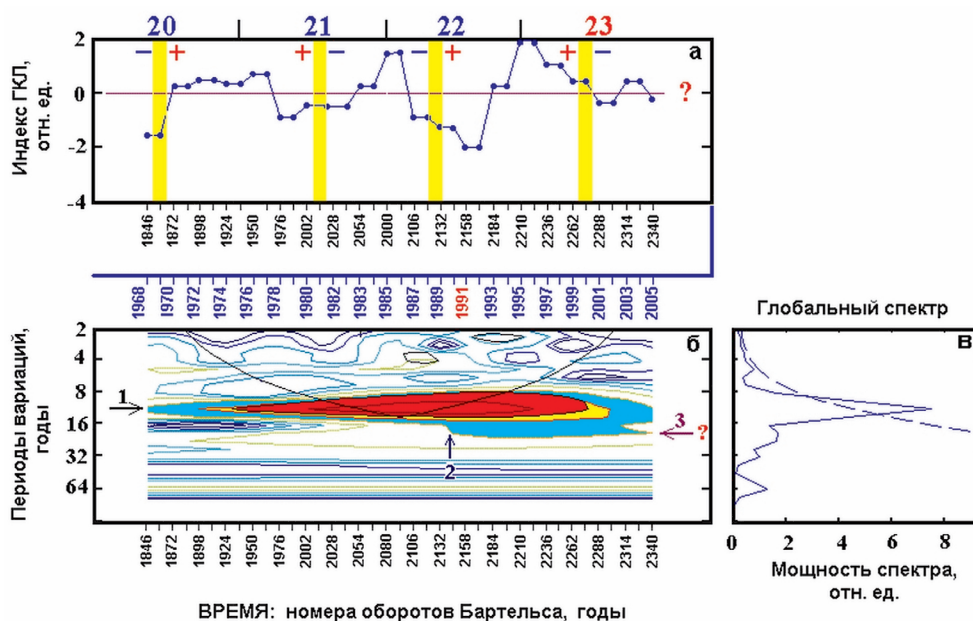
Достоверность полученных выше результатов подтверждается также расчетом индекса мерцаний ГКЛ по данным обсерватории Оулу. С целью удобства сопоставления индексов по станциям Тикси и Оулу (Финляндия), 27-дневные значения индекса мерцаний были предварительно усреднены по 3 оборотам Солнца. Результаты расчетов Индекса мерцаний за 21-22 цикла 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 результатов 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 между 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-Прокачиа /1,2/, обозначим через  $x_i$  точку фазового пространства с координатами  $\{x_0(t_i), \dots, x_{n-1}(t_i + (n-1)\tau)\}$ . Так устанавливается начало отсчета  $x_i$  для всех имеющихся данных. Следовательно, можно

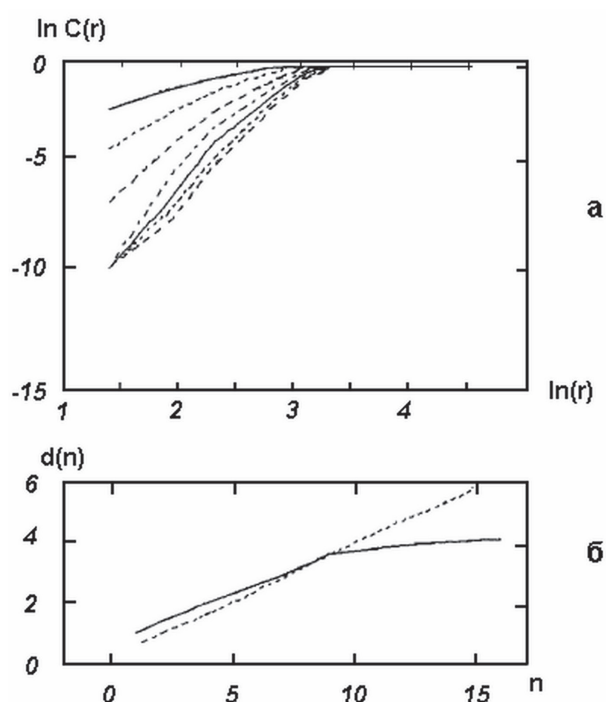
вычислить расстояние  $|x_i - x_j|$  от этой точки до остающихся  $N - 1$  точек. Это позволяет сосчитать число точек в фазовом пространстве отстоящих от  $x_i$  на расстоянии не превышающее некоторую заданную величину  $r$ . Повторяя этот процесс для всех значений  $i$ , можно вычислить интегральную 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 переменных 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.

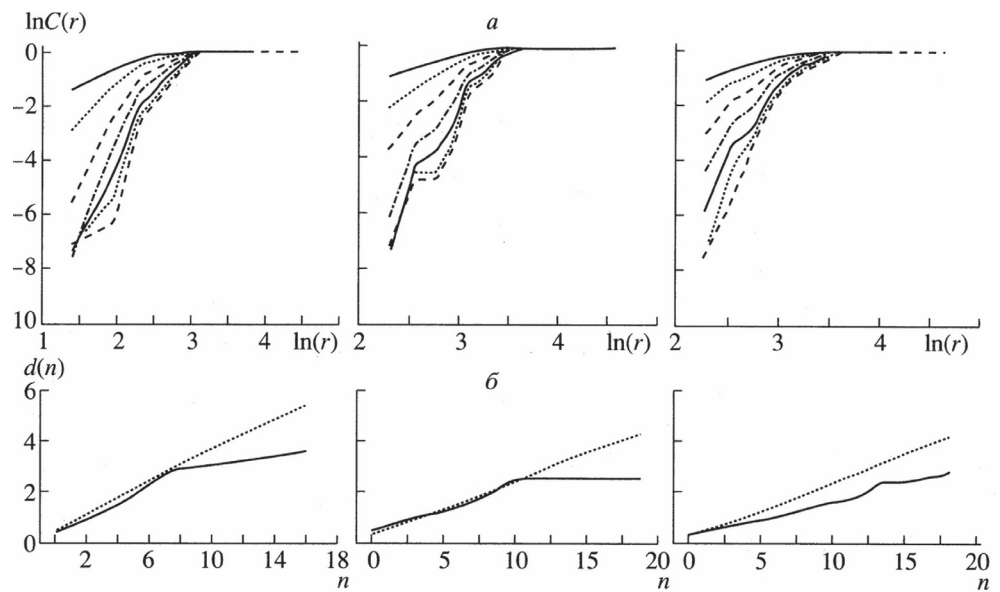
В этой связи, наибольший интерес представляет определение корреляционной размерности вариаций индекса мерцаний на ветвях спада 11-летнего цикла. Зависимость корреляционной размерности  $d(n)$  для среднеоборотных, (27-дневных) значений индекса мерцаний за два неполных цикла солнечной активности с 1980-1991 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 ужесточением 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 переплюсовки 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  $\alpha$  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. Уплотнение спектра флуктуаций ММП по мере приближения 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  $\tau = t_{max} + (2 \pm 1 \text{ год})$  /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 SMIR) или, другими словами, глобальными (или локальными) коротящими областями взаимодействия разноразностных потоков – своеобразных «магнитных барьеров» регистрируемых далеко ( $R > 10 \text{ а.е.}$ ) в межпланетной среде /34,35/.

С другой стороны, выявлены долгопериодные вариации возрастной 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/. Начинаясь с переполюсовок магнитного поля в 1971, 1981 и 1990 гг. распад крупномасштабного магнитного поля Солнца и является, очевидно, источником подобных возрастных 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 сильноосциллирующей 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-

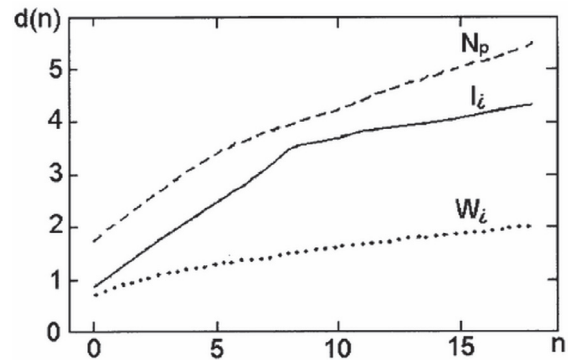
люции ЭЭД достаточно регулярен и слабо искажается шумами. Лишь на масштабах порядка длительности цикла,  $V$  становится хаотичным.

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 удастся. 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.

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



**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  $d \approx 4$ ). Размерность исходного или задаваемого многомерного фазового пространства –  $n$**

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. Characterization 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 Interplanetary 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 аэронаука.* 1999. Т. 39. № 1. С. 100-104.
8. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальные и мультифрактальные структуры в солнечном ветре. // *Геомагнетизм и аэронаука.* 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 Recent 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. Уидбродж 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 Symposium.* 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 дыхание  
Перехвачено дыхание  
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 проявлений 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.

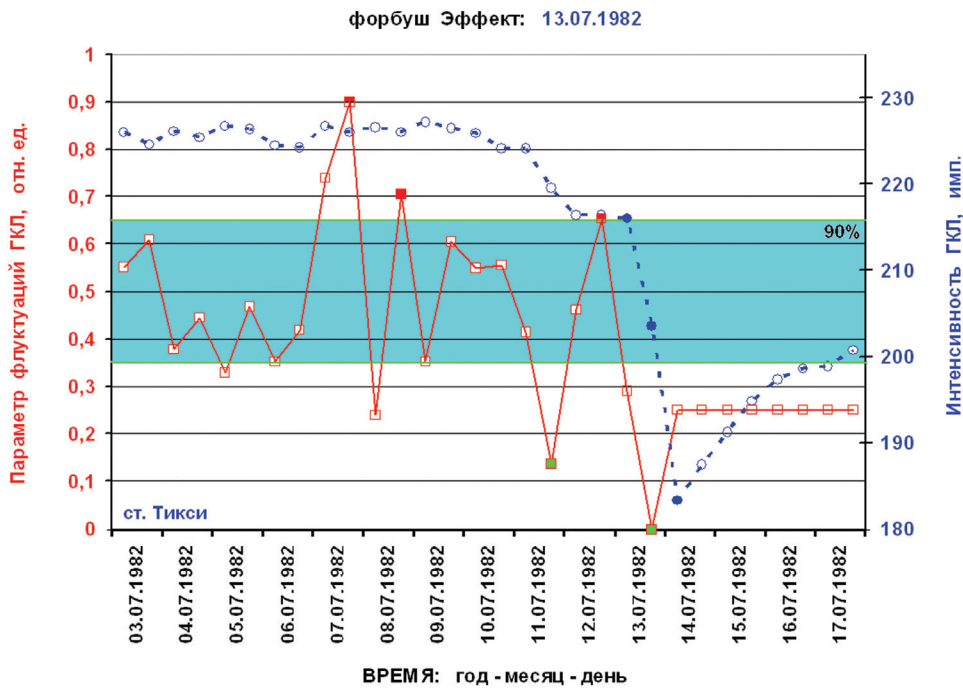
Впервые, эффективность предложенного наземного мониторинга космических лучей была апробирована в натурном эксперименте, проведенного в июле 1982 в Полярной Геокосмофизической Обсерватории Тикси. Дата проведения была определена просто: в июле 1982 г. отмечался 25-летний юбилей организации в пос. Тикси 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 гуxor», 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 натурального 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  $Q_1, Q_2, Q_3$ :

$$0 \text{ при } |A - \eta_{1,2}| < K \times \sigma_{1,2}$$

$Q_1$

$$1 \text{ при } |A - \eta_{1,2}| \geq K \times \sigma_{1,2}$$

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



$$Q_2 \begin{cases} 1 & \text{при } |B-\eta_{1,3}| \geq K \times \sigma_{1,3} \\ 0 & \text{при } |C-\eta_{2,3}| < K \times \sigma_{2,3} \end{cases}$$

$$Q_3 \begin{cases} 1 & \text{при } |C-\eta_{2,3}| \geq K \times \sigma_{2,3} \end{cases}$$

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:

$$\begin{aligned} \text{если } Q_1 \cap Q_2 = 1, & \text{ то } N_i = b_i + c_p, \\ \text{если } Q_1 \cap Q_3 = 1, & \text{ то } N_i = a_i + c_p, \\ \text{если } Q_2 \cap Q_3 = 1, & \text{ то } N_i = a_i + b_p, \text{ где } i=288. \end{aligned}$$

Затем вводилась поправка на давление по формуле:

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

где  $P_i$  – текущие пятиминутные 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.

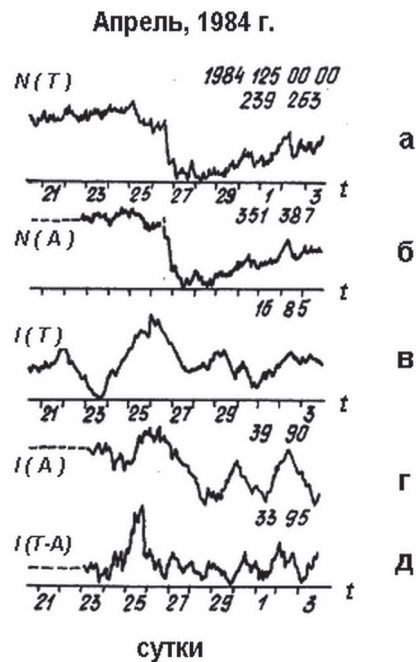
*«В течение столетий математики и философы задавались вопросом – математика **изобретена или открыта?**... Я не знаю ничего более возбуждающего, чем наблюдать, как разрозненные кусочки математического пазла соединяются в единую непротиворечивую картину. Когда такое происходит, возникает чувство, что 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.

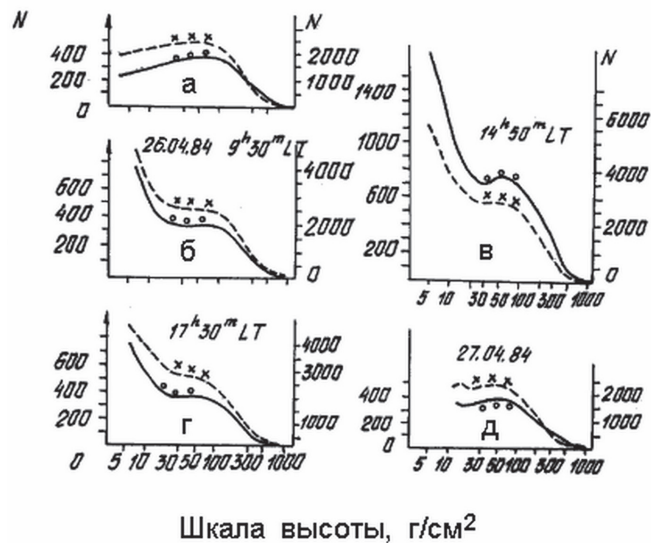
Ниже приводятся результаты эксперимента по прогнозу радиационной и электромагнитной обстановки, проведенного сразу после запуска системы АСКОД в апреле 1984 г. Реализованный в АСКОД диалоговый режим позволил провести как техническую диагностику измерительно-вычислительного комплекса, так и корпускулярную 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.

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 радиационного 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<sup>2</sup>. 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. 7.3. 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**

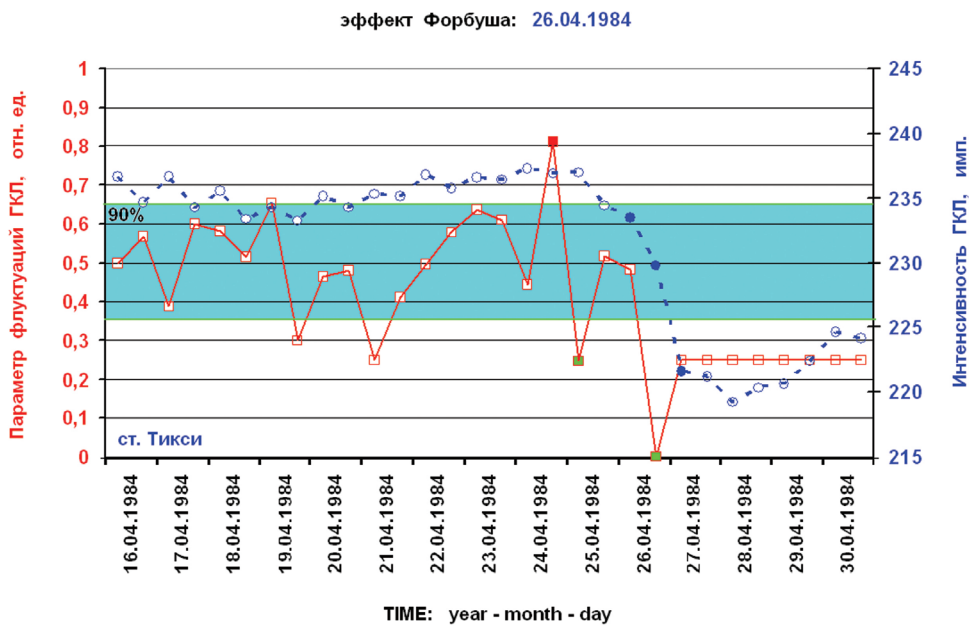


**Рис. 7.4.** Результаты измерений частиц космических лучей на полетном приборе «ИКАР» (аппаратура ФИАН). Показаны фоновые значения интенсивности космического излучения, регистрируемые одиночным счетчиком типа СТС-6 и телескопом на базе двойных детекторов указанного типа. По оси абсцисс нанесена шкала 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

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 понижения 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 ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ «ГАЛО» В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

*«...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 известно, в диффузионном приближении быстрым частицам приписываются индивидуальные случайные траектории не связанные 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. 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 [1].

Целью работы является изучение переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра – ударной волны по исследованию особенностей флуктуаций космических лучей, обусловленных групповым или коррелированным поведением галактических космических лучей (ГКЛ). Выделение коррелированных флуктуаций или «пучков» частиц космических лучей из Гауссова «шума» позволило бы использовать их в качестве предвестников крупномасштабного возмущения солнечного ветра. Коррелированные флуктуации целесообразно искать в ситуациях, когда возникают «окрашенные» группы частиц, за эволюцией которых легко проследить. Известно, что наибольшие контрасты в космических лучах создают ударные волны, порождающие резкие понижения интенсивности ГКЛ называемые эффектами Форбуша [1].

Другие возможные источники «форбуш-понижений» (например, рекуррентные возмущения или «струи» солнечного ветра и т.д.) вызывают понижения интенсивности космических лучей значительно меньшей амплитуды. В отсутствие спорадической (вспышечной) активности «струи» солнечного ветра также могут иметь предвестники в космических лучах, но это происходит лишь при достижении достаточных градиентов

в параметрах солнечного ветра на фронтах разноскоростных потоков. В общем случае, невозможно «а priori» отличить предвестники от всплесчных ударных волн от предвестников на границе разноскоростных потоков солнечного ветра.

В еще одном типе возмущений солнечного ветра, 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 окрестности фронта ударной волны распространяющейся вместе с ней по невозмущенному солнечному ветру. Наличие подобной магнитной пробки в теле ударной волны 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. В этом случае, 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 ожидать, что параметры мерцаний космических лучей будут обладать фрактальными свойствами [6].

Известно, что фрактальные свойства процесса определяются по оценке фрактальной или корреляционной размерности процесса. Конечная размерность  $d$  означает, что данный сигнал в принципе можно воссоздать с помощью динамической системы порядка не выше чем  $2d+1$  [8]. Более того, можно утверждать, что *размерность процесса* 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 более **детерминированной** структуре процесса [9].

Исследование статистического распределения числа форбуш-понижений с амплитудами  $A \geq 1,5\%$  в цикле СА по данным нейтронного монитора ст. Алерт проведенное авторами работы [10] показало, что **максимум** распределения числа эфф. Форбуша приходится на *начало*

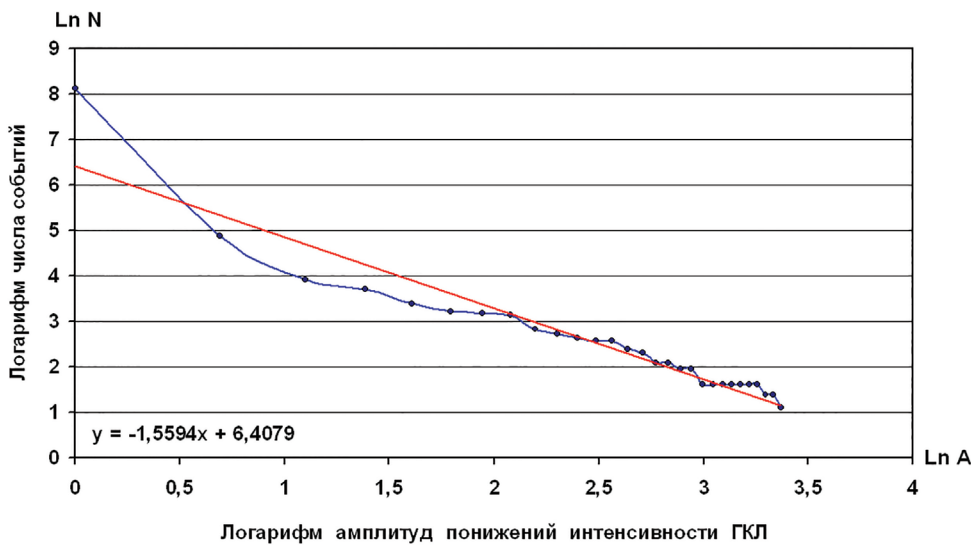
ветви спада солнечной активности. Этим, скорее всего, и обусловлены достаточно резкие *понижения* в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ в *начале* ветви спада 11-летнего цикла. Известно, что корональные выбросы массы (СМЕ), являются источником ударных волн и магнитных облаков. Их число увеличивается также в начале *ветви спада 11-летнего цикла* [11].

Анализ корреляционной (фрактальной) размерности по данным флуктуаций ГКЛ показал, что наибольший вклад в конечность величины корреляционной размерности дает окрестность максимума и геоэффективная фаза начала ветви *спада* 11-летнего цикла. Поведение фрактальной размерности на этой фазе 11-летнего цикла заведомо отлочно от *случайного* процесса, для которого характерна *монотонная* зависимость корреляционной размерности  $d(n)$ . В окрестности фазы максимума цикла «**выход на плато**» происходит при достижении корреляционной размерности величины  $d=2,5-3$  [12-13]. Применительно к задаче прогноза солнечной активности сам факт обнаружения низко-размерного, т.е. частично детерминированного процесса на активной фазе 11-летнего солнечного цикла служит своеобразной «теоремой существования», т.е. указанием на *принципиальную* возможность прогноза активной фазы солнечного цикла.

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

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

Выбор методологии изучения переходного режима к экстремально активной фазе солнечного цикла определился нижеследующими результатами. По часовым значениям интенсивности ГКЛ ст. Оулу (Финляндия) за 45 лет с 1968-2012 гг. определялось число событий (понижений интенсивности ГКЛ) фиксированной амплитуды. Так был выявлен *степенной* характер распределения числа событий в зависимости от их амплитуды (рис. 8.1). Это согласуется с результатом, полученным ранее в [14], что подтверждается *близостью* степенных показателей  $\tau$ : “-1,60” для рентгеновских вспышек и “-1,56” в космических лучах. Обратная степенная зависимость указывает обычно на отсутствие выделенного или «характерного» масштаба явления: т.е. имеет место *иерархия* масштабов, что указывает на самоподобный или фрактальный характер процесса в целом. Это согласуется с конечным и низким ( $d=2,5-3$ ) значением корреляционной (фрактальной) размерности процесса на



**Рис. 8.1. Степенной закон зависимости числа событий в интенсивности ГКЛ от их амплитуды, по часовым данным ст. Оулу (Финляндия) за период 45 лет с 1968-2012 гг.**  
По оси ординат – натуральные логарифмы числа событий, по оси абсцисс – натуральные логарифмы амплитуд соответствующих событий. «Событие» – понижение интенсивности ГКЛ в процентах. Величина показателя степени  $\tau$ : «-1,56». В анализе использованы форбуш-понижения за указанный период, начиная с амплитуды понижения в 1%.

активной фазе солнечного цикла [13]. Действительно, правдоподобность полученной оценки степенного показателя  $\tau$  с очевидностью следует из аналитического выражения его связи с фрактальной размерностью:  $d = \tau + 1$ . Отсутствие «характерного» масштаба явления означает, что число любых, произвольно взятых событий на Солнце будет всегда больше числа более мощных, по сравнению с ними, событий. События в рентгене отражают активность в источнике на Солнце, а события в космических лучах отражают проявление той же самой активности в верхней короне Солнца и далее в межпланетной среде.

Сам факт существования обратной степенной зависимости с показателем степени  $\tau < 2$  указывает на то, что динамическая система находится в нетривиальном состоянии «самоорганизованной критичности», когда весьма нерегулярно, т.е. катастрофически (что существенно осложняет прогноз) «сравливается» избыток запасенной в системе энергии. При  $\tau \leq 3$  степенное распределение обладает бесконечной дисперсией, т.е. не имеет смысла пытаться характеризовать отклонение значений случайной величины от ее математического ожидания, а при

**тс2** бесконечным становится и само математическое ожидание. В этом случае сумма значений случайной величины в некоторой выборке оказывается сравнима с наибольшим из них. В результате обе характеристики быстро и неограниченно увеличиваются по мере роста объема выборки, что дает характерный пример **анти-интуитивного** поведения масштабно-инвариантных (фрактальных) систем [15-17]. Другими словами, словосочетание «существенно осложняет прогноз», в более категоричной форме может означать и *принципиальную непредсказуемость* природных катастроф!?

