

УДК 523.9

Определение длительности всплесков солнечных шумовых бурь по их спектру мощности

Ю. Ф. Юровский

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 20 февраля 2003 г.

Аннотация. По наблюдениям шумовых бурь установлено, что в диапазоне частот 0.001 – 0.1 Гц спектр колебаний их интенсивности описывается гиперболической зависимостью $\overline{G(F)} \sim 1/F$. Показано, что спектр процесса, состоящего из коротких импульсов длительностью до 4 с, в указанном диапазоне плоский, а гиперболический спектр может образоваться из суммы импульсов, длительность которых находится в пределах от 10 до 1000 с. Следовательно, общепринятая гипотеза образования шумовых бурь из кратковременных всплесков противоречит результатам наблюдений. С учетом обнаруженных свойств механизм излучения шумовых бурь должен обеспечивать одновременную генерацию колебаний интенсивности длительностью от долей секунды до 1000 с.

SEARCH FOR DURATION OF BURSTS OF SOLAR NOISE STORMS BY THEIR POWER SPECTRUM, by Yu.F. Yurovsky. A hyperbolic spectrum $\overline{G(F)} \sim 1/F$ of noise storms in the range 0.001 – 0.1 Hz was found by observations. The spectrum of short pulses with duration less than 4 s is flat in a given range. The hyperbolic spectrum can be formed by sum of pulses with duration in the range 10 – 1000 s. Hence a common hypothesis of noise storms forming from short-lived bursts is not confirmed by observations. In view of detected properties the mechanism of emission of noise storms must be able to produce simultaneous oscillations of intensity with duration in the range from fraction of second up to 1000 s.

Ключевые слова: шумовые бури, длительность всплесков

1 Введение

Изучение солнечной активности представляет интерес в связи с ее влиянием на ряд геофизических явлений и экологическую обстановку на Земле (Кочаров, 1987). Типичным проявлением солнечной активности в радиодиапазоне являются шумовые бури (ШБ) на метровых волнах, представляющие собой повышенное, сильно флуктуирующее радиоизлучение, продолжающееся от часов до суток. Обычно предполагается, что флуктуации ШБ состоят из “многочисленных следующих один за другим кратковременных всплесков длительностью порядка секунд и долей секунды” (Железняков, 1964; Элгарей, 1982). Однако справедливость этой общепринятой точки зрения вызывает сомнения по следующим причинам. Известно (Каневский, Финкельштейн, 1963), что спектр одиночного импульса длительностью Δt_b спадает от максимума на “нулевой” частоте ($F = 0$) до нуля приблизительно на частоте $F_b = 1/\Delta t_b$. Если исследуется спектр в области частот $F \ll F_b$, то спектральные свойства импульса приближаются к свойствам короткого (“дельта”) импульса, имеющего плоский

спектр. Моменты появления импульсов ШБ не обнаруживают определенной закономерности и могут рассматриваться как случайные. Из теории случайных процессов известно, что спектр суммы случайных импульсов равен сумме спектров слагаемых (Левин, 1960), поэтому спектр суммы плоских спектров также должен быть плоским. Однако измерение 4-х точек спектра с помощью аналогового спектрометра, выполненное Такакурой (1959), показало, что спектр ШБ в диапазоне частот 0.1 – 30 Гц (периоды 10 – 0.033 с) гиперболический, а не плоский. В указанном диапазоне частот на характер спектра существенно влияет форма огибающей каждого импульса, если его длительность порядка 1 с (при $F_b = 1/\Delta t_b = 1$ Гц условие $F \ll F_b$ не выполняется). Приняв форму импульса экспоненциальной и задав длительность $\Delta t_b = 0.5 - 0.8$ с, Такакура получил спектр, близкий к наблюдаемому, и сделал заключение без каких-либо подтверждений, что и в остальном диапазоне частот шумовую бурю можно представить как сумму налагающихся кратковременных всплесков.