Даже если это и так, то у нас, тем не менее, имеется возможность их предупредить. В частности, с помощью мониторинга состояния среды посредством космических лучей с целью раннего обнаружения уже случившейся «катастрофы» (в нашем случае – ударной волны) в межпланетной среде на расстоянии от Земли равном *длине пробега* космических лучей. Это обязывает нас, образно говоря, постоянно «держат руку на пульсе». Осознание этого и определило необходимость разработки и создания системы наземного мониторинга космических лучей в Полярной геофизической обсерватории (ПГО) Тикси в 1981 г. [18]. Ниже, предлагается подход, который в некоторой степени решает проблему «прогноза», точнее, *раннего выявления* геоэффективных событий Космической погоды.

Предложенный способ выгодно отличается простотой реализации и 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 мерцания (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».

По этой причине заблаговременность обнаружения **мощного** и потому наиболее опасного радиационного и электромагнитного шторма по флуктуациям космических лучей более чем в 10 раз ( $\approx 1$  сутки) больше заблаговременности, достигаемой на космическом аппарате ( $\approx 15$  мин). Экономическая же эффективность предложенного **дистанционного** способа раннего обнаружения вспышечных ударных волн говорит сама за себя. Стоимость и эксплуатация, к примеру, американской



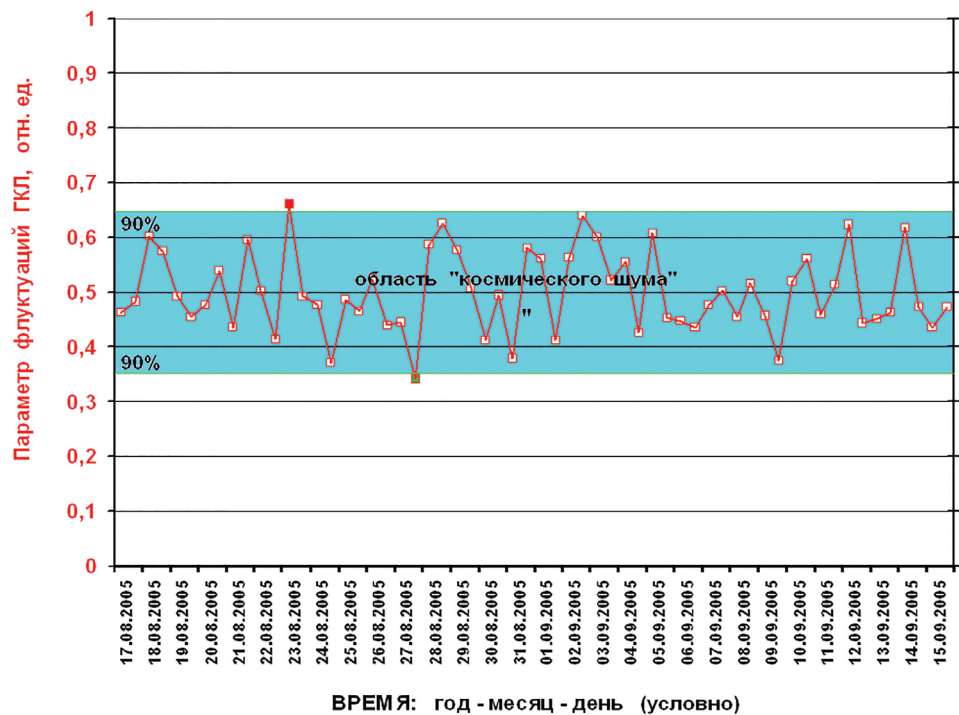
спутниковой группировки прогноза – порядка ~1 млрд. долл. Ущерб от всевозможных потерь, связанных с пропуском подобных «космических цунами», представляет собой не менее значительную сумму. Все возрастающая зависимость современной цивилизации от высокотехнологичных систем жизнеобеспечения в космосе, в 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*.

Из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности известно, что обобщенная функция распределения Вейбулла-Гнеденко описывает *выход системы на предельный* критический режим [19]. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим выхода на активную фазу 11-летнего цикла или в окрестность межпланетной ударной волны. На языке вероятностной теории 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, в данном случае, интенсивности космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла к «функции надежности» (Приложение 8.1) и есть искомая вероятность (**функция Риска**) или ПАРАМЕТР флуктуаций космических лучей [20].

Для расчета вероятности достижения интенсивностью космических лучей **критического значения на стадии переходного режима**, потребуется оценка параметра формы эмпирического распределения Вейбулла, который определяет степень отклонения формы аппроксимирующей функции эмпирической гистограммы 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. Параметр формы является **КЛЮЧЕВЫМ** параметром: при достижении им **критической** величины значение параметра определяется как

**предвестник** выхода на критический (переходный) режим. Параметр *масштаба* определяется *средним* значением эмпирической (частотной) гистограммы распределения интенсивности ГКЛ.

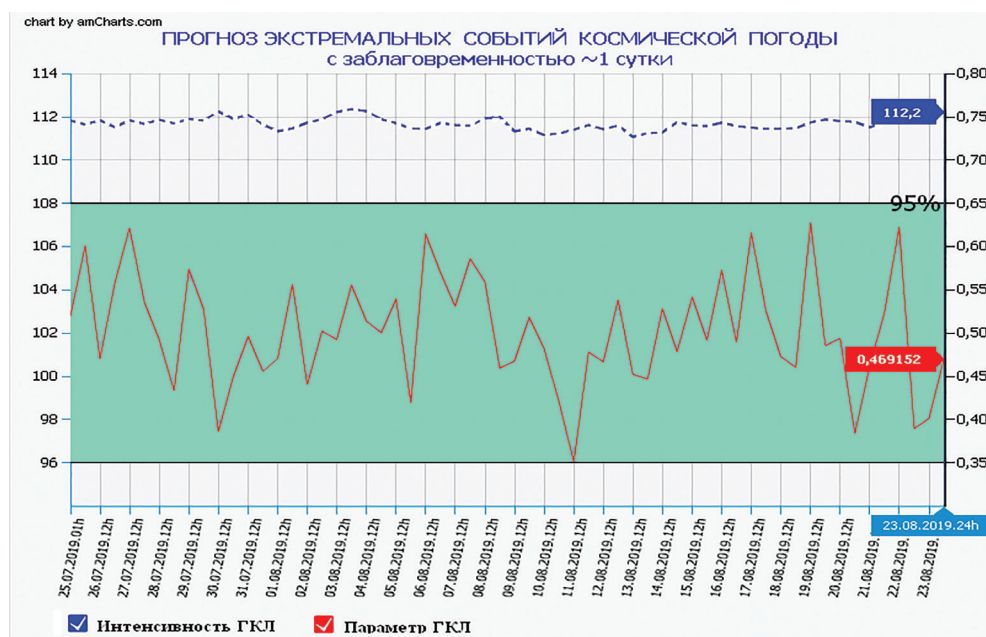
Далее, остается только выделить сигнал-предвестник из Гауссова шума: Гауссов шум содержится, проще говоря, в «до критической» линейной области функции Риска, а искомый **сигнал-предвестник в «за критической» нелинейной**. Искомая, **нелинейная** компонента сигнала-предвестника формируется при **превышении** степени (вероятности) процесса критического значения, т.е. при  $P > P_{кр}$ . ТЕСТИРОВАНИЕ предложенного способа на контрольном ряде, представляющего собой случайный ряд чисел показало, что значения вероятности (далее, параметр флуктуаций) лежащие ниже уровня  $P \leq 0,65$  можно уверенно (на уровне значимости 90%) отнести к гауссовскому шуму (рис. 8.2).



**Рис. 8.2. Результаты тестирования алгоритма расчета вероятности или параметра флуктуаций космических лучей на случайном ряде чисел. По оси ординат – значения вероятности или параметра флуктуаций. Указан двухсторонний ( $0,35 < P < 0,65$ ) уровень значимости 90%. Все значения параметра флуктуаций находятся внутри области «Космического шума». По оси абсцисс – условная дата: год – месяц – день.**

Калибровку «нуля» можно осуществить и по реальным данным. Для этой цели, на основе полученного ранее опыта мониторинга космических лучей в Обсерватории Тикси, нами была создана роботизированная экспертная система диагностики и прогноза Космической погоды «Cyber-FORSHOCK». Калибровку «нуля» параметра флуктуаций ГКЛ лучше всего проводить на фазе *минимума* 11-летнего цикла, когда вспышечная активность **минимальна**. Например, в июле-августе **2019 г.**, т.е. на фазе минимума текущего 24 цикла (рис. 8.3). Видно, что наблюдаемые вариации параметра флуктуаций не выходят на значимый уровень, т.е. находятся в пределах области космического «шума».

С целью исключения ситуации «пропуска цели» (известной в радиофизике как «ошибка 1 рода»), а также случаев регистрации не



**Рис. 8.3. Результаты тестирования алгоритма расчета вероятности или параметра флуктуаций космических лучей с 25 июля – 23 августа 2019 г. по реальным данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) на фазе минимума текущего 24 цикла посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,65$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

геоэффективных событий Космической погоды, фактически – «ложных тревог» («ошибки 2 рода»), была проведена настройка или *адаптация* 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» вариаций космических лучей.

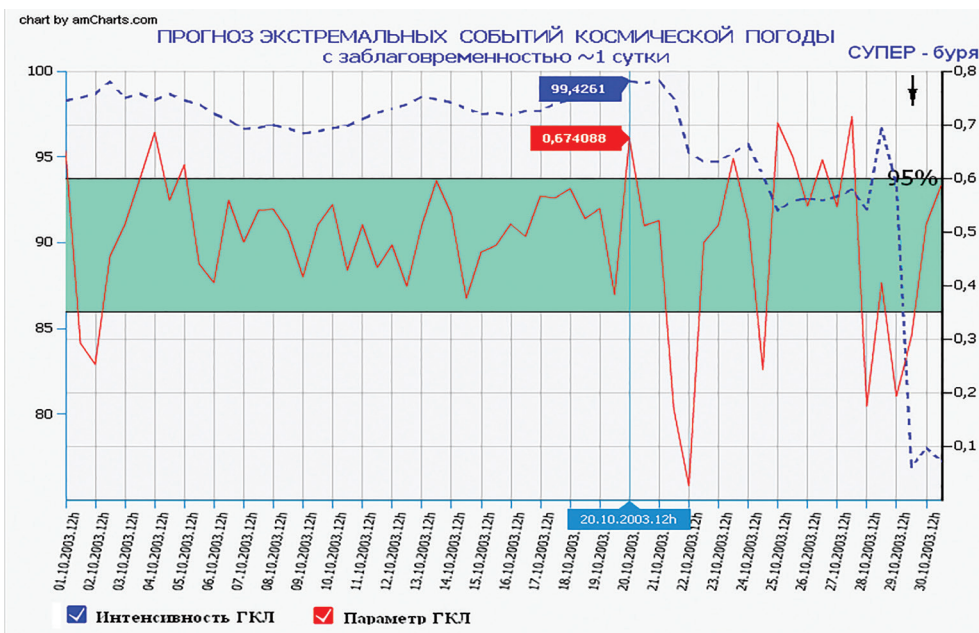
Блок подавления шума представляет собой процедуру подачи на вход анализатора, наряду с исходным сигналом, двух вариантов «расфазированного» исходного сигнала, с выходом на данном блоке – среднего значения от их суммы. Притом, что величина временного сдвига ( $\pm 1$  час) обоих расфазированных сигналов много меньше, чем интервал усреднения параметра флуктуаций (12 часов). Эта процедура (за счет *взаимного подавления* при суммировании случайной компоненты сигналов) позволила, практически, вдвое уменьшить дисперсию исходного временного ряда. Блок *расширения* диапазона частот включает в себя использование в процедуре исключения тренда полиномов не только 2-го, но и 3-го порядков, «одновременно». Использование полиномов 2-го и 3-го порядка позволяет расширить частотный диапазон оставшихся (после вычитания тренда) мелкомасштабных вариаций. Это важно при регистрации достаточно резких и глубоких понижений интенсивности ГКЛ, в частности, во время больших форбуш-понижений.

## 8.2. О кумулятивной природе экстремальных событий Космической погоды.

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

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

Иллюстрация работы предложенного способа на примере известных событий в октябре 2003 г. показана на рис. 8.4. Кроме *экстремального* понижения интенсивности ГКЛ 28-31 октября 2003 г. в анализируемый период зарегистрировано также 2 события средней величины: 21-22 октября и 24-25 октября. Всем трем событиям, в параметре флуктуаций предшествуют значимые (на уровне 95%) значения параметра флуктуаций ГКЛ, т.е. – предвестники: **20** октября, **23** октября и **26-27** октября. Предвестник от 20 октября отражает начало быстрого роста активной области (АО) № 484. На момент появления указанной области из-за восточного края солнечного диска 18 октября 2003 г. она



**Рис. 8.4. Результаты расчета параметра флуктуаций на примере серии экстремальных событий в октябре 2003 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

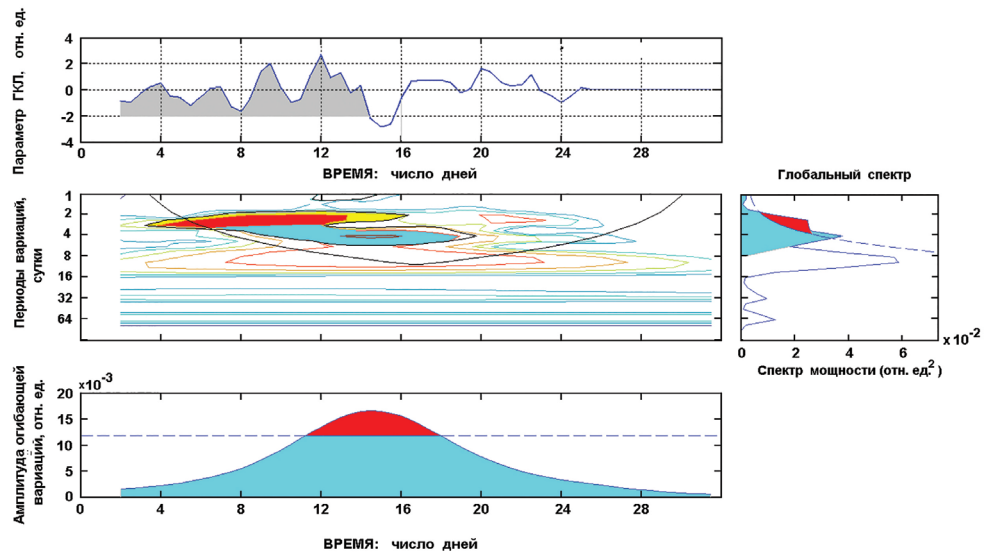
была едва заметной, но начиная со следующих суток 19 октября, началась ее быстрая активизация: 19-20 октября были зарегистрированы большие вспышки класса M1 и X1.

Предвестник 23 октября можно было бы отнести за счет быстрой активизации того же источника (АО № 484), но нельзя исключить и вклад вновь появившейся из-за восточного края лимба Солнца, более мощной АО 486 (из этой активной области 23 октября была зарегистрирована большая вспышка класса X5). Последующие низкие значения параметра флуктуаций 21, 24 и 28-30 октября, констатируют факт диагностики прогнозируемых событий, т.е. регистрацию эффектов Форбуша в интенсивности ГКЛ. Гигантское понижение интенсивности ГКЛ 28-30 октября (как и предшествующее понижение 24-25 октября) обусловлено, скорее всего, кумулятивным эффектом в магнитоплазменном токовом слое,



т.е. гелиосферном токовом слое (ГТС) от серии мощных выбросов корональной массы (СМЕ) обусловленных большими и очень большими вспышками в анализируемый период класса M1-M7 и X10- X17.

Анализ динамики вариаций параметра флуктуаций ГКЛ в октябре 2003 г. осуществляется с помощью вейвлет-анализа. Для этого, рассмотрим все события в целом, в частности, за период с 16.10.2003 – 14.11.2003 по данным ст. Тикси. В результате, получены указания на важную роль процесса нелинейного укручения вариации ГТС: вариация с периодом  $\approx 4$  сут. трансформируется в осцилляцию с *меньшим периодом*  $\approx 2$  сут., но с большей амплитудой (рис. 8.5). Вывод об «осцилляциях» следует из «монокromaticности» вариации: она выделена цветом на диаграмме периодов. Причем, с явным трендом в высокочастотную область: наблюдается *систематическое* смещение периода вариаций ГТС в сторону *меньших* периодов. И так, вплоть до момента расщепления спектральной «линии» осцилляций, который хорошо заметен как на диаграмме развертки спектра во времени, так и на графике глобального спектра в целом за весь анализируемый период (рис. 8.5).



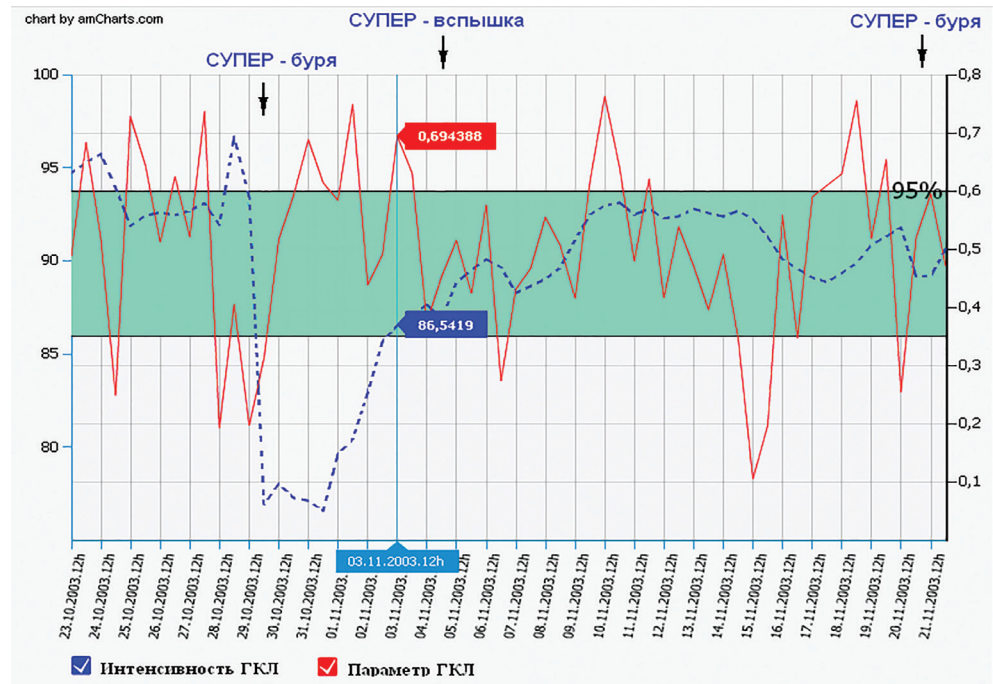
**Рис. 8.5. Иллюстрация процесса нелинейного укручения осцилляций гелиосферного токового слоя в космических лучах в октябре-ноябре 2003 г. по результатам вейвлет – анализа. Осцилляция на диаграмме периодов выделена цветом. В осцилляциях хорошо выражен тренд в высокочастотную область: систематическое смещение периода вариаций в сторону меньших периодов (от 4 до 2 сут). Справа – глобальный спектр осцилляций в целом за анализируемый период. Внизу – огибающая амплитуд осцилляций в относительных единицах.**



В итоге, процесс завершается регистрацией экстремальной по мощности ударной волны (Приложение 8.2 а-д), сопровождающейся не менее экстремальным эффектом Форбуша 28-30 октября 2003 г. (рис. 8.4). В *серийных* событиях, аналогичных экстремальным событиям в октябре-ноябре 2003 г., довольно сложно, а то и просто невозможно отождествить доминирующий источник активности: в это время на видимой части солнечного диска были зарегистрированы 3 мощных активных области (№№ 484, 486 и 488). В подобных случаях определяющую роль играют нелинейные эффекты, приводящие к укрупнению осцилляций – своеобразный аналог «космического цунами» в ГТС.

Наибольшее по амплитуде (с начала 21 века) понижение интенсивности ГКЛ 28-30 октября 2003 г. сопровождается не менее экстремальным радиационным штормом и СУПЕР-бурей. Это подтверждается регистрацией в третьей декаде октября 2003 г. значительного потока штормовых частиц в широком интервале энергий (в том числе, и протонов с энергией  $\sim 1$  МэВ) по данным измерений на американском космическом аппарате ACE, с максимальной величиной потока непосредственно перед эффектом Форбуша 28-30 октября 2003 г. (Приложение 8.2 е). Вертикальными стрелками показано местоположение предвестников. Видно, что предвестники предшествуют **всем** пяти возрастаниям низкоэнергичных частиц. В том числе, и для относительно небольшого события 5 октября 2003 г. В это время (5-6 октября) Земля вошла в *высокоскоростной поток* солнечного ветра из корональной дыры. Это является хорошей иллюстрацией того, что предвестники регистрируются, как перед вспышечными ударными волнами, так и перед высокоскоростными потоками или «струями» солнечного ветра.

Обращает на себя внимание регистрация 3 ноября значимого предвестника перед гигантской рентгеновской вспышкой класса  $\geq X28$  случившейся 4 ноября, т.е. в момент **захода** мощного источника активности за западный край солнечного диска (рис. 8.6). И только местоположение источника не позволило ему проявиться на Земле (<http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=04&month=11&year=2003>) должным образом. Тем не менее, через 2-3 суток после гигантской вспышки 4 ноября, в космических лучах 6-7 ноября было зарегистрировано небольшое понижение интенсивности ГКЛ, что подтверждается заметно сниженным, т.е. *диагностическим* значением параметра флуктуаций ГКЛ в это время (рис. 8.6). Таким образом, одновременная регистрация **6-7.11.2003** и *понижения* интенсивности ГКЛ и *низкого* диагностического значения параметра флуктуаций явилось, своего рода, **маркером** хотя и мощного, но уже не столь геоэффективного, источника активности.

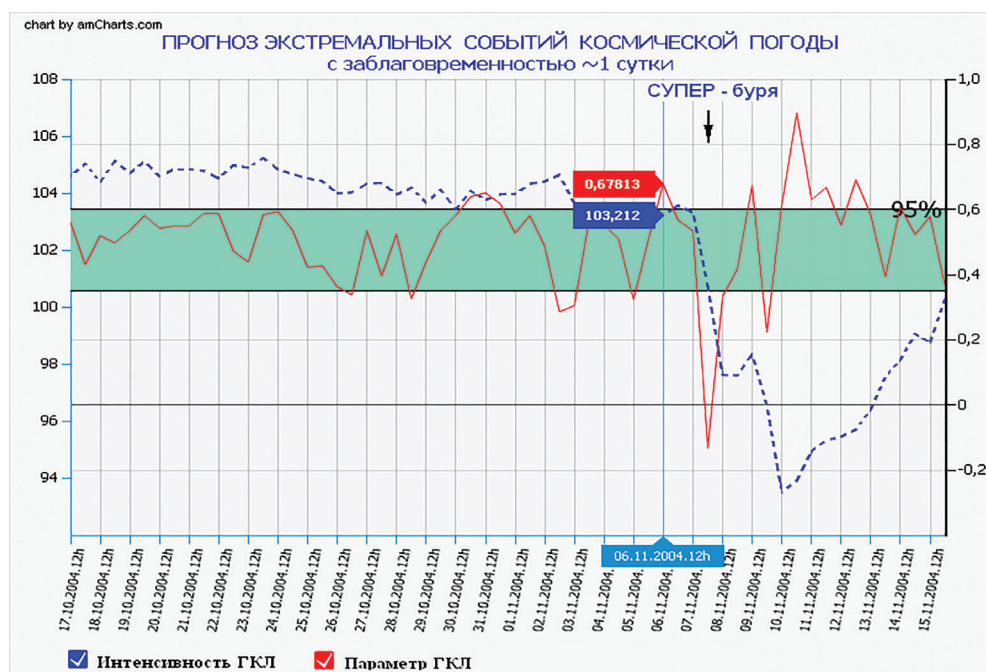


**Рис. 8.6. Результаты расчета параметра флуктуаций на примере экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

Тем не менее, потенциал активности всех трех активных <http://spaceweather.com/archive.php?day=12&month=11&year=2003&view=view> областей сохранился: сообщалось о продолжающейся активности вышеуказанных источников сопровождающейся целой **серией** СМЕ: **6, 7, 9, 11, 12** и **13** ноября. Возможно, что **кумулятивный** эффект от этих серийных выбросов СМЕ и проявился в регистрации **предвестника** в космических лучах **9-10** ноября (рис. 8.6), т.е. до выхода источника активности на видимую часть диска Солнца 14 ноября. Других явных потенциальных источников активности обнаружено не было: поверхность Солнца была, практически, без пятен. Регистрация низкого значения параметра флуктуаций космических лучей 14-15 ноября отражает

результат диагностики крупномасштабного возмущения солнечного ветра на орбите Земли, вероятно, кумулятивного происхождения. С другой стороны, нельзя полностью исключить и возможный вклад высокоскоростного потока солнечного ветра в это время.