Цифровая регистрация данных наблюдений и современные средства анализа позволяют расширить исследуемый диапазон частот спектра и выяснить, действительно ли шумовая буря может образоваться в результате наложения случайных кратковременных импульсов. Данная работа посвящена выявлению общих свойств спектров флуктуаций интенсивности разных шумовых бурь и оценке на их основе параметров всплесков, из которых может состоять ШБ. Вариации параметров со временем (их динамика) в данной работе не изучалась. Во втором разделе приведены технические характеристики радиотелескопов, с помощью которых получены данные наблюдений, и кратко изложены принятые при анализе данных основные положения стандартного Фурье-анализа. В третьем разделе приведены результаты вычисления спектров мощности десяти ШБ и их усредненные характеристики. В четвертом разделе описывается математическое моделирование случайных процессов, имеющих спектр, подобный спектру ШБ. В заключении перечисляется, в чем полученные результаты уточняют общепринятое представление о свойствах шумовых бурь.

2 Данные наблюдений и методика вычисления спектра

Аппаратура. Наблюдения проводились на двухканальном радиотелескопе КраО, настроенном на частоты 280 и 300 МГц. Регистрировался интегральный поток радиоизлучения от всего диска Солнца. Так как во многих случаях излучение ШБ значительно превышало излучение спокойного Солнца, то вариации потока во время ШБ фактически представляли собой результат излучения ее источника, а вклад остальной части диска и шумов аппаратуры был пренебрежимо мал. Частота отсчетов уровня сигнала каждого канала составляла 10 Гц. Для устранения фрагментации кратковременных интенсивных всплесков ШБ применялась логарифмическая шкала, обеспечивавшая динамический диапазон 30 дБ. Квантование сигнала производилось на ± 512 уровней, точность регистрации при постоянной времени 0.1 с. составляла около 2 – 3% потока невозмущенного Солнца.

Методика вычисления спектра. Спектр анализировался с помощью алгоритма Диминга (1975), ориентированного на решение астрофизических задач. Ширина спектральной “линии” ΔF (инструментальный контур) зависит в основном от длительности D реализации и оценивается как $\Delta F = 1/D$. Инструментальный контур описывается выражением типа $\sin(x)/x$ и содержит заметные ($\approx 20\%$) боковые максимумы. Для их сглаживания применялось “окно” $1 + \cos(2\pi t/D)$, где t – текущее время, D – длина реализации и $0 < t < D$.

Вычисление спектра мощности по ряду из N значений накладывает определенные условия на способ задания исходных данных. Минимально необходимая длина реализации оценивалась с помощью выражения (Блэкман, Тьюки, 1958):

$$D > (1/2 + 200/2dB + n/3)\Delta t_{max},$$

где dB – требуемая стабильность результатов при расчете по различным реализациям, выраженная в дБ и принятая равной $30\% = 9.5$ дБ; n – число реализаций при вычислениях среднего спектра. Мы принимали $n=1$; $\Delta t_{max} = 1/F_{min}$ – максимальный период, соответствующий минимальной частоте спектральных составляющих, которые предполагалось изучать по данной реализации. Число точек

N , из которых должна состоять реализация длиной D с, определялось с помощью соотношения (Блэкман, Тьюки, 1958):

$$N > (3/2 + 600/2dB + n)(\Delta t_{max} - \Delta t_{min})/\Delta t_{min},$$

где $\Delta t_{min} = 1/F_{max}$ – минимальная длительность составляющих.

Приведенные условия имеют ясный физический смысл: если за время длительности флуктуации Δt_{min} производится меньше двух отсчетов уровня сигнала (частота Найквиста), то информация о таких событиях теряется. Процесс нужно регистрировать достаточно долго, чтобы флуктуации длительностью Δt_{max} вошли в исходные данные с определенной степенью вероятности. Оценки показывают, что для изучения периодов в интервале 1 – 5 мин длина реализации $D > 10\Delta t_{max} > 50$ мин и $N > 7200$ отсчетов.

Спектры ШБ аппроксимировались двухпараметрической степенной функцией $\overline{G(F)} = I \times F^{-p}$ для численной оценки и сравнения спектров разных ШБ. Величина I зависела от интенсивности ШБ и нас мало интересовала, так как интенсивности выбранных ШБ заведомо существенно различались. Параметр p характеризовал форму кривой среднего значения спектра и представлял основной интерес.