Очередной **предвестник 18** ноября был зарегистрирован за сутки до начала СУПЕР-бури **20** ноября (там же, рис. 8.6). СУПЕР-буря 20 ноября имеет, скорее всего, также кумулятивную природу, т.е. является результатом взаимодействия ударных волн после серии СМЕ (<http://spaceweather.com/archive.php?day=19&month=11&year=2003&view=view>) из всех трех АО: 484, 486 и 488. Не менее ярким случаем, подтверждающим кумулятивную природу экстремальных событий Космической погоды, может служить СУПЕР-буря **7-9 ноября 2004 г.**



**Рис. 8.7. Результаты расчета параметра флуктуаций в октябрь-ноябре 2004 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

В интервале с 3-10 ноября были зарегистрированы вспышки класса М и X, сопровождающиеся **серией** (порядка 10!) мощных выбросов корональной массы – СМЕ. Если первый предвестник (31 октября – 1 ноября 2004 г.) сложно отнести конкретно к какой либо АО (№№ 691, 693 или 696), то **предвестник** от 6 ноября (рис. 8.7) можно уже определенно отнести к, практически, единственному источнику (АО 696).

В отличие от событий в октябре-ноябре 2003 г. (когда наблюдались 3 мощных активных области), в событиях первой декады ноября 2004 г. доминировал один источник – АО **696**: были зарегистрированы, по меньшей мере, 3 вспышки класса X, сопровождавшихся **серией** мощных СМЕ [21]. *Сложный* характер взаимодействующих ударных волн на орбите Земли проявился в регистрации 7 и 9 ноября потока штормовых частиц от десятков КэВ до десятков МэВ и последующего *двухступенчатого* эффекта Форбуша 7-10 ноября 2004 г. с амплитудой 7-8%, сопровождавшегося СУПЕР-бурей 7-10 ноября.

Вполне вероятно, что природа всех трех СУПЕР-бурь 30-31 октября и 20 ноября 2003 г., а также 7-9 ноября 2004 г. имеет общее, кумулятивное происхождение: как результат взаимодействия догоняющих (в среде с **убывающей** «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. В таком случае, вряд ли имеет смысл искать ту «единственную» гигантскую вспышку, которая могла бы привести к любому, из указанных выше, экстремальных событий Космической погоды.

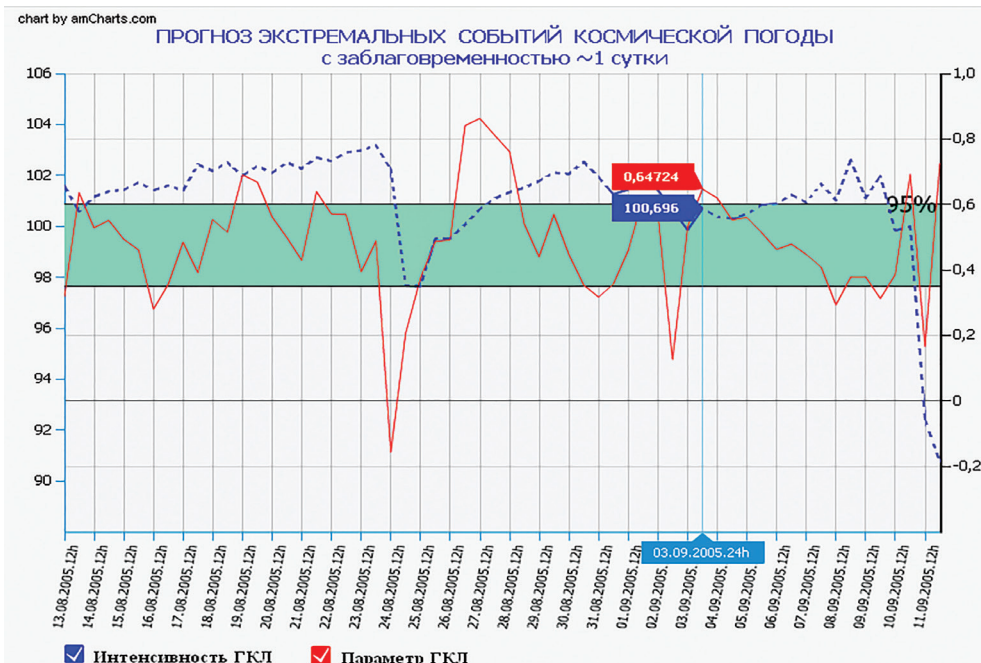
### 8.3. Загоризонтное обнаружение мощного источника активности на Солнце по эффекту «гало» в космических лучах.

Очевидно, что отождествление источника активности по космическим лучам желательнее проводить при единственной и мощной активной области, как это наблюдалось нами в обсерватории Тикси в июле 1982 г. [22]. Тогда это был первый случай обнаружения предвестника от единственного и мощного источника активности, выходящего 7 июля на восточный край солнечного диска по эффекту «гало» в космических лучах. Указанные выше условия очевидно должны выполняться на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла, когда число пятен уже значительно меньше, чем в максимуме 11-летнего цикла, а вероятность доминирования **мощной** и **единственной** активной области еще достаточно велика.

Подобные благоприятные условия для надежного отождествления источника активности сложились с августа на сентябрь 2005 г., когда максимум 11-летнего цикла (2000-2001 гг.) был уже пройден. Причем, эволюцию активной области № 798 удалось проследить с момента ее



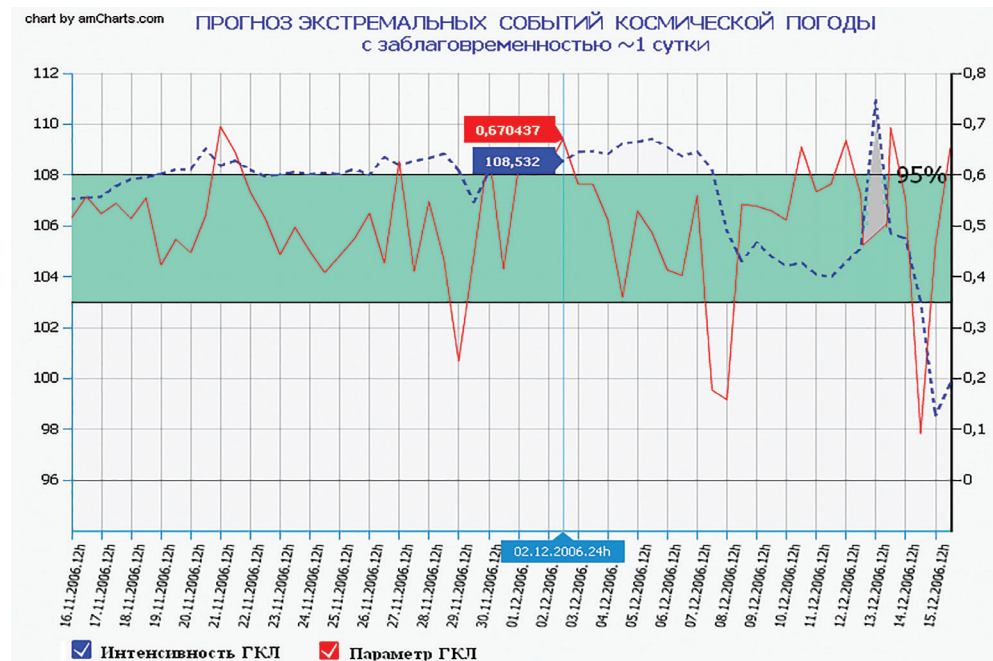
зарождения 19 августа на, практически, чистом диске Солнца с последующим ее проявлением в виде форбуш-понижения в интенсивности ГКЛ 24-25 августа и ее уходом 25 августа на невидимую часть диска Солнца. Примечательно, что еще до следующего выхода на видимую часть диска Солнца (<http://spaceweather.com/archive.php?day=03&month=09&year=2005&view=view>) активность указанного источника только *возрастала*. В начале сентября наблюдались большие вспышки, сопровождаемые CME (<http://spaceweather.com/archive.php?day=-06&month=09&year=2005&view=view>). 3 сентября был зарегистрирован предвестник в космических лучах (рис. 8.8). Выход источника на восточный лимб Солнца 7 сентября (<http://spaceweather.com/archive.php?day=07&month=09&year=2005&view=view>) сопровождался гигантской



**Рис. 8.8. Результаты расчета параметра флуктуаций в августе–сентябре 2005 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

**вспышкой** класса **X17**. Систематическое понижение параметра флуктуаций вплоть до регистрации диагностических значений 8-9 сентября, завершилось предвестником **10** сентября, с последующей регистрацией большого эффекта Форбуша 11-12 сентября.

Аналогичная благоприятная ситуация сложилась также в первой половине декабря 2006 г. Действительно, начиная с третьей декады ноября 2006 г., после ухода 21 ноября крупной, но неактивной области № 923 на невидимую с Земли часть солнечного диска, поверхность Солнца в течение недели оставалась, практически, вообще без пятен. Лишь в последнюю неделю ноября появилось две *неактивных* группы пятен (926 и 927). Активность в третьей декаде ноября определяли только корональные дыры, давая лишь незначительный вклад в модуляцию интенсивности ГКЛ в это время (рис. 8.9).



**Рис. 8.9.** Результаты расчета параметра флуктуаций в ноябре-декабре 2006 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK.

По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.



Возвращение (неактивной на предыдущем солнечном обороте) области № 923, но уже под новым номером № **930**, ознаменовалось *усилением* активности еще до ее выхода с 4 на 5 декабря на видимую восточную часть солнечного диска, когда была зарегистрирована мощная рентгеновская вспышка класса **X9**. 2 декабря началась серия усиливающихся по мощности рентгеновских вспышек, которая 5-7 декабря завершилась большими и очень большими вспышками класса М и **X**. *Монотонный* характер роста усиления вспышечной активности с 2-7 декабря и сама *серийность* событий позволяет <http://spaceweather.com/archive.php?day=05&month=12&year=2006&view=view> говорить, что источник был *единым*. В данном случае, это АО № 930. В то же время, неактивный характер области 926 по данным солнечных наблюдений, отмечается на том же сайте по Космической погоде. О неактивном характере двух других областей (АО 927 и 928) говорилось выше.

Таким образом, данное событие в достаточной степени удовлетворяет условиям идентификации источника активности. Значимый **предвестник** был зарегистрирован 2 декабря 2006 г., т.е. за время  $\approx 2$  суток до выхода мощной АО 930 на видимую часть диска Солнца с 4 на 5 декабря (рис. 8.9). Активная область 930 в момент ее выхода на видимую восточную часть солнечного диска с 4 на 5 декабря, уже была экстремально активной: со 2-7 декабря регистрировалась *серия растущих по мощности* рентгеновских вспышек класса С, М и **X**, сопровождавшихся штормовыми частицами космических лучей в достаточно широком диапазоне энергий (от 100 КэВ до 100 МэВ).

Дальнейшее развитие событий происходило следующим образом: с 7-12 декабря началось продолжительное форбуш-понижение интенсивности ГКЛ и геомагнитные бури. **10-12**, и **13** декабря были зарегистрированы **предвестники** с последующим эффектом Форбуша 14-17 декабря с амплитудой  $\approx 7\%$ , сопровождавшимся мощной геомагнитной бурей ( $K_p=8$ ). Данное усиление активности связывается (<http://spaceweather.com/archive.php?day=14&month=12&year=2006&view=view>) с большими вспышками класса **X**, возрастанием штормовых частиц 13-15 декабря, а также *наземным* возрастанием СКЛ 13 декабря, т.е. частиц с энергией порядка  $\sim 1$  ГэВ (заштрихованная область на рис. 8.9).

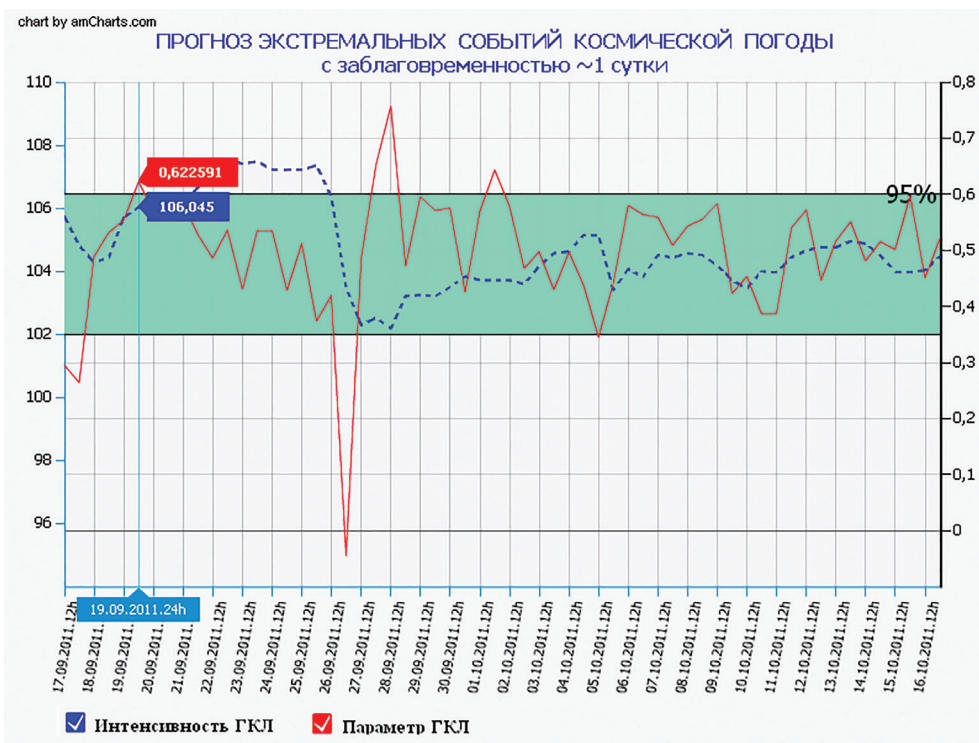
Предвестник 02.12.2006 примечателен также тем, что по данным спутниковых измерений в это время отсутствует поток низкоэнергичных частиц, в том числе и с энергией порядка  $\sim 1$  МэВ. Это важно иметь в виду в связи с тем, что время от времени поднимается вопрос об источнике модуляции флуктуаций ГКЛ. 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.

Таким образом, *достаточным* условием для регистрации коррелированных флуктуаций космических лучей является наличие крупномасштабного возмущения солнечного ветра, в частности – ударной волны с турбулентной структурой на ее фронте (“sheat”). Этот вывод подтверждается данными прямых измерений: коррелированные флуктуации ГКЛ в большинстве случаев регистрируются при наличии достаточного ( $\geq 15$  nT) возмущения ММП, градиентов скорости и плотности плазмы солнечного ветра. И, что важно, часто при *отсутствии* потоков низкоэнергичных частиц. И, наоборот, в отсутствие достаточных возмущений ММП и сколько-нибудь значительных градиентов скорости и плотности солнечного ветра, значимые флуктуации интенсивности ГКЛ, как правило, отсутствуют, притом, что в это время может регистрироваться поток низкоэнергичных частиц.

Очевидно, что для надежной идентификации источника активности было бы желательно исключить рекуррентные высокоскоростные потоки или «струи» солнечного ветра. Подобный редкий случай представился в сентябре 2011 г., когда активизация мощного источника активности (АО 1302) на невидимой с Земли стороне Солнца проходила, фактически, в отсутствие корональных (<http://spaceweather.com/archive.php?day=22&month=09&year=2011&view=view>) дыр. Активизация источника проявилась в регистрации больших вспышек класса М и X, сопровождавшихся серией СМЕ начиная с 19 сентября и далее, по мере выхода АО 1302 на видимую часть диска Солнца 22 сентября и ее дальнейшего продвижения к центральному меридиану 25-26 сентября, когда в космических лучах был зарегистрирован эффект Форбуша. Вариации параметра флуктуаций ГКЛ в конце сентября и в начале октября отражают проявление «афтершоковой» активности того же источника.

Как и в предыдущих случаях, из-за серийности СМЕ их проявление в космических лучах носит скорее кумулятивный характер: это касается как формирование **предвестника** от **19** сентября, так и последующего эффекта Форбуша **25-26** сентября (рис. 8.10). И в данном случае, низкое диагностическое значение является **маркером** эффекта Форбуша в интенсивности ГКЛ. Это подтверждается результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах США, Stereo-A и Stereo-B (Приложение 8.3). Мощная ударная волна от СМЕ регистрируется на орбите Земли также **26** сентября, которая показана желтым кружком на горизонтальной оси.



**Рис. 8.10. Результаты расчета параметра флуктуаций в сентябре-октябре 2011 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

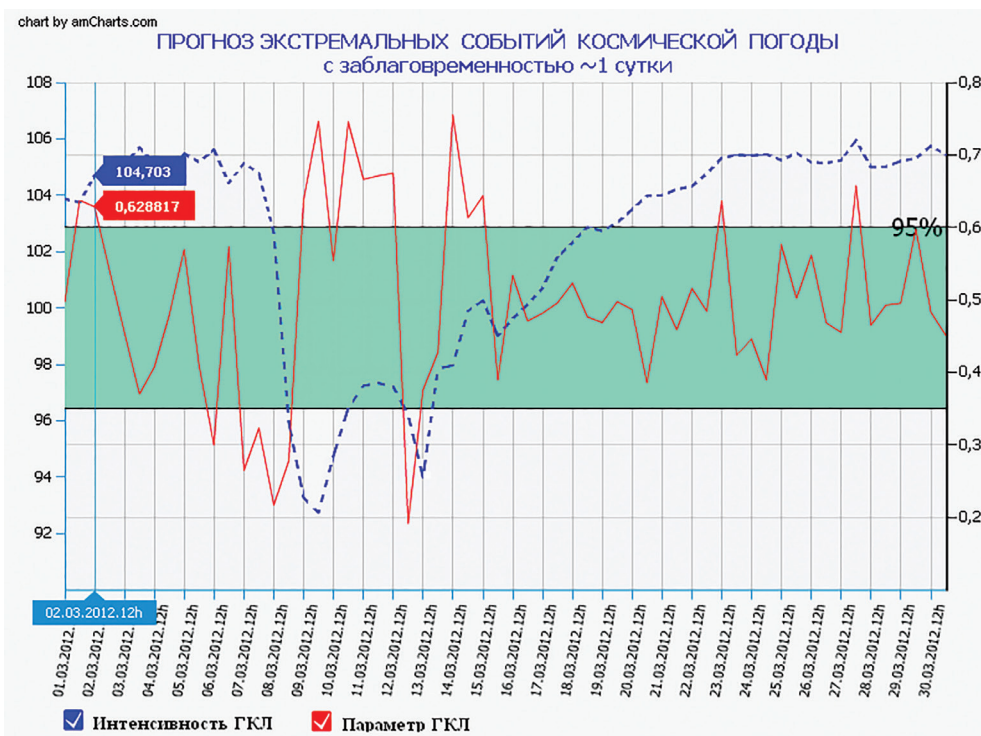
Не менее благоприятные условия для идентификации источника активности сложились в начале марта 2012 года. Единственное и неактивное солнечное пятно вблизи центрального меридиана, средние значения скорости солнечного ветра и значения геомагнитного индекса  $Kp=4$  указывали на слабо возмущенные условия в солнечном ветре. С другой стороны, АО 1429 уже была активной, когда 3 марта (<http://spaceweather.com/archive.php?day=03&month=03&year=2012&view=view>) она появилась на *восточном краю* солнечного диска. С 1-2 марта началась активизация источника: 2 марта 2012 г. была зарегистрирована большая *залимбовая* вспышка класса M3, сопровождающаяся

корональным выбросом – СМЕ. В космических лучах все это проявилось в регистрации **предвестника 1-2** марта 2012 г. (рис. 8.11), а с 3-8 марта регистрировались уже *низкие*, т.е. *диагностические* значения параметра флуктуаций ГКЛ с явно выраженным эффектом Форбуша 7-10 марта. Чередование высоких и низких значений параметра флуктуаций (с 3-8 марта) отражает вариации степени неоднородности ММП. В это время регистрировались большие вспышки (класса M2 и X5) и серия СМЕ (<http://spaceweather.com/archive.php?day=07&month=03&year=2012&view=view>).

Продолжающаяся активность того же источника 9-10 марта (<http://spaceweather.com/archive.php?day=09&month=03&year=2012&view=view>) 2012 г. явилась причиной небольшого (повторного) понижения в интенсивности ГКЛ с **11** на **12** марта 2012 г., что согласуется с *низким диагностическим* значением параметра флуктуаций ГКЛ (рис. 8.11). Это подтверждается результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах США, Stereo-A и Stereo-B (Приложение 8.4). Ударная волна от СМЕ регистрируется на орбите Земли, которая показана желтым кружком на горизонтальной оси, также с **11** на **12** марта 2012 г., т.е. *низкое диагностическое* значение параметра флуктуаций ГКЛ действительно является **маркером** ударной волны от 11-12 марта. Предвестник данного повторного понижения интенсивности ГКЛ с 11 на 12 марта был зарегистрирован 10-11 марта (рис. 8.11).

Область 1429 оставалась активной и в момент ее выхода 15 марта на западный край диска Солнца. **Предвестник** был зарегистрирован **14** марта (рис. 8.11). И только местоположение активной области на (западном) краю солнечного диска не позволило ей должным образом проявиться в интенсивности ГКЛ. Предвестник 14 марта, в данном случае сыграл роль **маркера** небольшого понижения в интенсивности ГКЛ 15 марта, сопровождавшегося резким спадом параметра флуктуаций с 14 на 15 марта (рис. 8.11). Данное понижение обусловлено приходом на орбиту Земли ударной волны от СМЕ из АО **1429** вышедшей, к тому времени, на западный лимб Солнца. Несмотря (<http://spaceweather.com/archive.php?day=15&month=03&year=2012&view=view>) на то, что воздействие от сильной ударной волны было *касательным*, регистрация на Земле ударной волны сопровождалась геомагнитной бурей с величиной  $K_p=6$ . Наличие подобного маркера-предвестника **23** марта (рис. 8.11) позволяет утверждать о сохранении активности и на «обратной» стороне Солнца. Действительно, только с 23 по 26 марта (<http://spaceweather.com/archive.php?day=24&month=03&year=2012&view=view>) было зарегистрировано не менее 4-х мощных выбросов СМЕ.



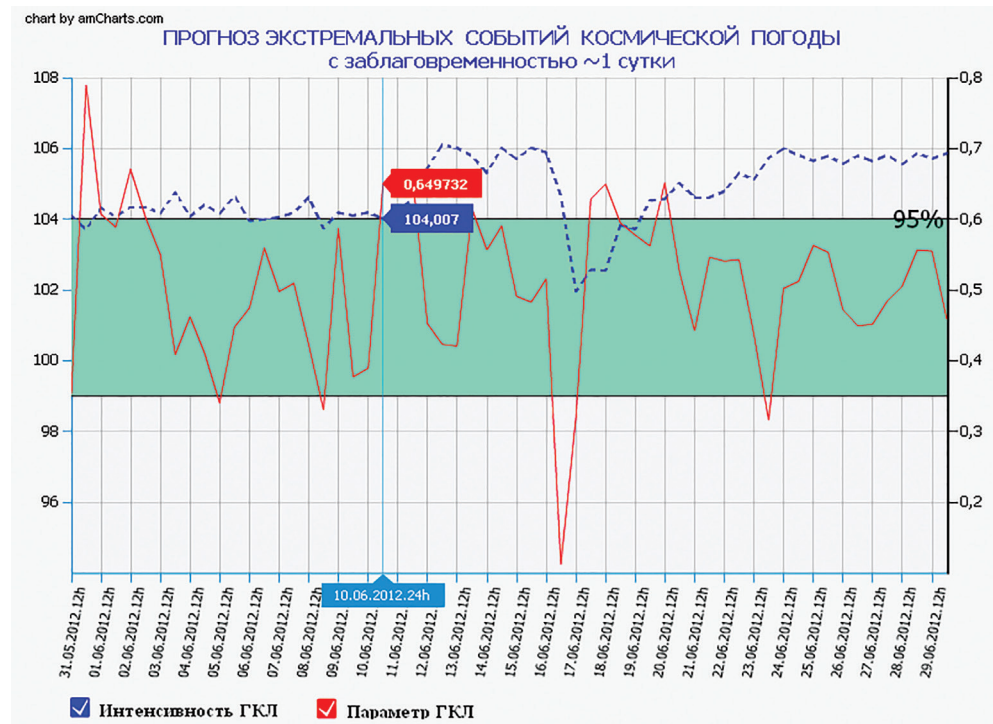


**Рис. 8.11. Результаты расчета параметра флуктуаций в марте 2012 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

Повторное обнаружение того же мощного источника активности из АО 1429 в космических лучах за *восточным* краем солнечного диска (Приложение 8.5) проявилось в регистрации **предвестника** через один оборот Солнца **27** марта. (рис. 8.11). В период с 24-27 марта на видимой части солнечного диска не было зарегистрировано ни активных групп пятен, ни больших солнечных вспышек, ни активных корональных дыр. И, наоборот, *перед* выходом АО 1429 на видимую часть солнечного диска 26 марта было зарегистрировано очередное (<http://spaceweather.com/archive.php?day=27&month=03&year=2012&view=view>) мощное, **11-е** по счету СМЕ. В данном случае, роль маркера того же источника активности из АО 1429 (*перед его выходом* на видимую часть солнечного диска)

сыграли высокие значимые значения параметра флуктуаций ГКЛ в виде предвестника от 27 марта.