Из-за случайной модуляции амплитуды и времени появления флуктуаций спектр ШБ изрезан и имеет множество максимумов. Чтобы выяснить, имеются ли в спектре выделяющиеся компоненты, мы вычисляли 99% доверительный уровень для чисто шумового сигнала. При этом учитывалось, что спектр шума представляет собой случайную величину, закон распределения которой имеет вид $p(G_n) = e^{-G_n}$, где G_n – спектральная плотность шума (Витязев, 2001). Вероятность того, что ординаты спектра превзойдут заданную величину $G_q(F)$, определяется формулой

$$P[G(F) > G_q(F)] = \int_{G_q(F)}^{\infty} p(G_n) dG_n = e^{-G_q(F)}.$$

Задавая уровень значимости $q=0.01$, определяющий вероятность редкого события - превышение ординатой спектра заданной величины, для уровня достоверности получим выражение $G_q(F) = -\ln(q)$. Это означает, что с вероятностью $P = 1 - q = 0.99$ можно утверждать, что те значения спектра, которые превышают уровень $G_q(F)$, генерируются не шумом с плоским спектром.

Поскольку спектр во всем диапазоне частот может быть не плоским, мы разделили весь частотный диапазон на 9 фрагментов и сделали допущение, что в пределах каждого фрагмента спектр плоский. При плотности вероятности $p(G_n) = e^{-G_n}$ среднее значение $\overline{G(F)}$ и уровень доверия связаны соотношением $G_q(F) = -\ln(q)\overline{G(F)} = 4.6\overline{G(F)}$.

Для каждого фрагмента вычислялось среднее значение спектра $\overline{G_k(F)}$ и определялся уровень доверия $G_{qk}(F)$. Через полученные точки проводилась сглаженная кривая. Эта кривая показывает уровень, ниже которого должно находиться в среднем 99 из 100 точек спектра, и только одна ордината спектра из 100 может его превышать. Следовательно, превышение уровня доверия одним процентом из вычисленных точек спектра допустимо по условию и не обозначает, что в спектре имеются линии, появление которых объясняется особыми свойствами исходного процесса, а не статистическими флуктуациями его параметров.

3 Спектры шумовых бурь

Для вычисления спектров мы отобрали 10 ШБ, происходивших в 2001 – 2002 годах и разделенных промежутком времени более месяца. Это давало основание полагать, что результаты относятся к различным ШБ, а не к одной и той же длительно существовавшей ШБ. Наличие синхронных записей на близких частотах 280 и 300 МГц позволяло сравнивать характеры спектров на этих частотах. Запись разделялась по времени на два равных фрагмента, для каждого из которых вычислялось среднее значение и дисперсия. Если эти значения отличались не более чем на величину статистических флуктуаций, то ШБ считалась стационарной на выбранном участке и запись принималась к обработке. Исследовались записи продолжительностью от 30 мин до 175 мин.