Не менее благоприятные условия для идентификации источника активности на Солнце сложились в июне 2012 г.: рекуррентная «струя» солнечного ветра доминировала лишь в начале июня. Ее прохождение проявилось в космических лучах в регистрации низких значений параметра флуктуаций в первую неделю июня. Регистрация значимого **предвестника 10 июня 2012 г.** (рис. 8.12) пришлось на момент выхода на восточную часть диска Солнца активной области 1504, сопровождающейся вспышками класса М, которые 13 июня завершились выбросом корональной массы СМЕ. Повторное СМЕ было зарегистрировано на следую-



**Рис. 8.12. Результаты расчета параметра флуктуаций в мае-июне 2012 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

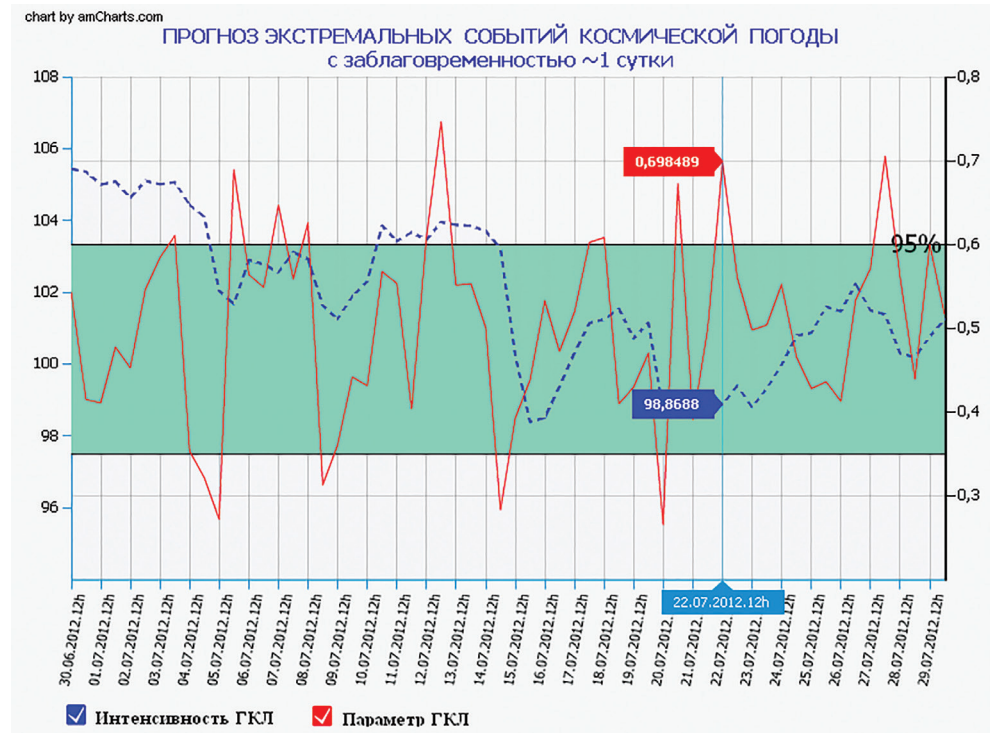


щие сутки – 14 июня (Приложение 8.6). Приход ударной волны на орбиту Земли проявился в космических лучах в виде низкого значимого значения в параметре флуктуаций ГКЛ 16 июня, одновременно с регистрации эффекта Форбуша (рис. 8.12). Это подтверждается результатами моделирования **проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным прямых измерений на космических аппаратах США** (Приложение 8.7). Что одновременно указывает на хорошие диагностические возможности параметра флуктуаций ГКЛ: *низкие* значения параметра играют роль надежного **маркера** регистрации ударной волны на орбите Земли.

Наиболее интересный случай обнаружения *залимбового* источника активности по космическим лучам, но уже за *западным* краем солнечного диска, имел место в третьей декаде июля того же 2012 года. Предыстория развития данного, своего рода – уникального события, такова: начиная со второй декады июля 2012 г., на видимой части солнечного диска доминировала мощная активная область 1520. Отсутствовали и корональные дыры, как потенциальные источники проявлений солнечной активности.

Первое понижение со своим предвестником от 3.07.2012 г., было обусловлено прохождением центрального меридиана активной (<https://spaceweather.com/archive.php?day=02&month=07&year=2012&view=view>) области 1515. Второе форбуш-понижение понижение с 7 на 8 июля, явилось следствием вспышечной активности той же области 1515, сопровождаемой серией выбросов корональной массы с 4 по 7 июля (<https://spaceweather.com/archive.php?day=05&month=07&year=2012&view=view>) 2012 г. Предвестник был зарегистрирован с 5-7 июля (рис. 8.13). И в этом случае, низкие диагностические значения параметра флуктуаций 4 и 7-8 июля являются маркерами регистрации прихода ударных волн на орбиту Земли (Приложение 8.8).

Выход новой активной области 1520 и ее последующее продвижение к центральному меридиану сопровождался мощными <https://spaceweather.com/archive.php?day=12&month=07&year=2012&view=view> вспышками класса М и Х. Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 12 июля 2012 (рис. 8.13). Эффект Форбуша в интенсивности ГКЛ начался с **14** июля. На что указывают низкое, т.е. диагностическое значение параметра флуктуаций ГКЛ 14 июля, которое играет роль **маркера** прихода ударной волны на орбиту Земли (рис. 8.13). Это подтверждается результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B (Приложение 8.9): действительно, ударная волна от СМЕ вблизи центрального меридиана регистрируется на орбите Земли также 14 июля 2012 г.



**Рис. 8.13. Результаты расчета параметра флуктуаций в июне-июле 2012 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

Низкие значения параметра флуктуаций 18-20 июля отражают факт регистрации затянутого понижения в интенсивности ГКЛ, обусловленного прохождением орбиты Земли нескольких замедленных (“slow explosion”) выбросов корональной массы Солнца (<http://spaceweather.com/archive.php?day=18&month=07&year=2012&view=view>). И в этом случае низкое диагностическое значение параметра флуктуаций с 19 на 20 июля сыграло роль **маркера** небольшого понижения в интенсивности ГКЛ – **19-20** июля (рис. 8.13). Это в очередной раз подтверждает результаты моделирования по данным измерений на космических

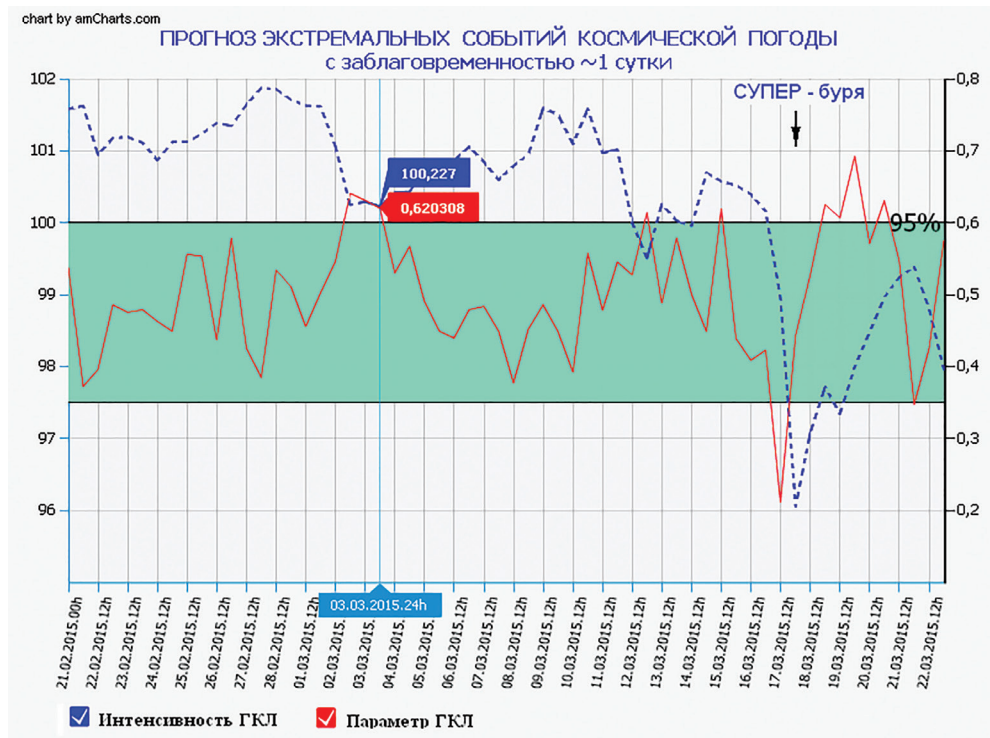
аппаратах Stereo-A и Stereo-B: ударная волна от «замедленных» СМЕ на орбите Земли регистрируется также **20** июля (Приложение 8.10). Небольшая величина понижения в интенсивности ГКЛ обусловлена тем, что источник активности находился уже далеко от центрального меридиана. Точнее, вблизи западного края солнечного диска, в результате чего Земля оказалась в зоне лишь касательного воздействия ударной волны (от серии «замедленных» СМЕ).

Так случилось, что наиболее экстремальные проявления активности Солнца наблюдались в начале третьей декады июля 2012 г. 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 предвестников в параметре флуктуаций ГКЛ – **20** и **22** июля (рис. 8.13). Активных групп пятен с большими вспышками и геоэффективных корональных дыр на видимой части солнечного диска 21-22 июля зарегистрировано не было. Следовательно, мы имеем дело с проявлением нелокальных свойств космических лучей от мощного **залимбового**, в данном случае, западного источника (<http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=19&month=07&year=2012>) активности, см. также Приложение 8.11 (<http://spaceweather.com/archive.php?day=-23&month=07&year=2012&view=view>). Так в параметре флуктуаций ГКЛ был зарегистрирован **предвестник самой мощной ударной волны, и не только в текущем 24 цикле!** Согласно известной диаграмме встречаемости скоростей в солнечном ветре, подобные экстремальные ударные волны со скоростями от 3000 км/с и выше, очень редкое событие (*Extremely Rare events* – Приложение 8.12).

По мнению ряда авторов, уникальное событие 23-24 июля 2012 г. относится к уровню СУПЕРШТОРМА, подобно известному «событию Кэррингтона» 1859 г. [23]. Таким образом, в 21 веке нашей цивилизации повезло, как минимум, дважды. В начале ноября 2003, когда гигантская вспышка в рентгене класса **X28** произошла, фактически, сразу после **захода** активной области за западный край солнечного диска (см. рис. 8.6) и в начале третьей декады июля 2012 г., когда очередная активизация источника из активной области 1520 случилась уже на **невидимой** с Земли стороне Солнца. Но поскольку уповать на подобное «везение», по меньшей мере, наивно, сама возможность осуществления прогноза, точнее, раннего обнаружения экстремальных, в том числе – залимбовых, событий Космической погоды по эффекту «гало» в космических лучах представляется весьма своевременной.

Конечно, СУПЕР-события достаточно редкое явление. Но источником подобных, хотя и менее грандиозных событий, может оказаться **кумулятивный** эффект (см. Приложения 8.6-8.7) от серийных событий,

о котором уже говорилось выше. Ярким примером этого эффекта может оказаться **самая мощная** магнитная буря в текущем ([http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/201503/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201503/index.html)) 24 цикле 17-18 марта 2015 г. Ее источник был **единственным** – это активная область <http://spaceweather.com/archive.php?day=05&month=03&year=2015&view=view> № **2297**. Она была источником больших вспышек и серии СМЕ. Причем, еще до ее выхода 7 марта на видимую часть солнечного диска (<http://spaceweather.com/archive.php?day=06&month=03&year=2015&view=view>). Повышенная активность источника сохранялась, как в момент

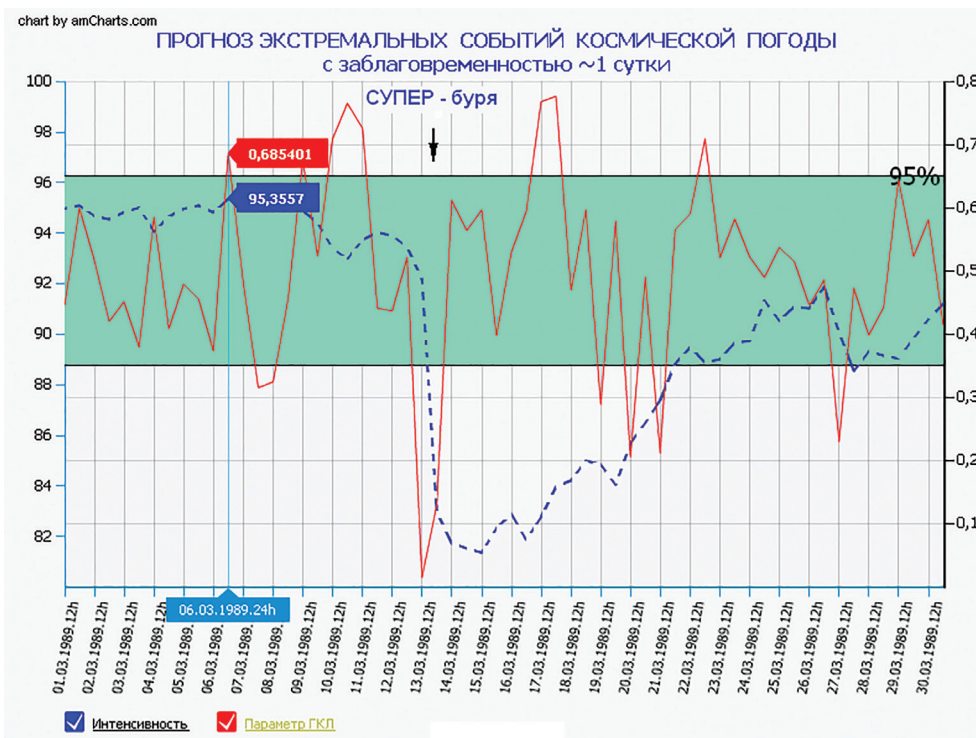


**Рис. 8.14. Результаты расчета параметра флуктуаций в февралемарте 2015 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<http://www.nmdb.eu>) посредством роботизированной экспертной системы: <http://www.forshock.ru/pred.html> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**



выхода, так и далее, по мере прохождения его по диску Солнца с 9-15 (http://spaceweather.com/archive.php?day=11&month=03&year=2015&view=view) марта. Предвестники в параметре флуктуаций космических лучей были зарегистрированы 2-3, 12 и 14-15 марта, с последующим эффектом Форбуша 16-18 марта 2015 г. (рис. 8.14).

Распространение ударных волн (в среде, с «раз за разом» **уменьшающейся** плотностью) приводит к кумулятивному эффекту **усиления** ударных волн на орбите Земли и последующему экстремальному событию в Космической погоде: значительным потоком, так называемых, штормовых частиц в широком интервале энергий (от десятков КэВ до



**Рис. 8.15. Результаты расчета параметра флуктуаций во время СУПЕР-бури 13-15 марта 1989 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (http://www.nmdb.eu) посредством роботизированной экспертной системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале:  $0,35 < P < 0,60$  – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день – час.**

десятков МэВ) и большой геомагнитной буре. Хорошей иллюстрацией сказанному может служить СУПЕР-буря 13-15 марта 1989 г., известное как «Квебекское» (Канада) событие. И в этом случае, предвестник в космических лучах был зарегистрирован 6 марта 1989 г., т.е. еще на стадии выхода активной области № 5395 на видимую часть диска Солнца (рис. 8.15). Весь период прохождения указанной АО, от момента ее выхода и далее, сопровождался серией мощных рентгеновских вспышек класса X. Значимые предвестники были зарегистрированы 9-10 марта, непосредственно перед началом гигантского эффекта Форбуша 12-17 марта 1989 г. Полученный в данной работе вывод о важной роли кумулятивного эффекта от серии ударных волн подтверждается и современными данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах [24].

#### 8.4. О природе переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

*«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.

Выше уже отмечался самоподобный или фрактальный характер магнитного поля на переходном режиме солнечного ветра. На это указывает как степенной характер зависимости числа понижений интенсивности ГКЛ от их амплитуды (см. п. 2), так и низкое и конечное ( $d=2,5-3$ ) значение корреляционной (фрактальной) размерности процесса на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности [12-13].

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 при нормальной диффузии), но и от ее значений в **удаленных** точках пространства [25]. 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 движением» [26].



Таким образом, нелокальные особенности поведения космических лучей в окрестности крупномасштабного возмущения (ударной волны) с фрактальными свойствами замагниченной среды имеют место, как в пространстве, так и во времени. Очевидно, можно сделать вывод, что нелокальность космических лучей в окрестности фронта ударной волны обусловлена фрактальностью замагниченной среды находящейся в состоянии «**самоорганизованной критичности**»: в этом *физическая сущность* переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

На нелокальность и нелинейность процессов, особенно в случае мощных событий на Солнце, указывалось в [27]: «...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...» [27]. Подобное же, по сути, утверждение о нелокальности, было выдвинуто ранее Гневывшевым М.Н., отмечается в [28]: «... физически связанные солнечные процессы обязательно должны происходить одновременно».

И в заключение, важно отметить следующее обстоятельство: для обнаружения невидимого с Земли источника активности на Солнце США осуществили запуск на специальную орбиту два весьма дорогостоящих космических аппарата Stereo-A и Stereo-B. Ту же самую задачу «загоризонтного» обнаружения мощного источника активности ЗА лимбом Солнца, мы решаем дистанционным методом диагностики околоземного космического пространства, посредством созданной нами **роботизированной** экспертной системой Cyber-FORSHOCK на базе уже существующей мировой сети высокоширотных станций космических лучей [22]. В нашем случае, планета Земля, вместе с работающими на прием космической радиации высокоширотными станциями (порядка ~10), представляет собой ЕДИНЫЙ «прибор»!

### Резюме к главе 8

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

8.2. Траектории космических лучей в возмущенных фрактальных магнитных полях существенно отличаются от броуновских траекторий обычной диффузии, что и обуславливает **нелокальные** свойства космических лучей во *фрактальной* замагниченной среде в окрестности фронта крупномасштабного возмущения – ударной волны.

8.3. Нелокальность космических лучей проявляется в кластеризации фазового объема космических лучей: регистрации *коррелированных* флуктуаций в виде *пучков* частиц – эффект «**гало**» в космических лучах в окрестности фронта межпланетной ударной волны. Наиболее ярко эффект «гало» проявляется в случае «загоризонтного» обнаружения *мощного* источника ЗА лимбом Солнца.

8.4. Получены указания на важную роль процесса нелинейной динамики осцилляций магнитоплазменного токового слоя (ГТС) за счет вклада **кумулятивного** эффекта взаимодействующих ударных волн от серии выбросов корональной массы (СМЕ) во время активной фазы солнечного цикла. Весьма вероятно, что природа экстремальных событий Космической погоды имеет общее, кумулятивное происхождение: как результат взаимодействия «догоняющих» (в среде с **убывающей** «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. *Это подтверждается данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах* [24].

8.5. В режиме **реального** времени реализован способ *раннего* обнаружения межпланетных ударных волн (в том числе от мощного залимбового источника) с заблаговременностью порядка ~1 суток на базе супермониторинга космических лучей по данным мировой сети высокоширотных станций (<http://www.nmdb.eu>). Способ реализован **в виде** (<http://www.forshock.ru/pred.html>) **роботизированной экспертной системы** «Cyber-FORSHOCK» с вероятностью прогноза геоэффективных событий Космической погоды **≈80%**.

### Литература к главе 8

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики / Методологические проблемы развития науки в регионе. Новосибирск: изд-во Наука. С. 175-176. 1987.
2. Крымский Г.Ф., Транский И.А. Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре / Динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 154-198. 1973.
3. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 2, С. 196-200. 1974.
4. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 3. С. 407-410. 1974.
5. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Шафер Г.В. и др. Модели ударных волн и наблюдаемые свойства форбуш-эффектов / Исследования по космофизике и аэрономии. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 58-68. 1975.
6. 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: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 27-49. 1977.
7. Kamoldinov S.M. et al. The Influence of Magnetic "Corks" upon the Galactic Cosmic Ray Distribution / Proc. 14 ICRC. Munchen. Vol.3. P. 838-843. 1975a.
8. Айманова Г.К., Демченко Б.И., Макаренко Н.Г. Прикладные методы топологической динамики. 2. Численный анализ хаоса / Препринт Астрофизического Института им. В.Г. Фесенкова № 90-03. С. 52. 1990.
9. Рабинович М.И. Нелинейная динамика и турбулентность / Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: изд-во Наука. С. 50-60. 1989.
10. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. Et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease / Proceed. 21 ICRC. Adelaide. Vol.6. P. 217-219. 1990.
11. Lindsay G.M., Russel C.T., Luhman J.G. et al. On the Sources of Interplanetary Shocks at 0.72 AU // J. Geophys. Res. Vol. 99. NA1. P. 11-17. 1994.
12. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 95-99. 1999a.

13. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронаука*. Т. 39. № 1. С. 100-104. 19996.
14. Dennis B.R. Solar hard X-ray bursts // *Solar Physics*. V. 100. P. 465-490. 1985.
15. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // *Phys. Rev. V. 38, N 1*, p. 364-374. 1988.
16. Bak P. HOW NATURE WORKS. The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996.
17. Подлазов А. В., Осокин А. Р. «Самоорганизованная критичность эруптивных процессов в солнечной плазме / Матем. Моделирование». Том 14, номер 2, 118–126. 2002.
18. Козлов В.И., Козлов В.В. АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН. 220 с. 2016.
19. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: изд-во Финансы и статистика. 313 с. 1983.
20. Козлов В.И., Козлов В.В. Параметр флуктуаций галактических космических лучей – индикатор степени неоднородности магнитного поля // *Геомагнетизм и аэронаука*. Т. 51. № 2. С. 191-201. 2011.
21. Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Zastenker G.N. et al. A Year Later: Solar, Heliospheric, and Magnetospheric Disturbances in November 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 45, No. 6, 2005, pp. 723–763.
22. Kozlov V.I., Kozlov V.V. ARRHYTHMIA OF THE SUN. In cosmic rays. Yakutsk: publishing house FGBUN IMZ SB RAS. IKFIA SB RAS. 200 p. 2018.
23. Baker D.N. et al. A major solar eruptive event in July 2012: defining extreme space weather scenarios // *Space Weather*. Vol. 11, P. 585-591. Doi:10.1002/swe.20097, 2013.
24. Erka Lumme, Emilia Kilpua, Erika Palmerio et al. "Multipoint Observations of the June 2012 Interacting Interplanetary Flux Ropes". July 2019. DOI: 10.3389/fspas.2019.00050.
25. Учайкин В.В. Стохастические модели в кинетической теории космических лучей. Ульяновск: изд-во УлГУ. С. 539. 2011.
26. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: изд-во ПОСТМАРКЕТ. С. 270. 2000.
27. 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*. Т. 42. № 5. С. 453-508. 2004.

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

Авторы выражают искреннюю признательность и благодарность Илье Усоскину, Университет г. Оулу, геофизическая обсерватория Соданкила (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) за любезно предоставленные кондиционные 5 минутные данные измерений нейтронного монитора ст. Оулу за длительный период времени.

## ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 8

### Приложение 8.1

Математические выражения, определяющие функцию Риска используемые при расчете ПАРАМЕТРА флуктуаций космических лучей по значениям параметров формы ( $c$ ), масштаба ( $b$ ) и сдвига ( $\theta$ ).