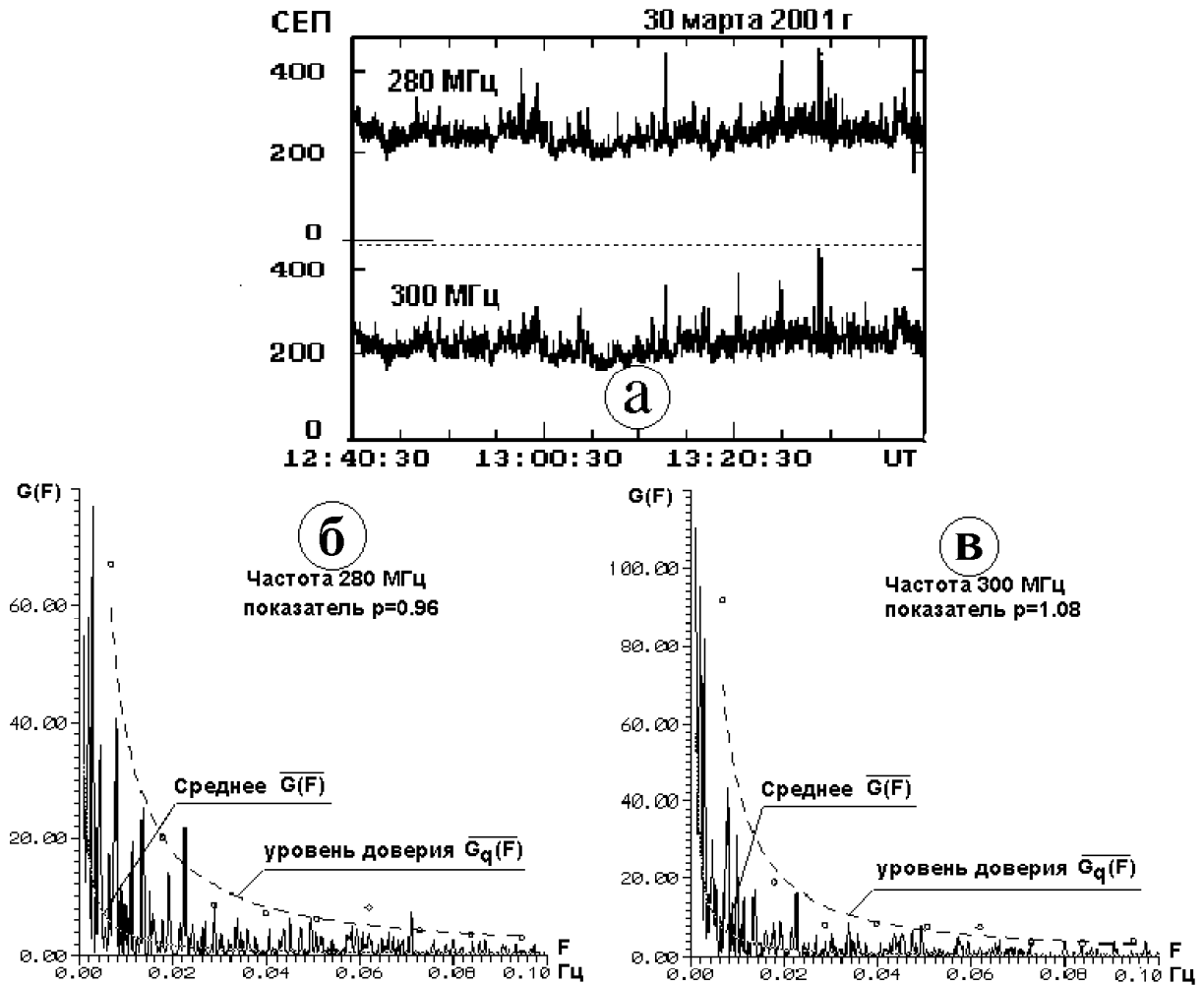


Рис. 1. Общий вид фрагмента шумовой бури 30 марта 2001 г. (а). Спектры этой ШБ на частотах 280 МГц (б) и 300 МГц (в). Показатель степени функции $\overline{G(F)}$ в обоих случаях близок к 1

Верхняя частота спектра F_{max} выбиралась из условия перекрытия с диапазоном спектра, исследованным Такакурой (1959). Нижняя частота F_{min} определялась длиной реализации (временем наблюдений) и условием появления на ней достаточного количества колебаний максимальной длительности $\Delta t_{max} = 1/F_{min}$. В результате границы спектра оказывались разными, но диапазон частот сохранялся одинаковым, равным $F_{max}/F_{min}=100$. Например, по реализации продолжительностью 170 минут спектры вычислялись в диапазоне частот $0.001 < F < 0.1$ Гц. Диапазон периодов, соответствующий этим границам, составляет $1000 < \Delta t < 10$ с или приблизительно от 16 мин до 10 с. Спектр случайного процесса непрерывный и содержит бесконечное количество частот. Мы ограничились вычислением спектральной плотности в 1000 точках, равномерно расположенных на оси частот с интервалом $\Delta F = (F_{max} - F_{min})/1000$ Гц.

На рис. 1 показан общий вид ШБ 30 марта 2001 г. и вычисленные спектры. Функция $\overline{G(F)}$, аппроксимирующая среднее значение спектра, изображена пунктирной линией. Уровни доверия для каждого из 9 участков обозначены кружками. Проведенная через эти точки сглаженная кривая $\overline{G_q(F)}$ нанесена штриховой линией.

Спектры характеризуются монотонным спадом плотности с увеличением частоты. Аппроксими-

рующая функция имеет показатель степени $p=0.96$ и 1.08 на частотах 280 и 300 МГц. Ординаты практически не превышают доверительный уровень, следовательно, ни в одной области частот нет достоверно выделяющихся компонент. Результаты вычисления спектров других записей ШБ сведены в таблицу 1, где интенсивность ШБ выражена в солнечных единицах потока ($1 \text{ СЕП}=10^{-22} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$).

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что показатель спектра p всех ШБ близок к единице, несмотря на разную интенсивность и различие диапазона частот. В среднем по всем случаям $p = 1.047 \pm 0.098$. Можно считать установленным, что в диапазоне $0.001-0.1$ Гц спектр ШБ в среднем описывается зависимостью $\overline{G(F)} \sim 1/F$.

Таблица 1. Перечень параметров исследованных шумовых бурь

Дата	Начало УТ	Интервал	Поток ШБ	Диапазон	Показатель p	Показатель p
		час:мин	СЕП	спектра, Гц	на 280 МГц	на 300 МГц
30.03.2001	12:40:30	2:30	200	0.001-0.1	0.96	1.08
07.05.2001	05:18:00	0:40	25	0.002-0.2	1.02	1.09
14.06.2001	05:16:24	0:30	30	0.005-0.5	1.21	1.01
20.11.2001	08:56:10	2:30	22	0.001-0.1	0.93	0.95
25.12.2001	09:09:54	1:00	70	0.002-0.2	0.88	1.08
04.01.2002	07:23:32	1:00	40	0.002-0.2	1.18	1.07
14.02.2002	06:01:05	2:30	25	0.001-0.1	0.96	0.98
28.03.2002	05:55:19	2:55	20	0.001-0.1	0.97	0.99
10.04.2002	08:11:29	1:30	17	0.002-0.2	1.11	1.13
08.05.2002	08:23:38	2:30	20	0.001-0.1	1.27	1.08

4 Математическое моделирование спектра суммы случайных импульсов

Временной профиль всплесков ШБ в среднем симметричен относительно максимума интенсивности (Гроот, 1966). Будем описывать профиль выражением $a(t) = A[1 - \cos(2\pi t/\Delta t)]$ в диапазоне $0 < t < \Delta t$, где Δt – длительность импульса (сглаженный импульс). Спектр единичного импульса непрерывный и спадает от максимума на постоянной составляющей (на частоте $F = 0$) приблизительно до нуля на частоте $F = 1/\Delta t_{eff}$.

На рис. 2 показаны спектры несимметричного импульса (1), у которого задний фронт четверо длиннее переднего, и спектр (2) сглаженного импульса. По оси абсцисс отложена безразмерная величина $F\Delta t$, где Δt – длительность изучаемых компонент. Заметим, что каждый импульс имеет некоторую длительность Δt_i , поэтому его можно характеризовать также параметром $F_i = 1/\Delta t_i$. Он имеет размерность частоты, но периодичность при этом не подразумевается. Как видно на рис. 2, в области значений параметра $0 < \Delta t < 0.25$ спектр спадает на 10% от максимума. Кривые 1 и 2 в этой области отличаются незначительно, поэтому можно полагать, что временной профиль импульса не влияет существенно на рассматриваемое свойство спектра.

Всплески ШБ появляются в случайные моменты времени и имеют случайную интенсивность (Фоккер, 1960). Спектр сигнала, состоящего из случайных импульсов, является суммой спектров слагаемых (Левин, 1960). Следовательно, если спектр изучается в области частот $F < 0.25/\Delta t$, то он должен отличаться от плоского лишь приблизительно на 10%. Создадим искусственный сигнал из 18000 импульсов сглаженного профиля длительностью $\Delta t=4$ с, случайно расположенных на оси времени продолжительностью 2.5 часа. Амплитуду каждого импульса примем случайной, равномерно распределенной в пределах $0 - 10$ относительных единиц. Так как средний интервал времени между соседними импульсами равен 0.5 с, то в течение продолжительности одного импульса появится в среднем еще 8 импульсов. В результате эти импульсы будут налагаться друг на друга, образуя один более длительный импульс.