Функция распределения Вейбулла:

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

где

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

$b$  - параметр масштаба

$c$  - параметр (формы)

$\theta$  - параметр положения

Плотность распределения Вейбулла:

$$f(x) = \frac{c}{b} \left[\frac{x-\theta}{b}\right]^{c-1} \exp\left\{-\left[\frac{x-\theta}{b}\right]^c\right\}$$

Функция надежности:

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

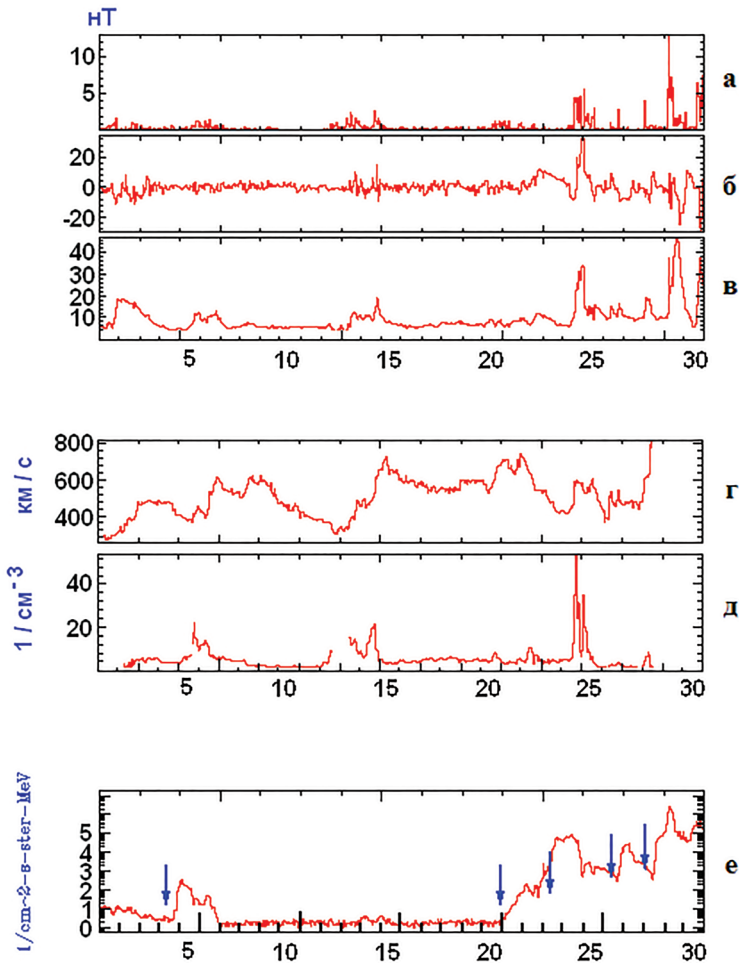
Функция **РИСКА !**

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



Приложение 8.2

Данные измерений дисперсии  $\sigma_V$  – а, Vz-компоненты – б и модуля  $|V|$  межпланетного магнитного поля – в, скорости  $V$  – г и плотности  $\rho$  – д плазмы солнечного ветра с 01-30 октября 2003 г. на космическом аппарате ACE. Потоки «штормовых» частиц – е зарегистрированные в третьей декаде октября (21-30 октября) 2003 г. по данным прямых измерений на американском космическом аппарате ACE.

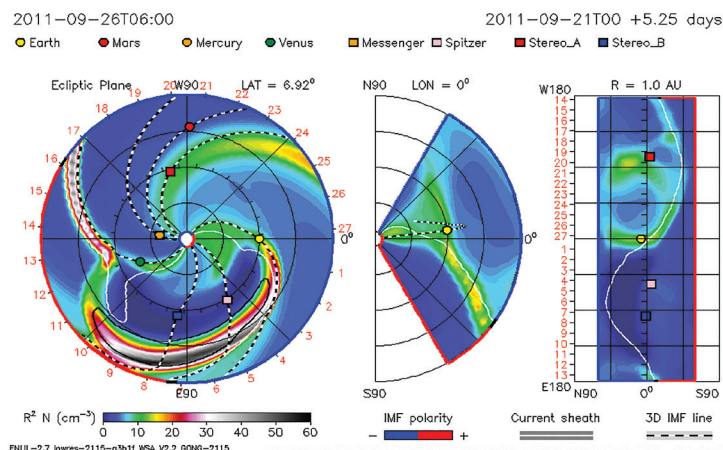


ВРЕМЯ: 01 - 30 октября 2003 г.

<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>

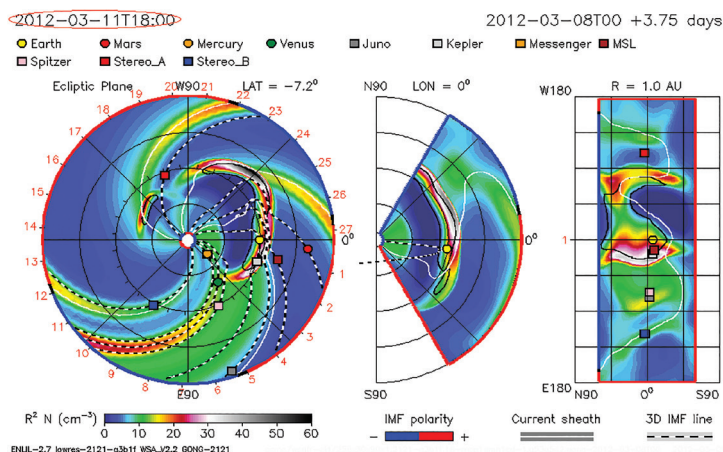
### Приложение 8.3

Анимационная схема динамики экстремального события 25-26 сентября 2011 г., на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Мощная ударная волна от СМЕ (<https://spaceweather.com/archive.php?day=22&month=09&year=2011&view=view>) зарегистрирована на орбите Земли 25-26 сентября. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



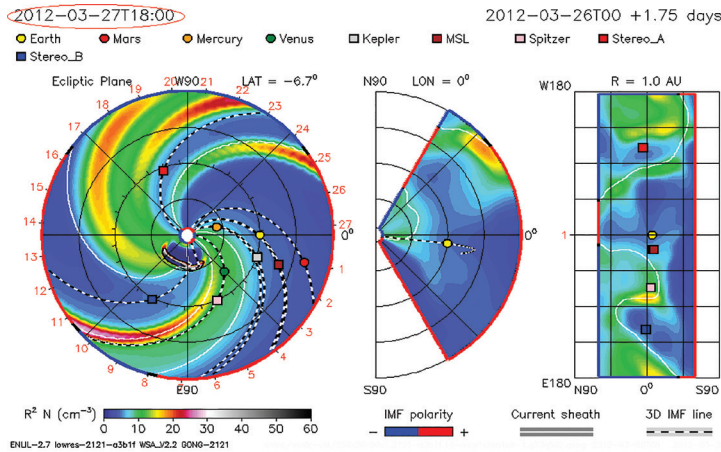
### Приложение 8.4

Анимационная схема динамики экстремального события 12 марта 2012 г., на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Мощная ударная волна от СМЕ зарегистрирована на орбите Земли 11-12 марта 2012 г. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



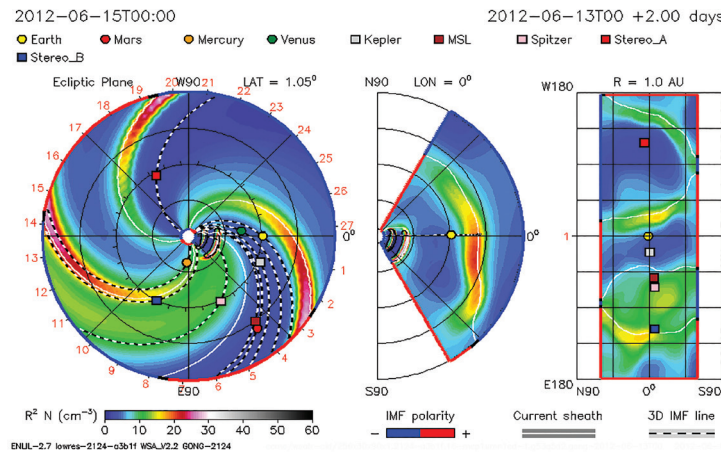
**Приложение 8.5**

Анимационная схема динамики экстремального «залимбового» события 27 марта 2012 г., зарегистрированного за восточным краем солнечного диска на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



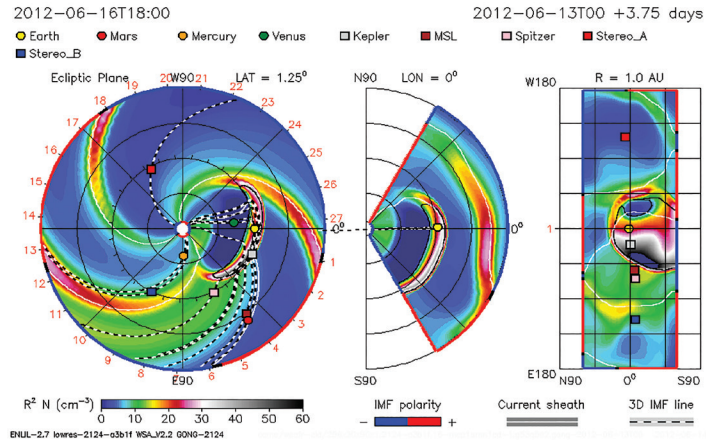
**Приложение 8.6**

Анимационная схема динамики экстремального события 15 июня 2012 г. от активной области из района центрального меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



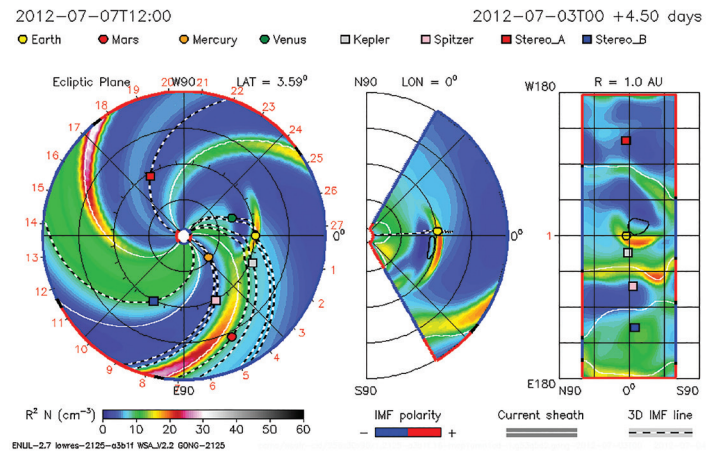
Приложение 8.7

Анимационная схема динамики экстремального события 16 июня 2012 г. от активной области из района центрального меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



Приложение 8.8

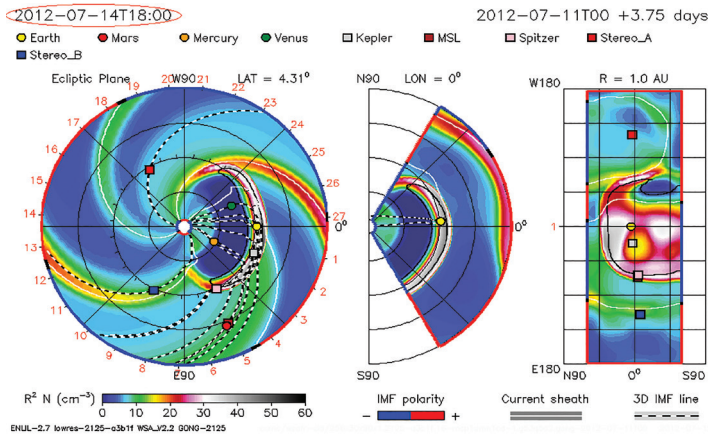
Анимационная схема динамики экстремального события 7 июля 2012 г. от активной области из района центрального меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.





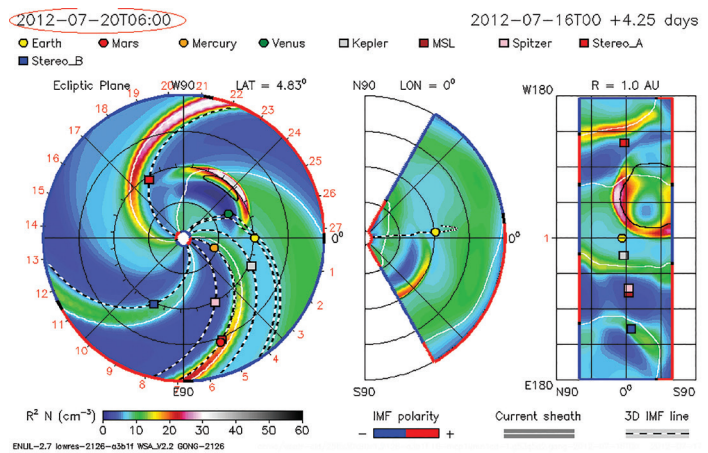
**Приложение 8.9**

Анимационная схема динамики экстремального события 14-15 июля 2012 г. от активной области из района центрального меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



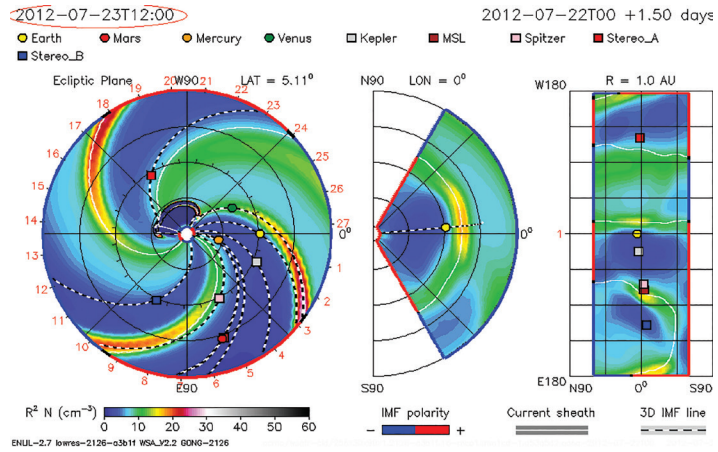
**Приложение 8.10**

Анимационная схема динамики события 19-20 июля 2012 г. от активной области, вышедшей на западный край солнечного диска Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.



Приложение 8.11

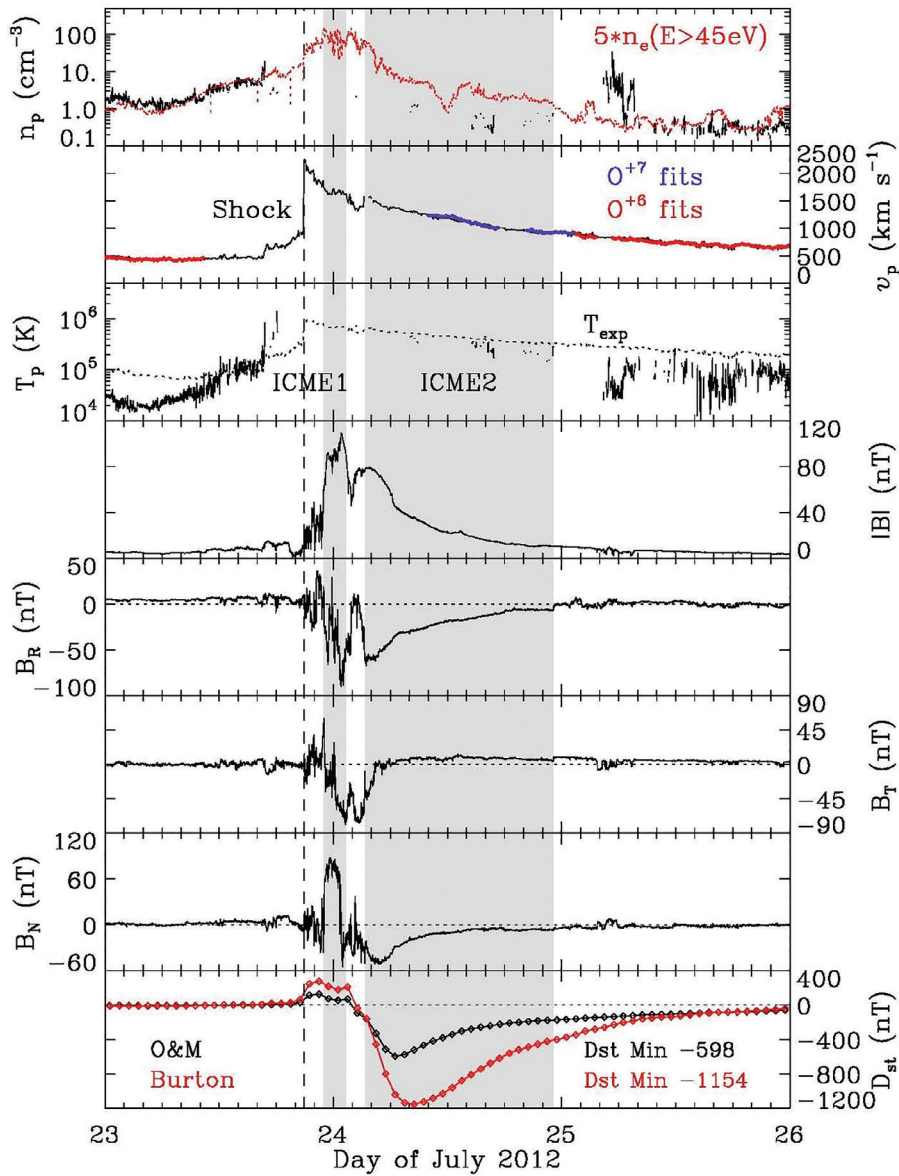
Анимационная схема динамики гигантского «залимбового» события 22-23 июля 2012 г., зарегистрированного за западным краем солнечного диска на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси.





Приложение 8.12

Данные прямых измерений параметров солнечного ветра для СУПЕР-события 23-25 июля 2012 г., зарегистрированного ЗА западным краем солнечного диска, самом экстремальном событии нового 24 цикла.



## Глава 9. СОЛНЕЧНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ – АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕГУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ СТАБИЛЬНОСТЬ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ

Изучение флуктуаций интенсивности галактических космических лучей (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, выявление и изучение которого является основной целью данной работы. Заблаговременное обнаружение подобного переходного режима могло бы решить практически важную задачу **прогноза активной фазы** солнечного цикла. Под активной фазой солнечного цикла подразумевается окрестность фазы максимума и начало ветви спада 11-летнего цикла, когда регистрируется максимальная спорадическая (вспышечная) активность, сопровождающаяся серийными выбросами корональной массы (СМЕ) и ударными волнами.

Время от времени в литературе интенсивно обсуждается проблема: описывается ли поведение солнечной активности конечным и низко-размерным аттрактором, что указывало бы на регулярность процесса? В работе [1] утвердительного ответа на этот вопрос получено не было. Возможно, это связано с низкой информативностью чисел Вольфа. Так, в [2] было отмечено, что числа Вольфа (из-за специфического правила их подсчета) вряд ли могут быть гладкой функцией истинной динамической переменной. Правдоподобная оценка корреляционной (фрактальной) размерности, т.е. выход монотонной зависимости  $d(n)$  на **плато** при значении размерности  $d \approx 2,5-3$  в окрестности *максимума* и в начале ветви спада 11-летнего цикла, была получена нами по индексу мерцаний космических лучей [3-4]. Ни по числам Вольфа, ни по интенсивности ГКЛ корректную оценку корреляционной размерности получить не удавалось.

Фаза смены знака общего магнитного поля Солнца (в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла), как наиболее геоэффективная, представляет наибольший интерес в плане прогноза экстремальных проявлений Космической погоды. Геоэффективность фазы переполюсовки обусловлена тем, что в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла регистрируется наибольшая спорадическая активность, сопровождаемая серией СМЕ и ударных волн. Выявление конечного и низко-размерного процесса в вариациях индекса мерцаний ГКЛ является, очевидно, указанием на *принципиальную* возможность прогноза периода максимальной спорадической

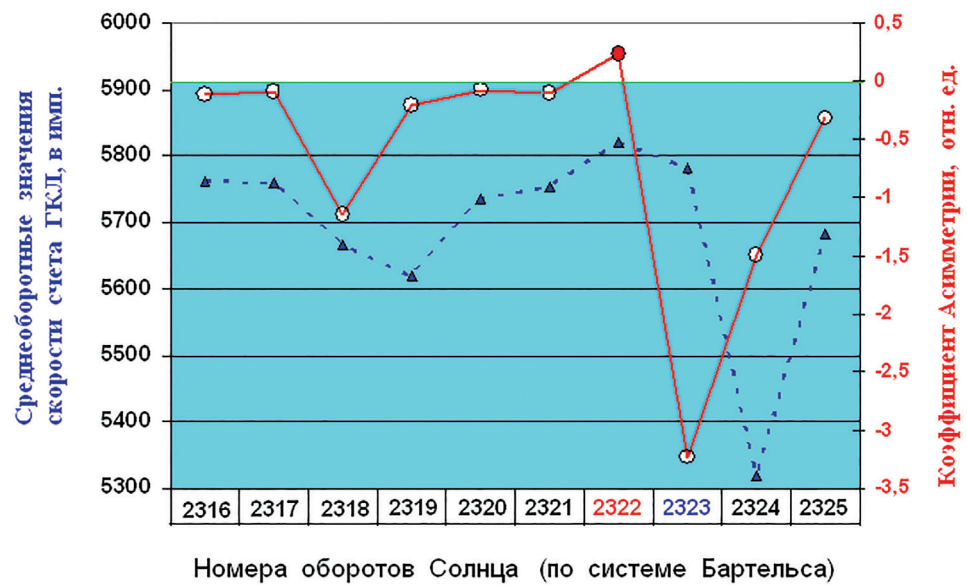
активности Солнца. Вывод о принципиальной возможности прогноза активной фазы солнечного цикла, сделанный нами исходя из полученной выше *конечной* и *низкой* величины корреляционной размерности, был достаточно подробно прокомментирован в соответствующем разделе монографии [5], посвященном теме фракталов в Космосе.

### **9.1. Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.**

Представляется, что наиболее полная информация о процессе содержится в плотности функции распределения, т.е. в эмпирической частотной гистограмме исходных данных. 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 эмпирической частотной гистограммы для 10 оборотов Солнца: с марта по декабрь 2003 г. (рис. 9.1). Как известно, коэффициент Асимметрии рассчитывается через **3-й** момент функции распределения. Большая величина коэффициента взаимной корреляции  $R=0,93$  между введенным коэффициентом Асимметрии и интенсивностью ГКЛ указывает на хорошую связь между ними. Обороты 2323-2324 приходятся на период экстремальной активности в октябре-ноябре 2003 г. Предшествующие активной фазе 7 оборотов Солнца (№№ 2316-2322) отнесены, пока условно, к переходному режиму солнечного ветра.

Как следует из результатов расчета, положительные значения коэффициента Асимметрии регистрируются лишь однажды: на обороте **2322**, который **предшествует** оборотам 2323-2324 с экстремальной активностью. Положительные значения коэффициента Асимметрии означают сдвиг максимума частотной гистограммы в сторону больших значений флуктуаций интенсивности ГКЛ, в отличие от отрицательных значений коэффициента Асимметрии, регистрируемых в течение активной фазы (обороты 2323-2324). В итоге, только один солнечный оборот № 2322 (сентябрь 2003 г.) можно отнести к реальному **переходному** режиму к активной фазе солнечного цикла, которая пришлась на октябрь-ноябрь 2003 г. [6]. Кроме того, желательно было бы отделить изменения *формы* эмпирической (частотной) гистограммы от изменений *масштаба*, который определяется *средним* значением эмпирической (частотной) гистограммы распределения интенсивности ГКЛ.

Из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности известно, что обобщенная функция распределения



**Рис. 9.1.** Коэффициент Асимметрии, рассчитанный по 7776 точкам пятиминутных значений скорости счета в импульсах космических лучей в течение каждого оборота Солнца, начиная с №№ 2316-2325 (28.03.2003-22.12.2003 гг). По оси ординат: шкала слева, пунктирная кривая – скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца (27 дней) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Шкала справа, сплошная кривая – величина коэффициента Асимметрии в относительных единицах. По оси абсцисс – время: отложены порядковые номера оборотов Солнца (по системе Бартельса).

Вейбулла-Гнеденко описывает выход системы на предельный критический режим [7]. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим выхода на активную фазу 11-летнего цикла. На языке этой вероятностной теории задача определения 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, в данном случае, интенсивности космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла к «функции надежности» (Приложение 9.1) и есть искомая вероятность (**функция Риска**) или ПАРАМЕТР флуктуаций космических лучей [6].

Для расчета вероятности достижения интенсивностью космических лучей критического значения на стадии переходного режима,

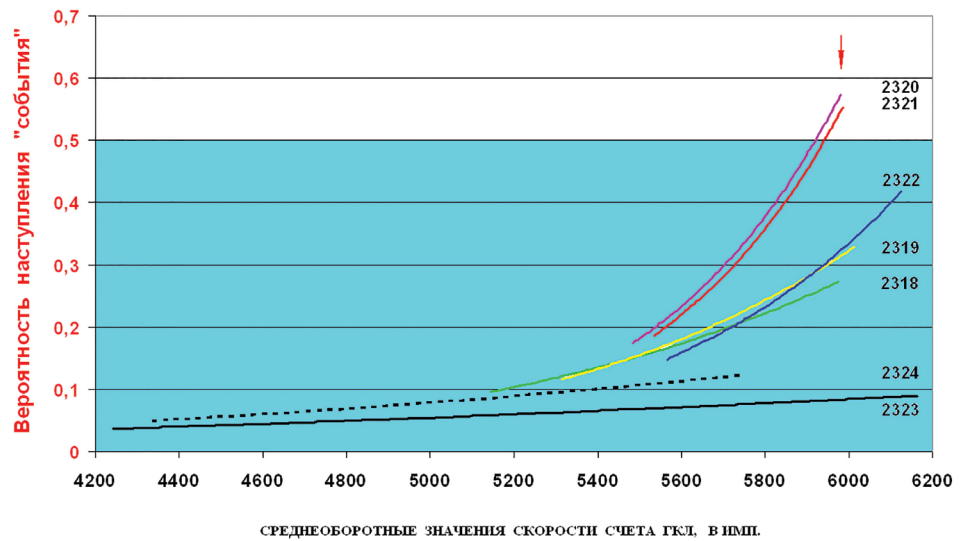
потребуется оценка параметра формы эмпирического распределения Вейбулла, который определяет степень отклонения формы аппроксимирующей функции эмпирической гистограммы от нормального распределения. Аппроксимирующую функцию эмпирической (интегральной) гистограммы интенсивности находим методом наименьших 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 искомого параметра формы и масштаба.

Параметр формы является **КЛЮЧЕВЫМ** параметром: при достижении им **критической** величины значение параметра определяется как **предвестник** выхода на критический (переходный) режим. Параметр *масштаба* определяется *средним* значением эмпирической (частотной) гистограммы распределения интенсивности ГКЛ. Далее, остается только выделить сигнал-предвестник из Гауссова шума: Гауссов шум содержится, проще говоря, в «до критической» линейной области функции Риска. Искомая, **нелинейная** компонента сигнала-предвестника формируется при **превышении** степени (вероятности) **коррелированности** процесса критического значения, т.е. при  **$P > P_{кр}$** .

Ниже, приведены результаты расчета функции Риска применительно к реальным данным в уже известный период экстремальной активности Солнца в октябре-ноябре 2003 г. (солнечные обороты 2323-2324). В это время была зарегистрирована целая *серия* наиболее мощных событий 23 цикла. Расчет функции Риска проводился за 7 оборотов Солнца: за 5 предшествующих оборотов 2318-2322 и, далее, за обороты 2323-2324, т.е. уже непосредственно в течение активной фазы солнечного цикла. Как следует из результатов расчета, значимые ( **$P > 0,5$** ) значения максимума функции Риска регистрируются на оборотах 2320-2321 (рис. 9.2).

В этой связи интервал времени, приходящийся на обороты **2320-2321** в течение которых были зарегистрированы предвестники, определяется как – **переходный** режим к активной фазе солнечного цикла – имевшей место на оборотах 2323-2324. Предвестник в космических лучах в данном случае регистрируется за **1-2** солнечных оборота до начала активной фазы. В отличие от случая использования для этой цели коэффициента Асимметрии, когда переходный режим



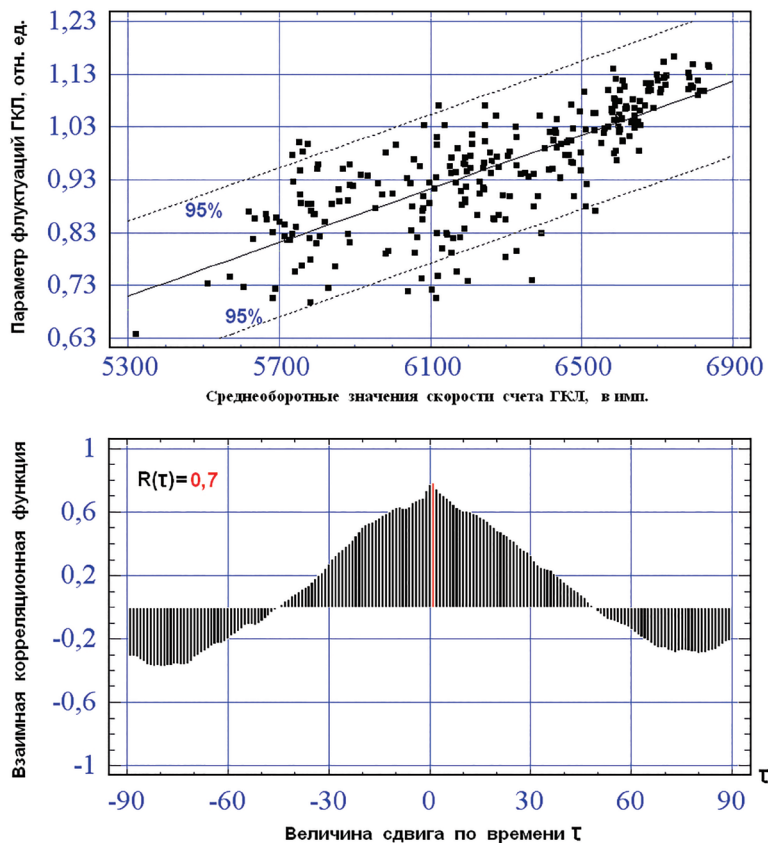


**Рис. 9.2.** Расчет функции Риска или вероятности (ось ординат, шкала слева) наступления «события» исходя из распределения Вейбулла-Гнеденко. По оси абсцисс – скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. На 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, т.е. предвестники начала активной фазы солнечного цикла.

был выявлен только за 1 оборот Солнца до начала активной фазы (рис. 9.1). Полученные результаты указывают на большую эффективность предложенного способа выявления предвестника активной фазы солнечного цикла, по сравнению с использованием для этой же цели коэффициента Асимметрии. Это подтверждается оценкой Взаимной корреляционной функции (ВКФ) 27-дневных значений введенного параметра флуктуаций и соответствующих значений интенсивности космических лучей: величина их взаимной корреляции  $R(\tau) \approx 0,7$  (рис. 9.3). При этом сдвиг максимума ВКФ на величину  $\tau \approx 1$  оборот Солнца указывает на **систематическое** опережение параметра флуктуаций соответствующих значений интенсивности ГКЛ. Это согласуется с нашим выводом о **прогностических** возможностях введенного параметра флуктуаций ГКЛ.

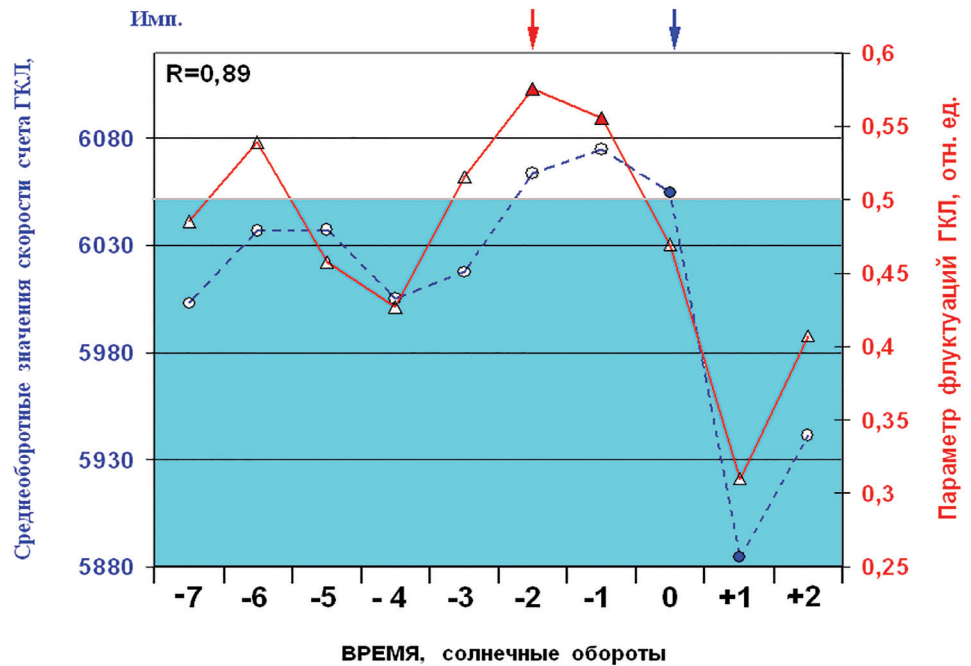
И в завершение, можно привести результаты анализа среднеоборотных значений введенного параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ методом «наложения эпох» относительно «нулевого» оборота, т.е. момента регистрации резкого и глубокого понижения в среднеоборотных





**Рис. 9.3.** Оценка связи 27-дневных значений параметра флуктуаций космических лучей и скорости счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца: регрессионная статистическая связь установлена на уровне 95%, величина коэффициента их взаимной корреляции составляет величину  $R(\tau) \approx 0,7$ . Средняя величина заблаговременности предвестника в параметре флуктуаций ГКЛ относительно интенсивности космических лучей определяется величиной временного сдвига (по оси абсцисс)  $\approx 1$  оборот Солнца.

значениях интенсивности ГКЛ (рис. 9.4). Для анализа были выбраны 10 подобных понижений интенсивности ГКЛ на геоэффективной фазе максимума и в начале ветви спада предыдущего 11-летнего цикла № 23. Очевидно, что **заблаговременность** прогноза и в этом случае составляет, в среднем, ту же величину: **1-2** оборота Солнца. При этом, *низкие*, т.е. *диагностические* значения параметра флуктуаций отражают факт регистрации, в среднем, резкого и глубокого *понижения* в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ.



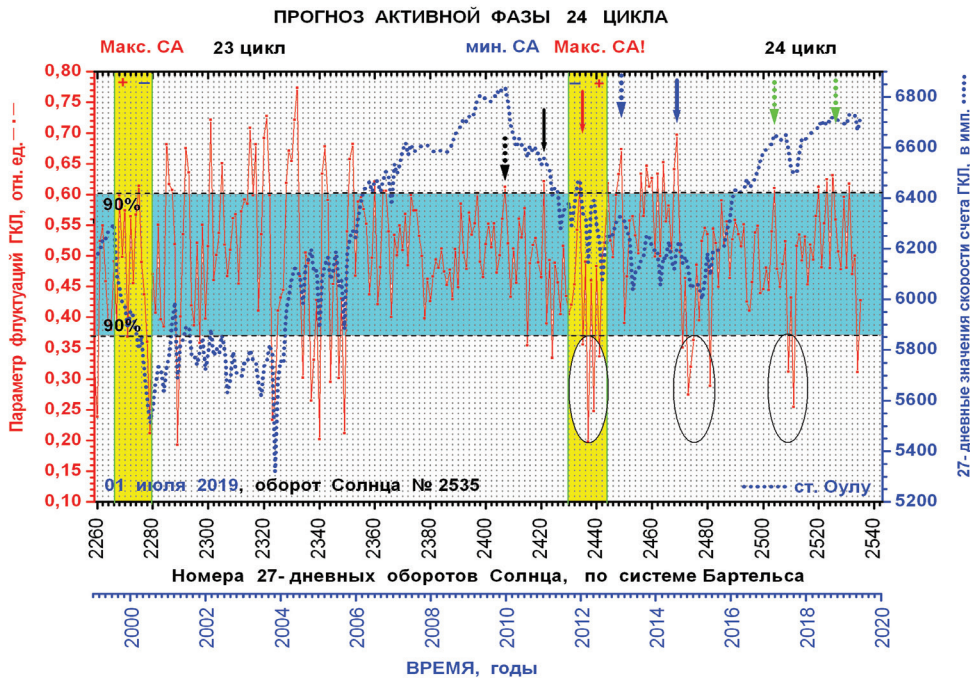
**Рис. 9.4.** Результаты анализа методом «наложения эпох» для 10 случаев резких и глубоких минимумов в интенсивности ГКЛ, зарегистрированных в предыдущем 23 цикле солнечной активности. Шкала слева, пунктирная кривая – скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. Шкала справа, сплошная кривая – параметр флуктуаций ГКЛ в относительных единицах. По оси абсцисс – условное время в оборотах Солнца. Оборот, с которого начинается резкое и глубокое понижение в интенсивности ГКЛ, обозначен как «нулевой» оборот.

## 9.2. Идентификация переходных режимов на различных фазах солнечного цикла по космическим лучам.

«...исследование **горизонтов прогнозирования** солнечных и гелиосферных процессов представляется актуальной научной и практической задачей».

Веселовский И.С., Космические исследования. 2004 г.  
Т. 42. №5. С. 505.

Приведенные выше результаты анализа и тестирования предложенного способа указывают на прогностические (и диагностические тоже) возможности параметра флуктуаций рассчитанного на основе функции Риска распределения Вейбулла-Гнеденко. На рис. 9.5



**Рис. 9.5.** *Сплошная кривая – 27-дневные значения параметра флуктуаций ГКЛ в относительных единицах, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Пунктирная кривая – скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. 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 в 2011-2012, в 2014-2015 и 2017 гг. (заключены в овал) – означают ДИАГНОСТИКУ активных фаз солнечного цикла.*

представлены результаты среднесрочного мониторинга космических лучей за период с 1999-2019 гг. Для анализа вариаций параметра с периодами от полугода и более, был исключен низкочастотный тренд, который представляет собой, фактически, 11-летнюю вариацию.

Предвестники активных фаз 24 цикла были зарегистрированы в нижеследующие моменты времени. Предвестник НАЧАЛА 24 цикла – на обороте 2407: декабрь 2009, точечная стрелка черного цвета (см. также Приложение 9.2). Предвестник фазы РОСТА – на обороте 2421: январь 2011, сплошная стрелка черного цвета (там же, в Приложении 9.2). Предвестник фазы МАКСИМУМА 24 цикла был зарегистрирован на обороте

2434: январь 2012, стрелка красного цвета (Приложение 9.2). Предвестник фазы инверсии магнитного поля зарегистрирован на обороте 2449 в начале 2013 г. (точечная стрелка синего цвета на рис. 9.5). Предвестник геоэффективной фазы начала ветви СПАДА (после завершения фазы переполюсовки в конце 2013 г.) был зарегистрирован на обороте 2469: июль 2014, сплошная стрелка синего цвета на том же рисунке.

Пунктирной стрелкой (зеленого цвета) на рис. 9.5 представлен предвестник достаточно неожиданной активизации солнечной активности в окрестности фазы МИНИМУМА текущего солнечного цикла 24 в июле-сентябре 2017 г. (обороты 2509-2511). Очевидно, что интервал времени, приходящийся на обороты **2504-2508** (с третьей декады февраля по июнь 2017 г.) и представляет собой **переходный** режим к достаточно неожиданной активной фазе в окрестности минимума завершающегося 24 цикла. Действительно, в июле и сентябре 2017 г. были зарегистрированы большие (~7%) эффекты Форбуша и геомагнитные бури, которые и обусловили резкое и глубокое понижение в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ на оборотах 2509-2511 (рис. 9.5). Относительно небольшие вариации интенсивности ГКЛ с предвестниками в середине 2019 г. обусловлены прохождением орбиты Земли высокоскоростных потоков или долгоживущих «струй» солнечного ветра из корональных дыр, что является обычным явлением для фазы минимума 11-летнего цикла.

*Низкие* значения параметра флуктуаций ГКЛ (заключенные в овал на рис. 9.5), регистрируемые после предвестников на фоне низких значений интенсивности космических лучей, означают *диагностику* прогнозируемых фаз солнечного цикла. В частности: фаза МАКСИМУМА спорадической активности (2011-2012 гг.), геоэффективная фаза начала ветви СПАДА текущего цикла (2014-2015 гг.) и достаточно неожиданная фаза АКТИВИЗАЦИИ в окрестности минимума текущего 24 цикла (июль-сентябрь 2017 г.). Таким образом, введенный параметр флуктуаций космических лучей позволяет в среднем с заблаговременностью  $\Delta t = 3 \pm 1$  оборота Солнца, дать среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего солнечного цикла (<http://www.forshock.ru/predlong.html>).

Следует отметить, что моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом перестроек магнитного поля в комплексах активности на Солнце. Это следовало из результатов сопоставления *моментов регистрации предвестников* (рис. 9.5) в космических лучах, с результатами наблюдений *магнитного поля* Солнца, представленных в работе [8]. Перестройки магнитного поля наблюдались на фазах *роста* и *спада* обоих максимумов (зарегистрированных в среднегодовых значениях чисел Вольфа в 2012 и 2014 гг.) т.е. на фазах

их максимальной изменчивости. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что предвестник в космических лучах является *индикатором перестройки* магнитного поля Солнца на *переходном* режиме к активной фазе солнечного цикла.

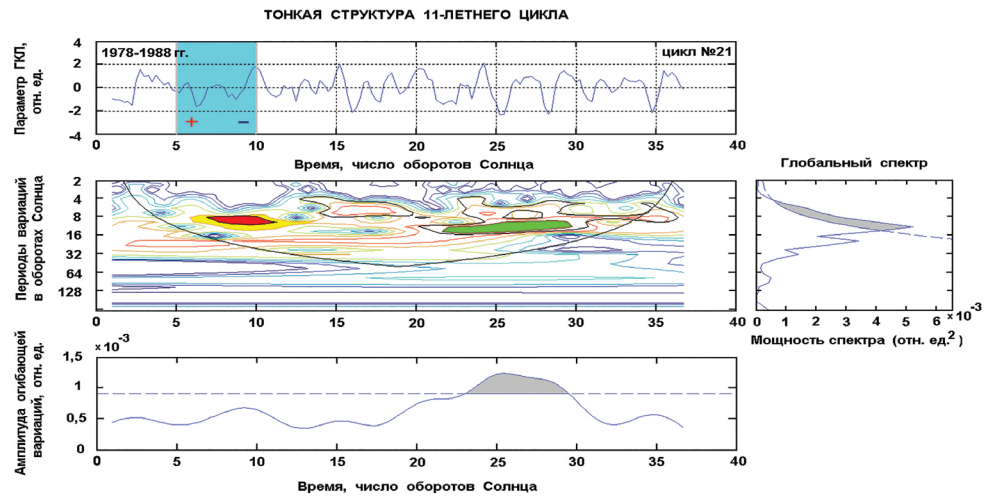
### **9.3. Переходный колебательный процесс инверсии общего магнитного поля Солнца в космических лучах.**

Как следует из полученных результатов, наибольшего размаха вариации среднеоборотных значений параметра флуктуаций ГКЛ достигают в окрестности максимума и на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла (рис. 9.5). Для изучения динамики вариаций параметра флуктуаций ГКЛ в течение солнечного цикла, удобно воспользоваться методом вейвлет-анализа вариаций. Результаты такого анализа приведены на рис. 9.6-9.8. В *минимуме нечетных* циклов 21 и 23 с *отрицательным* знаком общего магнитного поля Солнца, явно выражена *годовая* осцилляция, что хорошо видно из оценки амплитуд огибающих на нижних диаграммах рис. 9.6 и рис. 9.8. Доминирование *годовой* вариации в окрестности *минимума* 11-летнего цикла (с *отрицательным* знаком общего магнитного поля Солнца) согласуется с выводами, вытекающими из модели 11-летнего цикла, развиваемой академиком Г. Ф. Крымским [9].

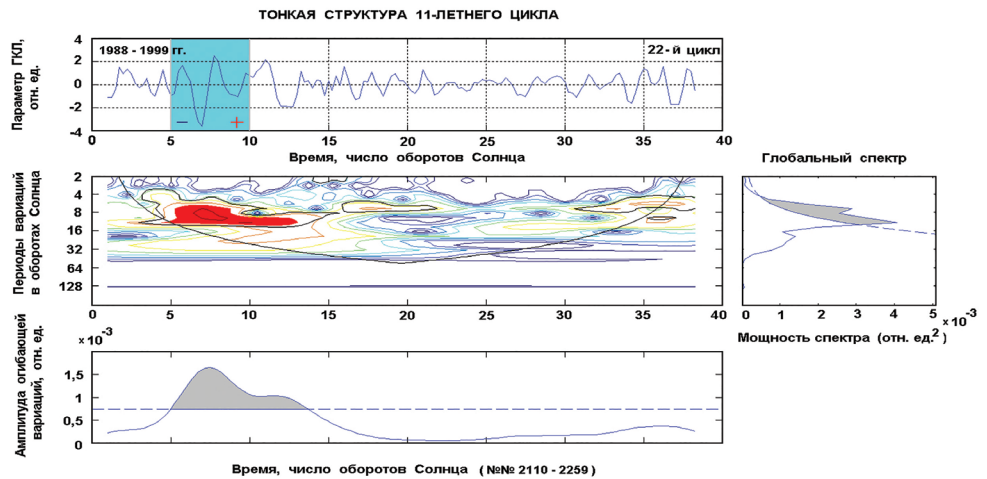
В максимуме цикла и на геоэффективной фазе начала ветви спада, как правило, доминирует нестационарная **полугодовая** вариация (рис. 9.6-9.8). Нестационарная полугодовая вариация в окрестности максимума 11-летнего цикла обусловлена, по нашим представлениям, переходным колебательным процессом смены знака или инверсии общего магнитного поля Солнца [6]. Обращает на себя внимание, что переходный колебательный процесс переполюсовки в окрестности максимума нового 24 цикла характеризуется НЕ нестационарной полугодовой вариацией (как это было в трех предшествующих циклах 21-23), а вариацией с характерным масштабом  $\approx 1$  год. Достаточно наглядно годовая вариация в максимуме текущего цикла 24 представлена в правой части диаграммы периодов вариаций (рис. 9.8). *Это согласуется с современными данными солнечных наблюдений: в [10-11], отмечается квазипериодическая или «импульсная» структура фазы роста нового 24 цикла с периодом  $\sim 1$  год.*

Чтобы убедиться в том, что местоположение предвестников в космических лучах отражает реальную ситуацию в межпланетной среде, ниже проведен совместный анализ интенсивности *космических лучей* и параметров солнечного ветра: изменчивости или дисперсии



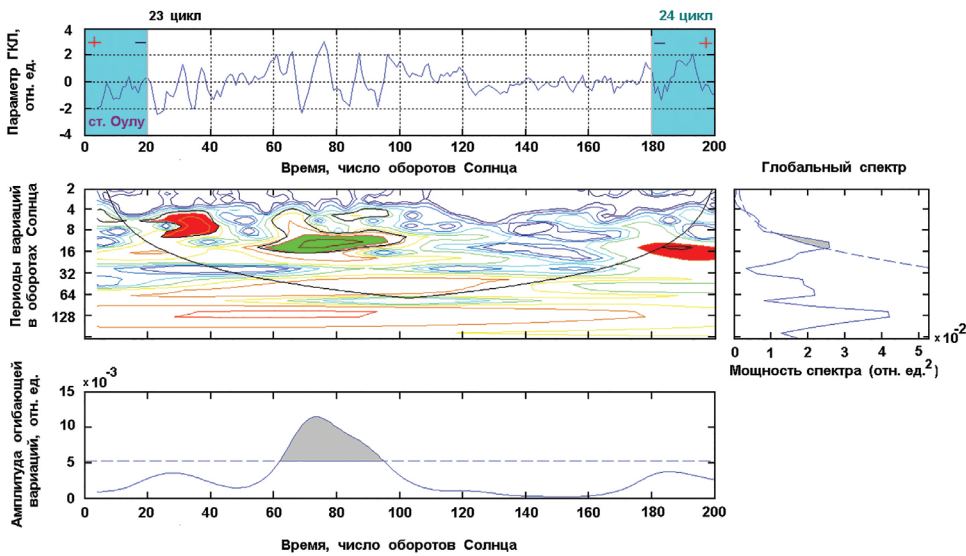


**Рис. 9.6.** Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 21 цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В минимуме нечетного 21 цикла с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца доминирует ожидаемая годовая осцилляция. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.



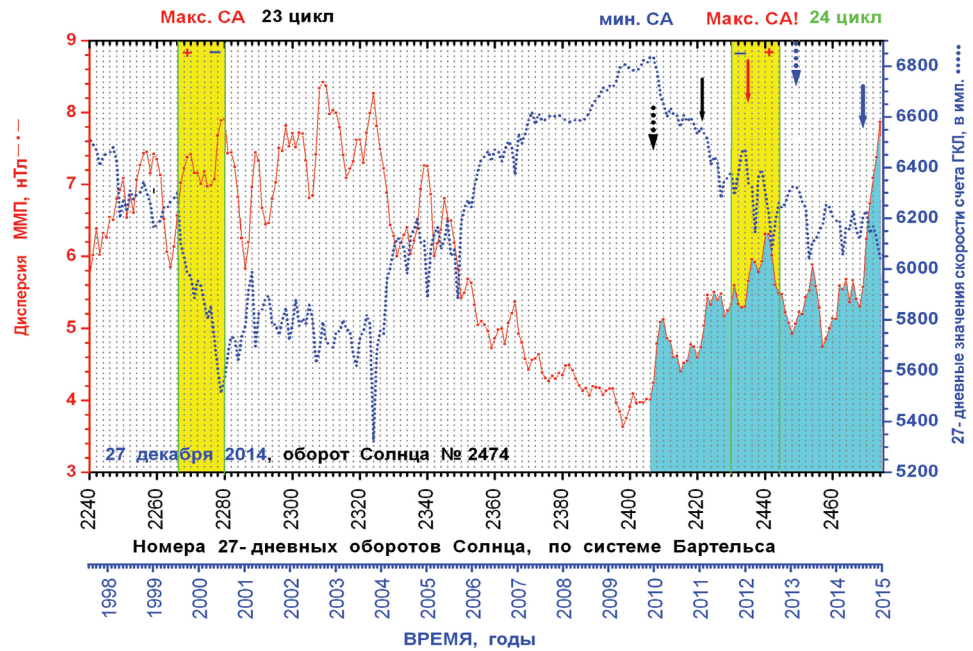
**Рис. 9.7.** Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 22 цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.