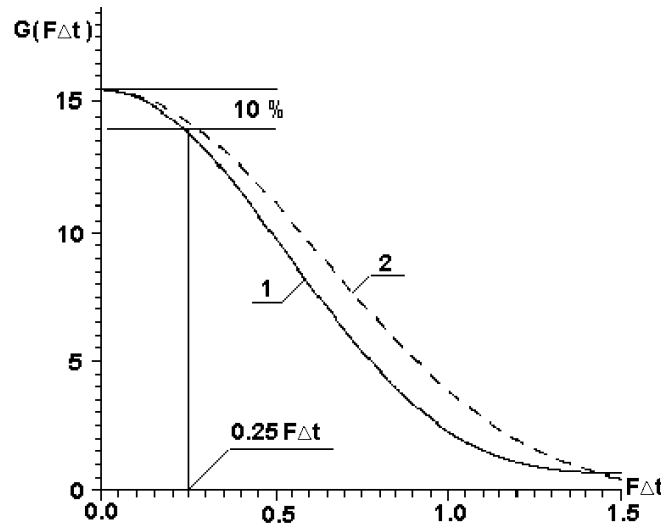


Рис. 2. Спектры: 1 – асимметричного импульса, задний фронт которого в 4 раза длиннее переднего, 2 – сглаженного импульса. Спектры спадают на 10% при $F\Delta t = 0.25$, что соответствует длительности компонент, в 4 раза превышающей длительность импульса

Спектр такого синтезированного сигнала в диапазоне 0.001 – 0.1 Гц показан на рис. 3а. Показатель сглаженного спектра $p=0.01$ настолько мал, что можно принять $\overline{G(F)} \approx const$, т.е. спектр получается плоским в диапазоне $[F_{min}, F_{max}]$, если $F_{max} = 0.4/\Delta t$. Семь точек спектра превышают уровень доверия 99%, что составляет 0.7% от 1000 вычисленных точек и достаточно близко к заданному по условию количеству возможных превышений. Согласно общепринятому мнению (Уайлд, 1951; Виткевич, Горелова, 1961; Ецков, 1966; Гроот, 1966; Састри, 1969; Такакура, 1959; Элгарей, 1957; Элгарей, 1961; Элгарей, 1967; Эллис, 1969; Элгарей, Угленд, 1970; Элгарей, 1982; Элгарей, 1977; Хэнез, 1966 и т.д.), всплесковый компонент ШБ состоит из наложения кратковременных всплесков длительностью 0.1 – 1.0 с. Если бы эта точка зрения соответствовала действительности, то спектр ШБ должен был бы быть еще ближе к плоскому.

Следовательно, переменная составляющая ШБ не является суммой кратковременных импульсов, так как спектр такой суммы плоский, что не согласуется с наблюдаемым гиперболическим спектром ШБ.

5 Математическая модель сигнала с гиперболическим спектром

Создадим сигнал из суммы импульсов произвольной длительности Δt_k , расположенных случайно на оси времени $D=150$ мин. Для моделирования равномерного распределения частот импульсов зададим $k=10$ частот F_k из диапазона 0.001-0.1 Гц с шагом $\Delta F = (0.1 - 0.001)/9 = 0.011$ Гц. Каждой частоте $F_k = F_{min} + k\Delta F$, будет соответствовать длительность импульсов Δt_k , лежащая в диапазоне 10 – 1000 с. Согласно теории случайных процессов (Левин, 1960), средняя частота следования случайных импульсов обратно пропорциональна их средней длительности $F_k = 1/\Delta t_k$. Поэтому число импульсов длительностью Δt_k на реализации длиной D определим как $n_k = D/\Delta t_k$. Момент появления каждого импульса выберем случайным и равновероятным в пределах D . Огибающую импульса примем сглаженной, а амплитуду выберем случайной в пределах 0 – 10 относительных единиц.

Спектр синтезированного сигнала показан на рис. 3б. Сглаженное значение спектра $\overline{G(F)} = const/F^p$ имеет $p=1.05$, что достаточно близко к единице, поэтому можно принять $\overline{G(F)} \sim 1/F$. Таким образом, ШБ можно представить как сумму импульсов, длительность которых $\Delta t = 1/F$

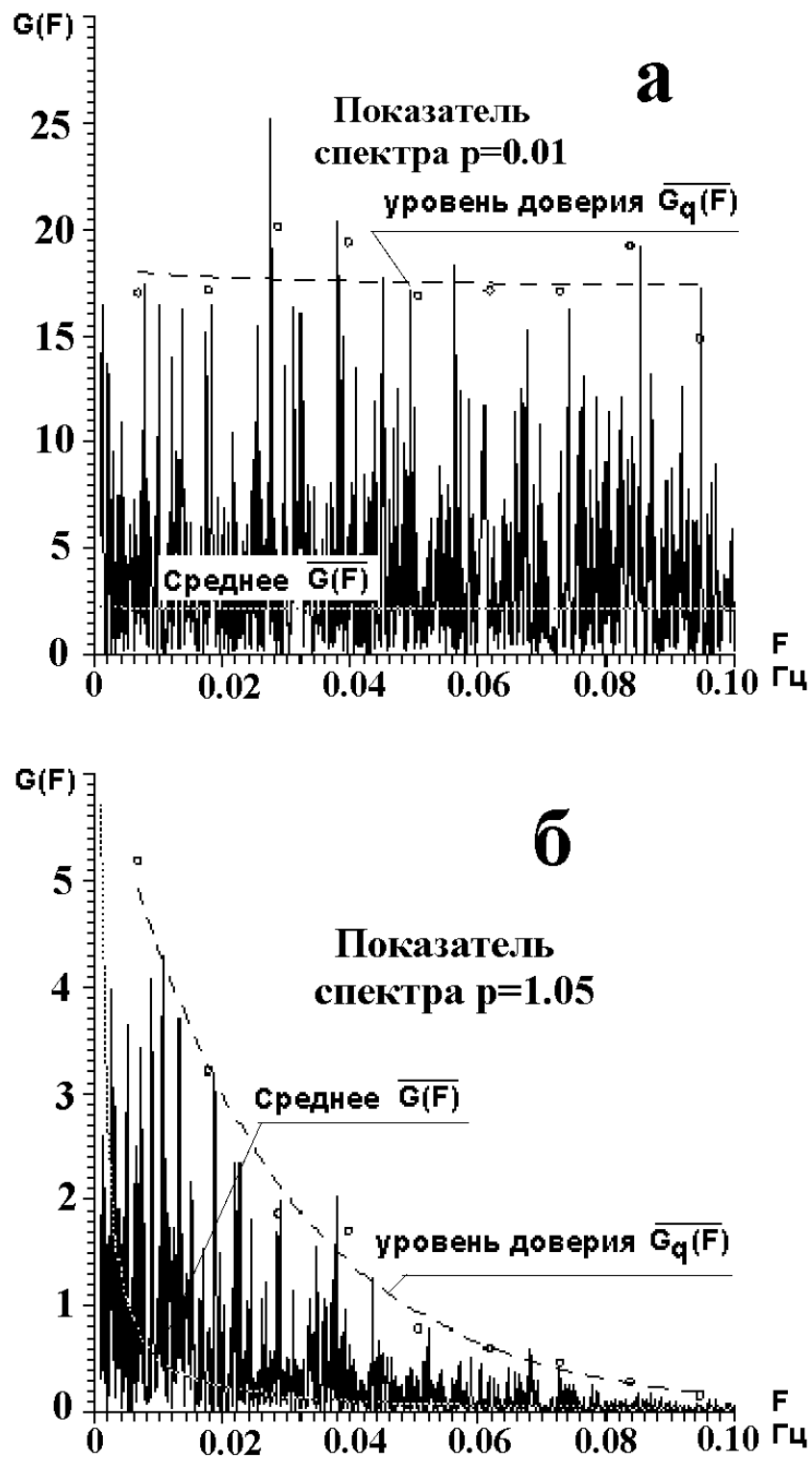


Рис. 3. Плоский спектр сигнала, состоящего из наложения коротких импульсов длительностью 4 с (а) и гиперболический спектр суммы импульсов длительностью от 10 до 1000 с (б)

определяется равномерным распределением частоты F в пределах диапазона $[F_{min}, F_{max}]$.