**Рис. 9.8. Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 23 цикле и в начале 24 цикла. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ доминируют нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В минимуме нечетного 23 цикла с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца доминирует ожидаемая 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.**

межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра. Для анализа использовались результаты прямых измерений на американском космическом аппарате ACE [12]. Действительно, на фазе роста и в окрестности максимума нового 24 цикла заметно выражена годовая вариация дисперсии ММП (рис. 9.9) и скорости плазмы солнечного ветра (рис. 9.10). Это совпадает с годовой, в среднем, периодичностью регистрации предвестников, зарегистрированных нами в анализируемый период. Следовательно, можно сделать вывод, что предвестник в космических лучах действительно является **индикатором перестройки** магнитного поля Солнца на *переходном* режиме к активной фазе солнечного цикла.



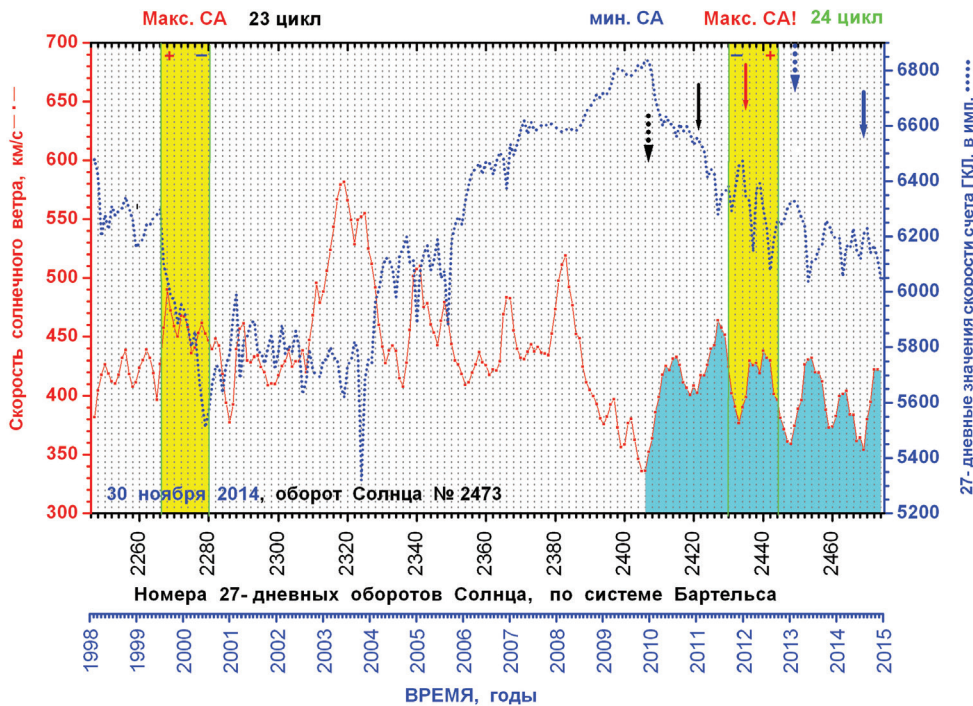
**Рис. 9.9.** Сопоставление 27-дневных значений скорости счета космических лучей в импульсах (пунктирная кривая) и дисперсии напряженности межпланетного магнитного поля (сплошная кривая) по данным космического аппарата ACE /12/, в 23-24 циклах солнечной активности: 1997-2014 гг. Предвестники в космических 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.

#### 9.4. Инвариант 11-летнего цикла: «амплитуда – длительность».

*«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.

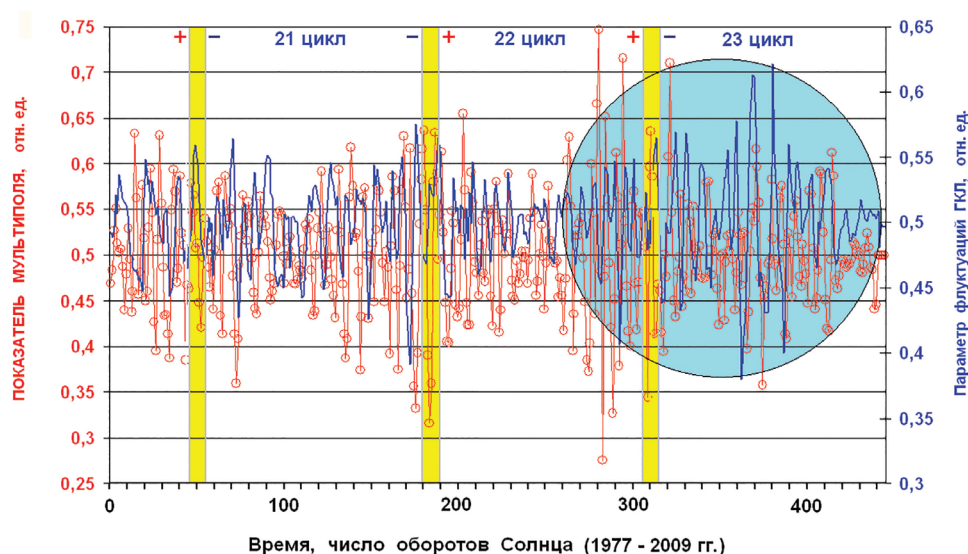
В итоге было установлено, что чем выше амплитуда цикла в максимуме, тем короче длительность процесса переполюсовки (после завершения которой, начинается восстановление интенсивности ГКЛ). И, наоборот, чем ниже амплитуда цикла, тем продолжительнее фаза переполюсовки. Действительно, длительность процесса инверсии поля



**Рис. 9.10. Сопоставление 27-дневных значений скорости счета космических лучей в импульсах (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.**

для «низких» циклов (20 и 23), фактически, вдвое превышает таковую для более «высоких» циклов 21 и 22 (рис. 9.11). Выявленная по космическим лучам обратная зависимость длительности процесса инверсии поля от амплитуды цикла указывает на возможное наличие Инварианта бинарной связи характеристик 11-летнего цикла «амплитуда-длительность». Кроме того, само по себе наличие переходного колебательно-го процесса смены знака общего магнитного поля Солнца позволяет с единых позиций объяснить, так называемый, «провал(ы) Гневывшева» [13-14], наблюдаемый в окрестности максимума 11-летнего цикла, в том числе и «квази-двухлетние», а также «полугодовые» вариации межпланетного магнитного поля [15].

Годовая вариация в окрестности максимума текущего 24 цикла (рис. 9.8) является, очевидно, признаком аномалии. Более



**Рис. 9.11.** «Индекс мультиплетности» солнечного магнитного поля, открытые кружки – шкала слева и параметр флуктуаций космических лучей – шкала справа. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов (с 1977 – 2008 гг.). Показаны номера циклов, условно, отмечены периоды смены знака общего магнитного поля Солнца. Огибающие вариаций параметра флуктуаций космических лучей и «индекса мультиплетности» достигают максимума, практически, одновременно.

«низкочастотная», т.е. годовая волна переполюсовки, означает *большую длительность* процесса инверсии не только в предыдущем 23, но и в новом 24 цикле (с 2011-2013 гг.). Из факта большей длительности процесса переполюсовки, а также возможного наличия Инварианта 11-летнего цикла, следовало бы ожидать низкую амплитуду максимума текущего 24 цикла, что и следует из данных по интенсивности ГКЛ (рис. 9.5). Амплитуда нового 24 цикла оказалась значительно меньше амплитуды предыдущего 23 цикла. Это, несомненно, аргумент в пользу гипотезы об инвариантности бинарной связи «амплитуда-длительность» 11-летнего цикла. Полученные нами результаты согласуются с результатами работы [16], где также была установлена обратная зависимость между «временем между переполюсовками и амплитудой цикла».

Важно сравнить параметр флуктуаций ГКЛ с ключевым параметром модуляции  $k = \omega \tau$ , введенным в работе [17] для характеристики *степени регулярности* поля. Здесь  $\omega$  – гирочастота частиц в регулярном магнитном поле,  $\tau$  – 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 [17].

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 был введен в работах группы ИЗМИРАН [18-19]. Он хорошо ( $R=0,83$ ) коррелирует с основным параметром солнечной активности – числами Вольфа (Приложение 9.3). Ниже, проведено сопоставление параметра флуктуаций ГКЛ с «показателем эффективности солнечного мультиполя» ИЗМИРАН. Их сравнение показывает, что *огibaющие* вариаций параметра флуктуаций ГКЛ и вариаций «показателя эффективности солнечного мультиполя», в среднем, согласуются между собой (рис. 9.11). Это подтверждается достаточно высоким ( $R=-0,77$ ) значением коэффициента их регрессионной связи, в целом (рис. 9.12). Таким образом, параметр флуктуаций явно отражает вклад

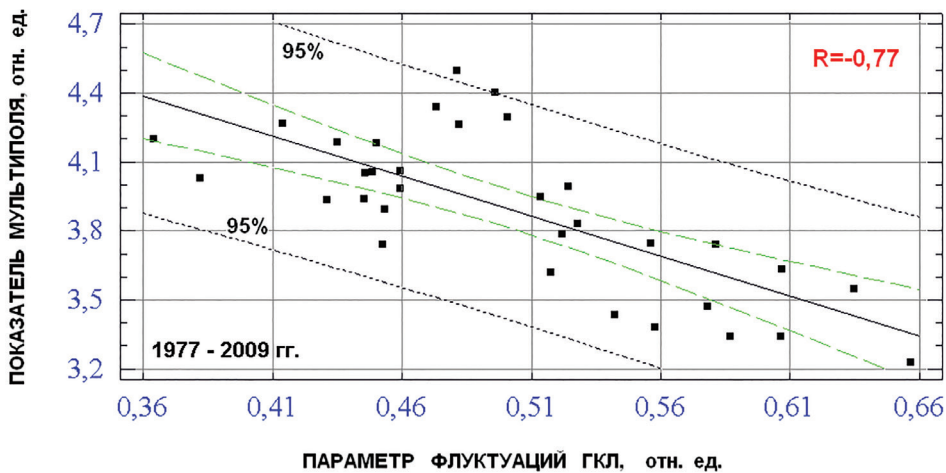


Рис. 9.12. Оценка регрессионной связи ( $R=-0,77$ ), в целом, между среднегодовыми значениями показателя «солнечного мультиполя» (ИЗМИРАН) и параметра флуктуаций космических лучей по модели линейной регрессии. Показан 95%-ный уровень значимости.

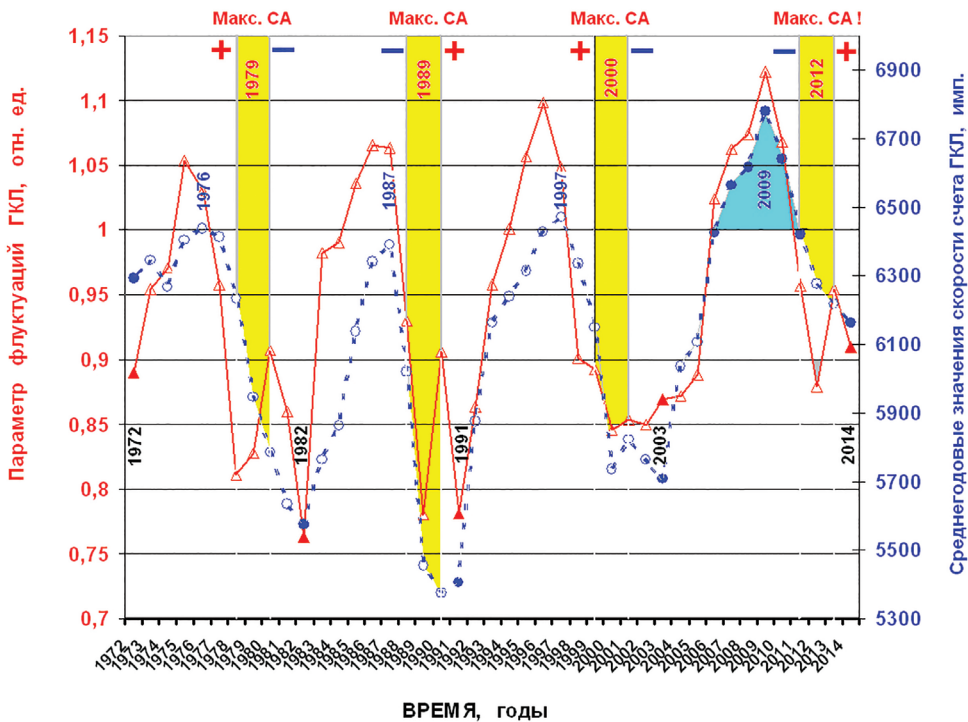
**квадрупольной** компоненты солнечного магнитного поля, обусловленной в значительной степени **перестройкой** магнитного поля Солнца в окрестности максимума 11-летнего цикла.

Действительно, как следует из результатов анализа приведенного в работе [20], вклад квадрупольной компоненты магнитного поля Солнца оказывается доминирующим в окрестности максимума солнечного цикла. В этом смысле, *нестационарный колебательный процесс в космических лучах в окрестности максимума* солнечного цикла (рис. 9.11) является *индикатором переходного режима* инверсии магнитного поля Солнца. Это подтверждается анализом флуктуирующей компоненты солнечного магнитного диполя за те же 3 цикла солнечной активности 21-23 [21]. Указанные авторы делают вывод, что во время инверсии поля компонента магнитного диполя не обращается в нуль. Она имеет *флуктуирующую* природу и потому не описывается в рамках традиционной теории динамо среднего поля: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf>.

Фаза завершения инверсии поля проявляется в виде резких и глубоких понижений в среднегодовых значениях интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла: в начале ветви спада каждого 11-летнего цикла наблюдается явно выраженные понижения интенсивности ГКЛ: в 1972, 1982, 1991, 2003 и в 2014 гг. (рис. 9.13). Указанные периоды известны как геозффективные фазы начала ветви спада 11-летнего цикла. Достаточно наглядно, стадия завершения инверсии поля проявляется и в среднегодовых значениях параметра флуктуаций ГКЛ. В каждом случае на местоположение *геозффективной фазы переполюсовки* указывают *низкое*, т.е. *диагностическое* значение параметра флуктуаций космических лучей (см. рис. 9.13).

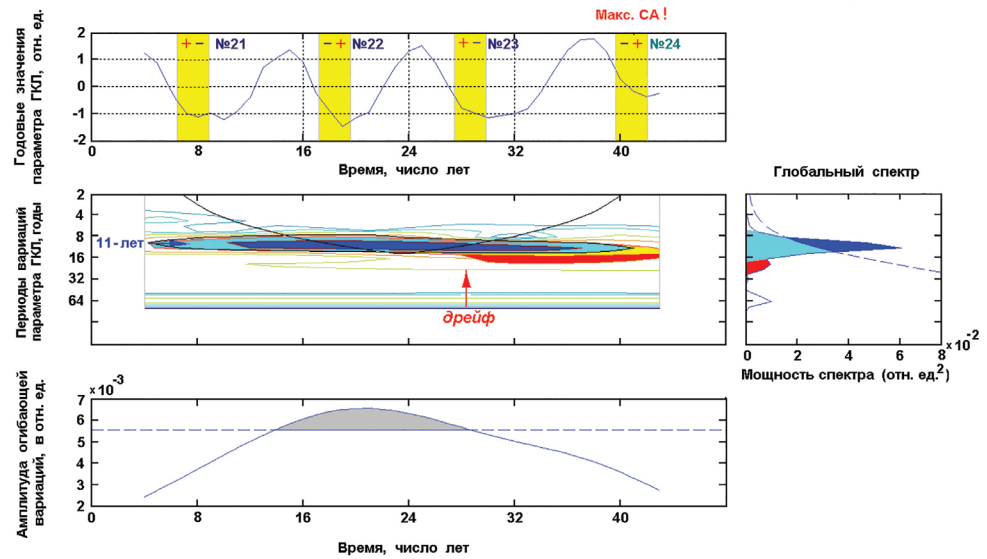
Наличие 11-летней цикличности в параметре флуктуаций ГКЛ – очевидно. Это следует из простого сопоставления значений интенсивности (пунктирная кривая – открытые кружки, шкала справа) и введенного параметра флуктуаций ГКЛ (сплошная кривая – треугольники, шкала слева). Относительно связи параметра флуктуаций ГКЛ с традиционными индексами солнечной и геомагнитной активности следует сказать следующее (Приложение 9.3): корреляция *среднегодовых* значений 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 Dst-вариацией ( $R=-0,85$ ). Очевидно, что их высокая корреляционная связь обусловлена 11-летней вариацией в анализируемых параметрах.





**Рис. 9.13. Точечная кривая, шкала справа – среднегодовые значения скорости счета космических лучей в импульсах 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.**

Это подтверждается результатами вейвлет-анализа (диаграмма периодов вариаций в средней части рис. 9.14): 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 «низкого» по амплитуде цикла № 23. Этот важный для дальнейшего результат, подтверждает наш вывод, полученный ранее по индексу мерцаний ГКЛ [22]: чем выше амплитуда цикла в максимуме, тем короче длительность фазы переполюсовки (соответственно, короче и сам цикл) и, наоборот, чем ниже амплитуда цикла, тем продолжительнее процесс инверсии поля и, соответственно, более продолжителен цикл.



**Рис. 9.14.** Вверху – временной ход параметра флуктуаций за 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.

Увеличения длительности «низкого» по амплитуде 23 цикла следовало ожидать, если предложенная нами гипотеза об инварианте бинарной связи характеристик 11-летнего цикла «амплитуда-длительность» 11-летнего цикла действительно имеет место. Вывод об увеличении длительности солнечного цикла № 23, другими словами, вывод о **сбое 11-летней цикличности**, был сделан в 2006 г. [22]. Сейчас этот вывод подтвердился на новой базе, с использованием введенного параметра флуктуаций ГКЛ. Существенно, что сам факт увеличения длительности «низкого» по амплитуде 23 цикла является независимым экспериментальным свидетельством в пользу реальности вышеуказанного инварианта, его *ожидаемым следствием*. Указания на то, что «длина цикла, в свою очередь, отрицательно коррелирует с высотой цикла» приведены в недавней работе [23].

### **9.5. 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**».*

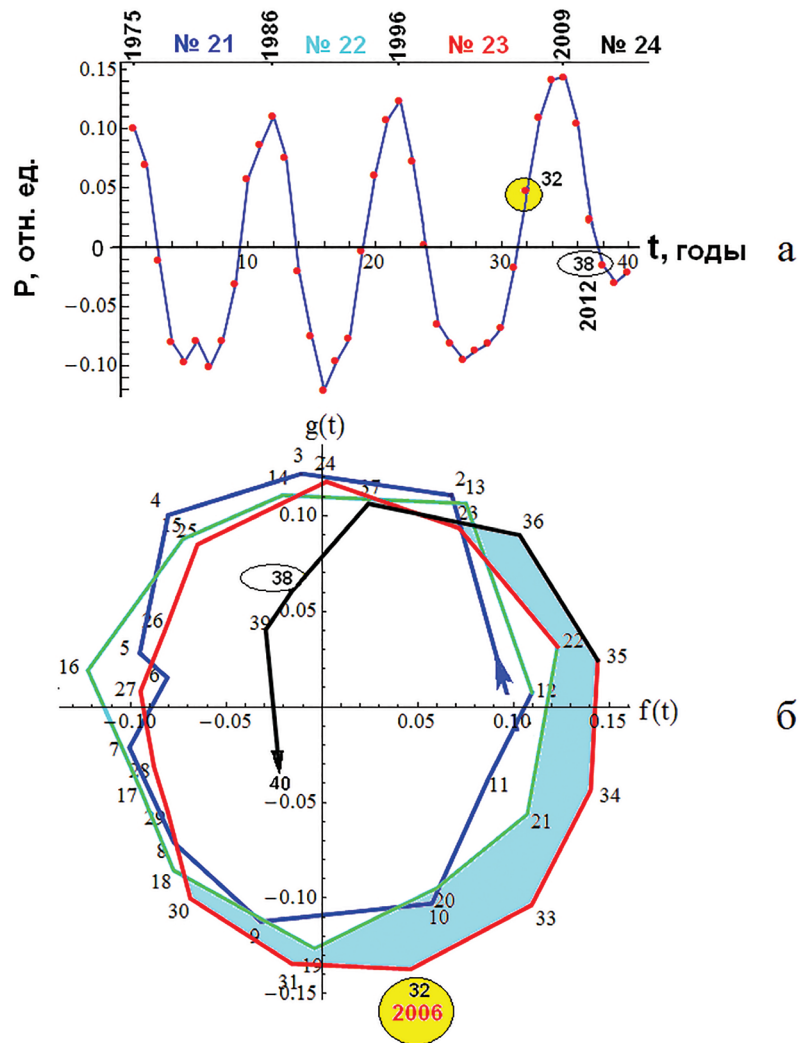
**Деменок С.Л.** ФРАКТАЛ. Между мифом и ремеслом. СПб. 2011. 296 стр. 142.

Почему так важен факт увеличения длительности 23 цикла? Дело в том, что появление низкочастотной «подложки» в спектре 11-летнего цикла может предшествовать сбою 11-летней цикличности [24]. И наши исследования это подтверждают [25]. В плане изучения природы сбоя 11-летней цикличности, особый интерес представляет подход Г.В. Кукулина [26], который анализировал сбой солнечных циклов, используя систему Лоренца. Система Лоренца в состоянии описывать различные этапы эволюции системы: от **возникновения** конвекции – появление автоколебаний при **превышении** критического значения температуры, до **исчезновения** автоколебаний при **понижении** температуры.

Сбой 11-летней цикличности проявляется не только в изменении длительности цикла, но и его амплитуды. Рекордно высокое значение интенсивности ГКЛ в *четырёхлетний* период **2007-2010** гг. (рис. 9.13) связано, в первую очередь, с ослаблением глобального дипольного поля Солнца. И такие данные существуют. Как показано в работе [27], магнитный момент солнечного диполя в 2008 г. снизился до значений, характерных для начала XX века. Причем, в настоящее время аномально низки и локальные поля [28]. Такой длительный период с полным исчезновением солнечных пятен наблюдался лишь в начале прошлого века.

Важно заметить, что гипотеза о наличии инварианта 11-летнего цикла «амплитуда-длительность» явилась логическим следствием **целостного** подхода к анализу вариаций солнечной активности. Дальнейшее развитие целостного подхода было 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.

«Фазовые портреты» 11-летней цикличности приведены на рис. 9.15. Они рассчитывались по среднегодовым значениям параметра флуктуаций ГКЛ. В верхней части рисунка, показан временной ход



**Рис. 9.15.** «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.

анализируемого параметра. На шкале времени приведены номера циклов. Наибольшую площадь, описывает траектория 23 цикла (показана красным цветом). Увеличение площади цикла начинается с 2006 г.

(годовая точка на фазовой траектории № 32). Наибольшая площадь, замечаемая фазовой траекторией, считается признаком аномального цикла перед «фазовой катастрофой» [26], по сути – ее предвестником.

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 ожидаемый аномально высокий, по сравнению с большинством циклов прошлого века, уровень интенсивности космических лучей. Впервые, подобный прогноз был дан по космическим лучам в 2006 г. [22]. **Аномальное** повышение радиационного фона тогда было зарегистрировано через год, в течение четырехлетнего периода **2007-2010** гг. (заштрихованная область на рис. 9.13). В итоге, на языке «фазовых портретов» получено независимое подтверждение вывода о предвестнике в космических лучах сбоя 11-летней цикличности Солнца в современную эпоху – эпоху «Космической эры».

#### **9.6. 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 увеличение площади «фазового портрета» солнечного цикла является предвестником сбоя 11-летней цикличности. Оценку площади замечаемой кривой солнечного цикла можно получить разными способами: по оценке площади замечаемой под кривой временного хода 11-летнего цикла и по оценке площади замечаемой фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости. Физический смысл термина «площади цикла» представляется более прозрачным во втором варианте (площадь, замечаемая фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости), нежели в первом. Площадь «фазового портрета» имеет размерность «фазового объема» или ДЕЙСТВИЯ, с размерностью «энергия  $\times$  время». В этом смысле, для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой **энергоемкости**, изменение которой от цикла к циклу можно проследить, например, по изменению относительной вариации **светимости** Солнца, т.е. по относительной вариации 11-летней

(<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>) изменчивости «солнечной постоянной».