6 Заключение

В литературе, посвященной определению длительности всплесков ШБ, для анализа отбирались простые, изолированные, не искаженные наложением всплески. В результате длительные события исключались из рассмотрения. Распространение результатов анализа неполной выборки событий на свойства всей ШБ неправомерно и привело к ошибочному заключению о формировании ШБ только из отобранных коротких всплесков. Мы исследовали с помощью Фурье-анализа всю запись ШБ без какой-либо предварительной селекции компонент и пришли к следующим выводам.

1. В среднем плотность спектра мощности колебаний интенсивности ШБ удовлетворительно описывается выражением $\overline{G(F)} \sim 1/F$.

2. Спектр монотонный и не содержит компонент, превышающих уровень статистических флуктуаций, т.е. результаты наблюдений не выявляют наличие устойчивых периодических или резонансных свойств источника излучения.

3. Общепринятая гипотеза образования ШБ из кратковременных всплесков противоречит наблюдениям, так как спектр суммы кратковременных импульсов плоский, а реальные ШБ имеют гиперболический спектр.

4. Механизм излучения ШБ должен обеспечивать одновременную генерацию колебаний интенсивности (всплесков) длительностью от долей секунды до 1000 с.

5. Гипотезы образования ШБ, в которых не предусматривается возможность возникновения длительных импульсов (например, быстрое нарастание плазменных колебаний и их последующее свободное затухание или генерация импульсов в результате столкновения ударных фронтов) могут быть исключены из рассмотрения.

Литература

- Блэкман, Тьюки (Blackman R.B., Tukey J.W.) // The measurement of Power spectra from Point of View of Communications. Eng. Dover. New York. 1958.
- Витязев В.В. // "Вейвлет-анализ временных рядов". Изд. С.-Петербургского университета. 2001. С. 58.
- Виткевич, Горелова (Vitkevich V.V., Gorelova M.V.) // Sov. Astron. 1961. V. 4. P. 595.
- Гроот (de Groot T.) // Rech.Astr.Obs.Utrecht. 1966. V. 18. N. 1.
- Ецков (Eckhoff H.K.) // Rep. 18, Inst. Theor. Astrophys. 1966. Oslo.
- Диминг (Deeming T.J.) // Astrophysics and Space Science. 1975. V. 36. P. 137.
- Денисс (Denisse J.P.) // Inf.Bull.Solar Radio Obs. 1960. N. 4 and URSI 13th General Assembly, London 1960.
- Каневский З.М., Финкельштейн М.И. // "Флуктуационная помеха и обнаружение импульсных радиосигналов". М.: Госэнергоиздат. 1963. С. 215.
- Левин Б.Р. // "Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике". М.: Сов.радио. 1960. С. 663.
- Кочаров Г.Е. // Сб. "Солнечная активность и солнечно-земные связи". Ред. Кочаров Г.Е. Л.: ФТИ. 1987. С. 203.
- Састри (Sastri S.H.V.) // Solar.Phys. 1969. V. 10. P. 429.
- Такакура (Takakura T.) // Publ. of the Astron. Soc. of Japan. 1959. V. 11. N. 2. P. 71.
- Железняков В.В. // "Радиоизлучение Солнца и планет". М.: "Наука". 1964. С. 560.
- Элгарей (Elgaroy Q.) // Report N. 47. Paris Symposium on Radio Astronomy. / Ed. Bracewell. Stanford, California. 1957. P. 244.
- Элгарей (Elgaroy Q.) // Astrophys. Norv. 1961. V. 7. P. 123.
- Элгарей (Elgaroy Q.) // Astrophys.Lett. 1967. V. 1. P. 13.
- Эллис (Ellis G.R.A.) // Austr.J.Phys. 1969. V. 22. P. 177.

Элгарей, Углэнд (Elgaroy Q., Ugland O.) // *Astron.Astrophys.* 1970. V. 5. P. 372.

Элгарей (Elgaroy Q.) // *Solar Noise Storms.* Pergamon Press. 1977. P. 363.

Элгарей (Elgaroy Q.) // *Pros.4th CESRA Workshop on "Solar Noise Storm.* / Eds: Benz A.O., Zlobec P., Trieste, Italy. 1982. P. 347.

Хэнэз (Hanasz J.) // *Aust.J.Phys.* 1966. V. 19. P. 635.

Уайлд (Wild J.P.) // *Austr.J.Sci.Res.* 1951. A4. P. 36.