Ниже приводится оценка площадей фазовых портретов солнечных циклов 21-24, т.е. характеристик их энергоемкости (по параметру флуктуаций ГКЛ). Площади циклов 21 и 22, практически одинаковы (рис. 9.16). 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. *Нарушение* консервативности системы означает наличие циклов с *различной* энергоемкостью (разными площадями). Это и наблюдается в циклах 23 и 24 (рис. 9.15): максимальная площадь приходится на 23 цикл, с последующим явным спадом площади «сбойного» 24 цикла (начиная с 2006 г.). Примечательно, что и относительная вариация светимости Солнца, как весьма очевидная характеристика энергоемкости цикла начала уменьшаться, также в 24 цикле, фактически, начиная с того же 2006 г. (Приложение 9.4).



Рис. 9.16. Оценка площадей замечаемых 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 в 23-24 циклах.



Усреднение площадей пар соседних циклов сохраняет неизменность площадей пар 11-летних циклов: 21-22 и 23-24, т.е. неизменность площадей соседних 22-летних циклов или их энергоемкости. Это может означать консервативность системы (Солнца) в широком смысле, т.е. наличие ИНВАРИАНТА с характерным масштабом длительности физического 22-летнего цикла. При условии *сохранения* указанного инварианта, после сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах функционирование динамической системы (Солнца) в следующем 25 цикле (2021-2030 г.) должно ... восстановиться!? И это должно быть известно (своеобразная «точка бифуркации») уже к середине «20-х» годов (в начале 2025 г.) следующего десятилетия. В таком случае, текущий неординарный сбой 23-24 циклов будет иметь статус «**локального**», как и в случае локального (по нашим представлениям) сбоя, имевшего место, например, в циклах **19-20**.

### **9.7. Глобальный сбой 11-летней цикличности как нарушение инварианта 22-летнего цикла.**

*«...Блажен, кто посетил сей Мир  
в его минуты роковые!»  
Ф.И. Тютчев. 1836 г.*

И только в случае нарушения инварианта с характерным масштабом 22-летнего цикла, т.е. нарушения консервативности в широком смысле, мы сталкиваемся с ситуацией *глобального* сбоя 11-летней цикличности или «*фазовой катастрофы*». Примером тому, являются глобальные минимумы активности Солнца, известные как: минимум Маундера, минимум Дальтона и минимум Глайсберга. Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла означает нарушение консервативности системы: **уменьшение** относительной вариации светимости Солнца подобно тому, что наблюдается сейчас в текущем 24 цикле (Приложение 9.4). С последующим *срывом* режима регуляции энергии – автоколебаний в конвективной зоне Солнца, поскольку уже нет необходимости в «дискретном» (за цикл) стравливании или регуляции «избыточной» энергии, по причине отсутствия таковой. В данном представлении *и возникновение и нарушения* цикличности органично связаны между собой общностью подхода к цикличности как механизма **регуляции** энергии.

В этом, по нашим представлениям, заключается природа солнечной цикличности, 11-летней и 22-летней. Солнечная цикличность есть не что иное, как автоколебательный механизм регуляции энергии

(в конвективной зоне) Солнца, стабилизирующий его температуру [22]. Таким образом, по космическим лучам с высоким разрешением открываются уникальные возможности мониторинга и изучения срыва режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца. В частности, это будет возможно в современную эпоху, если 11-летняя цикличность НЕ восстановится в 25 цикле (2021-2030 гг.). Причем, это станет известно также к середине «20-х» годов (в начале 2025 г. – своеобразная «точка бифуркации») предстоящего десятилетия. В этом случае, статус сбоя 23-24-25 циклов сменится с локального на ... **глобальный**, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

### 9.8. Последствия затяжного спада активности Солнца в эпоху «Космической эры».

*«Не дай вам Бог  
жить в эпоху перемен»  
Конфуций*

Наш вывод о природе солнечной цикличности находит, в целом, свое подтверждение в работе [29], основанной на энергетических оценках диссипации магнитной энергии. В частности, утверждается, что «нельзя исключить возможность того, что вариации светимости обусловлены не только лишь диссипацией магнитной энергии, но более непосредственно связаны с *конвективными* потоками». И далее: «...на наш взгляд, вполне заслуживают внимания гипотезы о том, что дополнительное энерговыделение Солнца в максимуме цикла обеспечивается за счет более интенсивного переноса тепла к поверхности из конвективной зоны либо за счет вязкой диссипации мелкомасштабной конвекции непосредственно вблизи поверхности». В итоге, авторы работы [29] делают следующие выводы:

1. *Физическая природа* процессов, приводящих к циклическим изменениям солнечной светимости, остается *неясной*.
2. Диссипация магнитной энергии, по-видимому, *не является основным* энергетическим каналом для поддержания вариаций светимости.

В случае реализации сценария глобального сбоя 11-летней цикличности (режима «фазовой катастрофы») прогнозируется **аномальное** многолетнее повышение радиационного фона галактического космического излучения, подобного тому, который был зарегистрирован в **2007-2010** гг. (рис. 9.13). Увеличение интенсивности ГКЛ способствует, как известно, усилению процесса облакообразования [30], интенсификации конвективных процессов в атмосфере и, как следствие, увеличению количества осадков и понижению температуры в планетарном

масштабе. В этом состоит *альтернатива* процессу глобального потепления. Очевидно, все это будет иметь существенное значение лишь в случае глобального сбоя 11-летней цикличности, т.е. нарушения инварианта 22-летнего цикла.

Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла, т.е. реализация сценария *глобального* сбоя 11-летней цикличности (в случае не восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле), могла бы означать реальность *нелинейных* режимов эволюции магнитного поля Солнца. Очевидно, что сбой 11-летней цикличности по сценарию «фазовой катастрофы», отличается от известного сценария «линейной суперпозиции» периодических волн (11 лет и 200 лет и т. д.). В соответствии со сценарием «линейной суперпозиции», наступление затяжного сбоя 11-летней цикличности ожидается лишь с *середины* 21 века.

Важно заметить, что вывод о реализации на Солнце нетривиального нелинейного режима «самоорганизованной критичности», когда весьма нерегулярно, т.е. *катастрофически* (что существенно осложняет прогноз) стравливается избыток запасенной в системе энергии [6], лишает физических оснований идеологию «линейной суперпозиции волн» (11 и 200 лет) применительно к физике Солнца. В этом случае, становится очевидной причина *запаздывания на полвека!* глобального сбоя активности Солнца, прогноз которого сторонниками идеологии «линейной суперпозиции» был дан на *середины* 21 века. В реальности же, неординарный сбой 11-летней цикличности начался с 23 цикла, т.е. уже случился, притом, в *начале* 21 века, в соответствии с прогнозом, данным по космическим лучам в 2006 г. [22].

И в заключение следует сказать, что многолетние исследования автора, по изучению переходных режимов солнечного ветра (различных масштабов) к активной фазе 11-летнего цикла, нашли свое отражение в итоговой монографии по Космической погоде [31] недавно вышедшей в издательстве Elsevier в США, которая была написана коллективом известных российских и зарубежных авторов:

«Несколько лет назад было достоверно установлено, что *параметр* флуктуаций ГКЛ может быть использован как *индикатор* фазы роста солнечной активности в 11-летнем цикле [25]. По данным долговременных наблюдений за флуктуациями ГКЛ, эти авторы, по сути, *предсказали* сбой фазы солнечной активности в 24 цикле. Развивая этот подход, авторы [6] не исключают так называемую «**фазовую катастрофу**» в цикле 25 (2020-2030), аналогичной эпохе глобального минимума Дальтона. Это предупреждение, на наш взгляд, заслуживает внимания».

### Резюме к главе 9

9.1. Параметр флуктуаций космических лучей является индикатором *степени* турбулентности магнитного поля меняющейся в течение солнечного цикла. *Высокие* значения параметра флуктуаций ГКЛ – являются индикатором *мелкомасштабной* турбулентности магнитного поля на **переходном** режиме к активной фазе солнечного цикла. **Низкие** значения параметра флуктуаций – являются **индикатором крупномасштабной структуры** с относительно регулярным полем непосредственно во время активной фазы солнечного цикла.

9.2. По космическим лучам впервые был дан среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего цикла, с заблаговременностью  $\Delta t=3\pm 1$  оборота Солнца: <http://www.forshock.ru/predlong.html>. Это обусловлено тем, что *предвестник* в космических лучах является **индикатором** перестройки магнитного поля на *переходном* режиме к активной фазе солнечного цикла.

9.3. По космическим лучам обнаружен переходный колебательный процесс инверсии магнитного поля Солнца [32]. Установлена **обратная зависимость** длительности процесса инверсии поля от амплитуды солнечного цикла. Полученная зависимость положена в основу гипотезы об *Инварианте* бинарной связи характеристик 11-летнего цикла: «амплитуда - длительность», который описывает вариации амплитуды и длительности солнечного цикла в пределах *постоянства* площади (энергоемкости) его «фазового портрета» на комплексной фазовой плоскости, где энергоемкость – характеристика «избыточной» энергии стравливаемой в единичном цикле. В этом смысле, солнечная цикличность – есть автоколебательный механизм дискретной (за цикл) **регуляции** энергии в конвективной зоне Солнца, обеспечивающий стабильность его температуры.

9.4. В случае нарушения консервативности, т.е. не сохранения площади (энергоемкости) «фазового портрета» 11-летнего цикла, можно утверждать о сохранении консервативности в широком смысле, когда площадь сохраняется для пары соседних циклов, что эквивалентно гипотезе об ИНВАРИАНТЕ 22-летнего цикла. **Увеличение** площади (энергоемкости) «фазового портрета» солнечного цикла 23 явилось *предвестником сбоя* 11-летней цикличности. Действительно, в соответствии с инвариантом 22-летнего цикла, вслед за увеличением площади предыдущего 23 цикла последовало *уменьшение* площади (энергоемкости) последующего, текущего 24 цикла.

9.5. Уменьшение площади или энергоемкости текущего цикла сопровождается уменьшением относительной вариации светимости Солнца, которая в 24-цикле уменьшилась до уровня среднего значения трех предшествующих циклов, т. е. почти вдвое. До начала нового 25 цикла (**2019-2021** гг.) прогнозируется *аномальное* многолетнее **увеличение** радиационного фона (впервые подобный прогноз по космическим лучам был дан в 2006 г.).

9.6. Гипотеза об инварианте 22-летнего цикла позволяет с *единых* позиций описывать как локальные, так и глобальные сбои 11-летней цикличности, т.е. дать **физическую** классификацию сбоев или аритмии в активности Солнца. На основе чего дан предварительный прогноз восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле (2021-2030 гг.). И это должно быть известно уже к середине «20-х» (начало 2025 г.) годов следующего десятилетия. В этом случае, неординарный сбой 11-летней цикличности в 23-24 циклах будет иметь статус *локального* сбоя, как это уже имело место в 19-20 циклах.

9.7. В случае нарушения инварианта 22-летнего цикла, произойдет смена статуса неординарного сбоя в 23-24-25 циклах на ... **глобальный**. Причем, это должно быть известно также к середине «20-х» (начало 2025 г.) годов следующего десятилетия. И, как следствие – весьма вероятно дальнейшее *снижение* относительной вариации светимости Солнца, *срыв* режима автоколебаний в конвективной зоне («фазовая катастрофа», по Г.В. Куклину, 1982 г.), со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности: регистрации экстремального многолетнего *повышения* радиационного фона в течение ВСЕГО 25 цикла и, соответственно – *повышения* облачности и последующей *интенсификации* конвективных процессов в атмосфере, сопровождающейся *увеличением* количества осадков и *понижением* температуры в планетарном масштабе.

### Литература к главе 9

1. Carbonel M., Oliver L. and Ballester J.L. A Search for Chaotic Behavior in Solar Activity // *Astronomy and Astrophys.* Vol. 290. N 3. P. 983-994. 1994.
2. 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.
3. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 39. № 1. С. 95-99. 1999а.
4. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 39. № 1. С. 100-104. 1999б.
5. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М. МГУ: изд-во ЛОГОС. 848 стр. 2005.
6. Козлов В.И., Козлов В.В. АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН. 220 с. 2016.
7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: изд-во Финансы и статистика. 313 с. 1983.
8. Язев С.А. Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности // *Солнечно-земная физика.* Вып. 16. С. 94-101. 2010.
9. 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.
10. Мордвинов А.В., Язев С.А., Лхагважав Ч., Батмунх Д. Комплексы активности и структура крупномасштабного магнитного поля Солнца в цикле 24 / *Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии.* Вып. 7. С. 10-15. 2011.
11. Мордвинов А.В., Головкин А.А., Язев С.А. Комплексы активности и инверсия магнитного поля на полюсах Солнца в текущем цикле // *Солнечно – земная физика.* Вып. 25. С. 3-9. 2014.
12. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>
13. 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.
14. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальная магнитология и опорные точки солнечного цикла // *Астрономический журнал.* Т. 80. № 11. С. 1034-1045. 2003.



15. Сарычев В.Т. Тренды и секторная структура межпланетного магнитного поля // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 46. № 3. С. 309-316. 2006.

16. Тлатов А.Г. Трехкратная переполюсовка крупномасштабного магнитного поля Солнца в 24-м цикле активности и прогноз амплитуды 25-го цикла активности / Тезисы доклада на 9-й ежегодной конференции ИКИ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ». 10-14 февраля 2014, стр. 4.

17. 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.

18. 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.

19. Ivanov E.V., Obridko V.N. The Cyclic Variations of the CME Velocity // *Solar Phys.*, Vol. 198, P. 179-196. 2001.

20. 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.

21. Pipin V. V., Moss D, Sokoloff D. and Hoeksema J. T. Reversals of the solar magnetic dipole in the light of observational data and simple dynamo models // *Astronomy & Astrophysics*. 2014. Volume 567, id.A90, 8 pp. DOI: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf>

22. 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.

23. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Об отрицательной корреляции между солнечной активностью и скоростью вращения Солнца // *Письма в Астрономический журнал*. Т. 42. № 9. С. 694-700. 2016.

24. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели // Москва-Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2003.

25. Kozlov V.I., Kozlov V.V. "Cosmic ray fluctuation parameter as indicator of 11-year cycle activity growth phase". IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series* 409. 012160 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012160. 2012.

26. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. Изд-во «Наука». 296 с. 1986.

27. 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.

28. 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.

29. Веселовский И.С., Панасенко О. Труды международной конференции. ГАО РАН, Пулковое, 17-22 июня 2002. С. 119.

30. Крымский Г.Ф. Космические лучи и околоземное пространство // *Солнечно-земная физика. ИСЗФ СО РАН. Иркутск. Вып. 2 (115)*. С. 42-45. 2002.

31. Pnasyuk M., Kalegaev V., Miroshnichenko L. et al. // *EXTREME SOLAR & GEOMAGNETIC CONDITIONS* in book: *Extreme Events in Geospace: origins, predictability, and consequences*. Imprint: Elsevier – 2017. Doi: 10.1016/B978-0-12-812700-1.00013-3. Chapter 13, part 3. Page 358.

32. 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.

В заключение, авторы выражают свою благодарность Илье Уосскину, Университет г. Оулу, геофизическая обсерватория Соданкила (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) за любезно предоставленные кондиционные 5 минутные данные измерений нейтронного монитора ст. Оулу.

## ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 9

### Приложение 9.1

Математические выражения, определяющие функцию Риска используемые при расчете ПАРАМЕТРА флуктуаций космических лучей по значениям параметров формы ( $c$ ), масштаба ( $b$ ) и сдвига ( $\theta$ ).

*Функция распределения Вейбулла:*

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

где

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

$b$  - параметр масштаба

$c$  - параметр (формы)

$\theta$  - параметр положения

*Плотность распределения Вейбулла:*

$$f(x) = \frac{c}{b} \left[\frac{(x-\theta)}{b}\right]^{c-1} * \exp\left\{-\left[\frac{(x-\theta)}{b}\right]^c\right\}$$

*Функция надежности:*

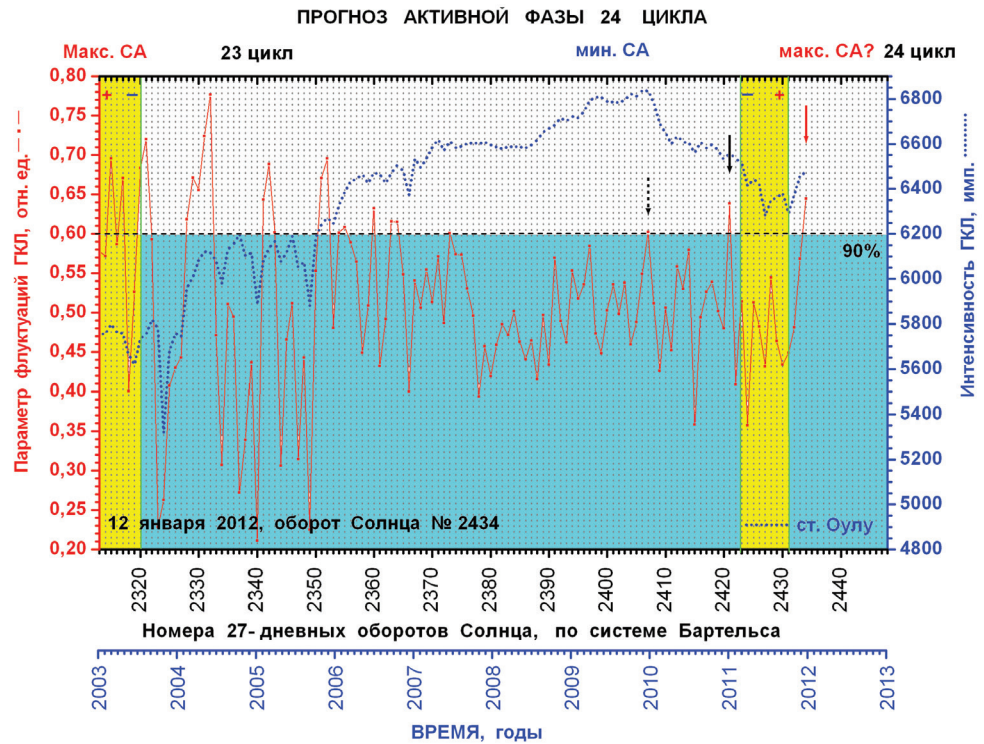
$$R(x) = 1 - F(x)$$

**Функция РИСКА !**

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

## Приложение 9.2

Пунктирная кривая - 27-дневные значения интенсивности ГКЛ с 1999-2012 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.



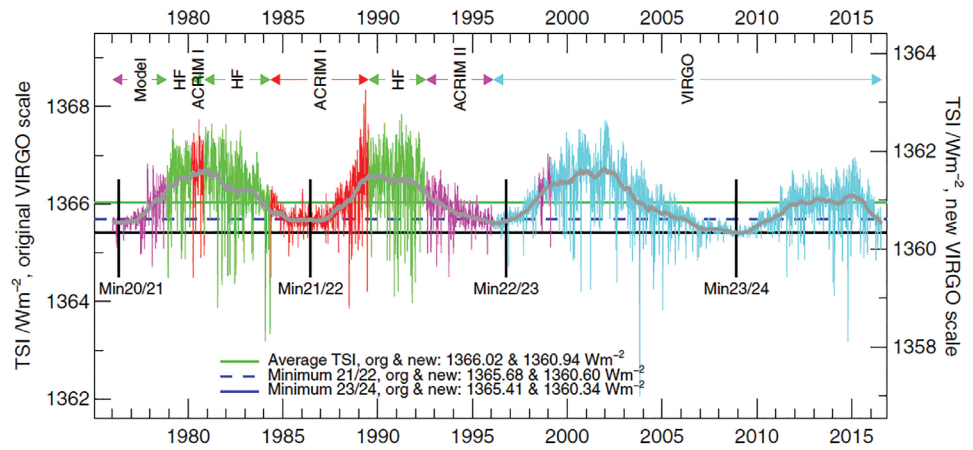
Приложение 9.3

Матрица корреляционных связей параметра флуктуаций ГКЛ с интенсивностью космических лучей, параметрами солнечного ветра и индексами солнечной активности: 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 Dst-вариацией  $R=-0,85$

	Параметр ГКЛ	Интенс. ГКЛ	Число больших магнитных бурь	Числа Вольфа (число пятен)	Индекс Мультип. солн. магн. поля	Число больших событий электр. поля
Параметр ГКЛ	<b>1</b>	<b>0,80</b>	<b>- 0,85</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,77</b>	<b>-0,76</b>
Интенс. ГКЛ	<b>0,80</b>	<b>1</b>	<b>- 0,89</b>	<b>- 0,87</b>	-0,68	- 0,67
Число больших магнитных бурь	<b>- 0,85</b>	<b>- 0,89</b>	<b>1</b>	<b>0,86</b>	0,74	<b>0,83</b>
Числа Вольфа (число пятен)	<b>-0,74</b>	<b>- 0,87</b>	<b>0,86</b>	<b>1</b>	<b>0,83</b>	0,59
Индекс Мультип. солн. магн. поля	<b>-0,77</b>	-0,68	0,74	<b>0,83</b>	<b>1</b>	0,61
Число больших событий электр. поля	<b>-0,76</b>	- 0,67	<b>0,83</b>	0,59	0,61	<b>1</b>

Приложение 9.4

Изменения относительной вариации светимости Солнца, т.е. изменения относительной вариации 11-летней изменчивости «солнечной постоянной» для 4-х последних циклов (21-24) по данным различных спутниковых измерений (<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>).





## ЭПИЛОГ

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.

*Фрактальные* 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**. Сделан вывод, что предвестник в космических лучах является **индикатором** начала *перестройки* магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

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.

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–длительность» 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  $\times$  время». В этом смысле, для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой его *энергоёмкости*, изменение которой от цикла к циклу можно проследить, например, по изменению 11-летней вариации светимости («солнечной постоянной») Солнца.

Сохранение консервативности системы в широком смысле, т.е. наличие инварианта 22-летнего цикла, отражает дискретный (за цикл), автоколебательный режим «сравливания» или регуляции энергии стабилизирующий температуру Солнца. В этом, физический смысл инварианта 22-летнего цикла. Следовательно, если инвариант 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 сбой 11-летней цикличности в 23-24 циклах будет иметь статус «**локального**».

Нарушение инварианта 22-летнего цикла (в случае невозможности восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле) будет означать нарушение консервативности системы. В этом случае статус сбоя 11-летней цикличности в 23-24-25 циклах изменится с локального на *глобальный*: **пониженный** уровень светимости Солнца и, как следствие – срыв 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 *усиление* конвективных процессов в атмосфере сопровождающейся увеличением количества осадков и *понижением* температуры в планетарном масштабе.

*И в заключение, 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 (1972-2015 гг.).*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> ответственного редактора .....	5
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>Глава 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ</b> .....	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
<b>Глава 2. ПРОБЛЕМА ИЗУЧЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ     ФЛУКТУАЦИЙ</b> .....	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
<b>Глава 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ</b> .....	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
<b>Глава 4. ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ     В ОКРЕСТНОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ</b> .....	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

<b>Глава 5. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ</b> . . .	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
<b>Глава 6. СКЕЙЛИНГОВЫЕ СВОЙСТВА ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ В ОКРЕСТНОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА</b> . . .	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
<b>Глава 7. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОГНОЗУ УДАРНЫХ ВОЛН НА БАЗЕ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ</b> . . . . .	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
<b>Глава 8. ЗАГОРИЗОНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ «ГАЛО» В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ</b> . . . . .	132
8.1 Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходных режимах солнечного ветра . . . . .	134
8.2. О кумулятивной природе экстремальных событий Космической погоды . . . . .	140
8.3. Загоризонтное обнаружение источника активности на Солнце по эффекту «гало» в космических лучах . . . . .	146
8.4. О природе переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра . . . . .	160
Литература к главе 8 . . . . .	163
ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 8 . . . . .	166

<b>Глава 9. СОЛНЕЧНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ – АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕГУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ СТАБИЛЬНОСТЬ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ</b> . . . . .	174
9.1. Параметризация динамики флуктуаций космических лучей на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла . . . . .	175
9.2. Идентификация переходного режима к активной фазе солнечного цикла по космическим лучам . . . . .	180
9.3. Переходный колебательный процесс инверсии общего магнитного поля Солнца в космических лучах . . . . .	183
9.4. Инвариант 11-летнего цикла: «амплитуда-длительность» . . . . .	186
9.5. Предвестник сбоя 11-летней цикличности Солнца в космических лучах на языке «фазовых портретов» . . . . .	193
9.6. Инвариант с характерным масштабом 22-летнего цикла . . . . .	195
9.7. Глобальный сбой 11-летней цикличности как нарушение инварианта 22-летнего цикла . . . . .	197
9.8. Последствия затяжного спада активности Солнца в эпоху «Космической эры» . . . . .	198
Литература к главе 9 . . . . .	202
ПРИЛОЖЕНИЯ к главе 9 . . . . .	205
<b>ЭПИЛОГ</b> . . . . .	209

Валерий Игнатьевич Козлов  
Вячеслав Валерьевич Козлов

АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах.

4-е издание, переработанное и дополненное

Монография издается в авторской редакции.

ИД 05324 от 09 июля 2001 г.

Формат 70x100 1/16.

Бумага писчая № 1. Усл. печ. л. 17,7. Уч.-изд. л. 13,0.

Тираж 350 экз. Заказ № .

Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения СО РАН.  
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН.