

УДК 523.9

О природе всплескового компонента солнечных шумовых бурь

Ю. Ф. Юровский, Ю. Ю. Юровский

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 20 февраля 2006 г.

Аннотация. Анализ солнечных шумовых бурь (ШБ) с помощью разработанного алгоритма разложения случайного сигнала на импульсы показал, что распределение длительности обратно пропорционально квадрату продолжительности всплесков, а максимум соответствует граничной длительности импульсов 0.4-0.6 с. Суммарное время существования всех коротких всплесков ШБ приблизительно равно суммарному времени существования всплесков любой другой длительности. Энергия коротких всплесков длительностью 0.2-0.4 с в 5 раз меньше энергии более длинных всплесков и составляет лишь около (2-5)% энергии всплескового компонента ШБ. Мощность всплесков достигает максимума при длительности 1.2-1.4 с и далее до 300 с остается почти неизменной. Таким образом, измерение энергии всплесков не подтверждает распространенное мнение о том, что ШБ состоит из кратковременных всплесков I типа.

THE NATURE OF BURST COMPONENT OF SOLAR NOISE STORMS, by Yu.F. Yurovsky and Yu.Yu. Yurovsky. The analysis of solar noise storms (NS) by using a decomposition of a random signal into pulses has shown that distribution of duration of bursts is inversely proportional to the square of their duration. The maximum of distribution corresponds to boundary duration of pulses 0.4-0.6 s. The total time of existence of all short NS bursts approximately is equal to the total time of existence of bursts of any other duration. The total energy of bursts with duration 0.2-0.4 s is 5 times less than the total energy of longer bursts and contains only about (2-5)% of energy of NS bursts. Intensity of bursts has maximum near duration 1.2-1.4 s and remains almost constant up to 300 s. Thus, the measurement of burst energy does not confirm the wide-spread opinion that NS consist of short-lived I-type bursts.

Ключевые слова: радиоизлучение Солнца, шумовые бури, энергия всплесков.

1 Введение

Повышения плотности потока солнечного радиоизлучения продолжительностью от десятков минут до нескольких суток, подверженные флуктуациям и охватывающие широкий диапазон частот от дециметровых до дециметровых волн, называются шумовыми бурями (ШБ). Флуктуации ШБ считаются состоящими из многочисленных *короткоживущих* всплесков (Железняков, 1964; Элгарей, 1977). Если бы это соответствовало действительности, то спектр ШБ был бы плоским подобно спектру “дробового” шума вакуумного диода (Тихонов, 1982). Однако спектр ШБ не плоский, а гиперболический (Юровский, 2003), т.е. наблюдаемые свойства ШБ не подтверждают гипотезу образования всплескового компонента из короткоживущих всплесков. Тем не менее, в

литературе продолжает обсуждаться композиция ШБ из коротких всплесков I типа (Сандерем, Сабрениен, 2004) и возможность их генерации *нановспышками* (Мерсье, Тротье, 1997).

В связи с изложенным в данной работе проведен детальный анализ статистического описания ШБ. Разработан алгоритм разложения ШБ с помощью современной вычислительной техники. Изложены результаты исследования с помощью этого алгоритма времени излучения и энергии импульсов ШБ.

2 Распределение длительности случайных импульсов.

Для определения “характерной” длительности импульсов ШБ обычно используется гистограмма, интерпретируемая в литературе (см. ссылки в обзоре (Элгарей, 1977)) как зависимость количества наблюдаемых всплесков от их продолжительности. Гистограмма имеет максимум в области импульсов короткой длительности, и на этом основании делается заключение о том, что ШБ состоит из короткоживущих всплесков. Недостаточная обоснованность этого утверждения следует уже из того, что гистограмма не содержит сведений об интенсивности импульсов и поэтому не может служить основанием для решения вопроса о том, во всплесках какой длительности сосредоточена энергия ШБ.

Длительность всплесков D является случайной величиной и описывается *плотностью вероятности* $w(D)$, которая определяется как предел вероятности попадания величины D , лежащей в диапазоне $[D_{min}, D_{max}]$, в малый интервал $[D_i, D_i + \Delta D]$ к длине этого интервала ΔD при $\Delta D \rightarrow 0$ (Тихонов, 1982):

$$w(D) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \frac{n_k}{N_{\Sigma} \Delta D} \quad (D_{min} < D < D_{max}). \quad (1)$$

Распределение длительности имеет размерность 1/сек = Гц, т. е. пропорционально средней частоте следования импульсов. Для оценки закона распределения область экспериментальных значений $[D_{min}, D_{max}]$ разбивают на некоторое количество обычно одинаковых интервалов длиной ΔD (бинов) и вычисляют число точек n_k , попадающих в каждый бин k . Подсчитанные таким образом значения плотности расположения точек в каждом бине $n_k/\Delta D$ изображают графически в виде ступенчатой кривой: на оси абсцисс откладывают соответствующие интервалы и на каждом из них, как на основании, строят прямоугольник, высота которого равна значению плотности $n_k/\Delta D$. Чтобы результат не зависел от объема выборки, плотность нормируют к полному количеству событий N_{Σ} в выборке (см. формулу (1)). Полученная ступенчатая кривая называется *гистограммой*.

Так как средняя частота следования случайных импульсов асимптотически обратно пропорциональна их средней длительности (Левин, 1960), то гистограмма $w(D)$ характеризуется монотонным спадом от максимального значения в районе D_{min} до минимального при $D \rightarrow D_{max}$. Следовательно, максимум на гистограмме соответствует не наибольшей вероятности *наблюдения* импульсов длительностью D_{min} , а определяет лишь минимальную длительность, которую способен генерировать механизм излучения из-за своей “инерционности”.

3 Суммарное время излучения всплесков различной длительности

Импульс *наблюдается* в произвольный момент t , если его интенсивность $I > \theta$. Вероятность обнаружения импульсов равна отношению суммарного времени их существования t_{Di} к полному времени наблюдений t_{Σ} : $W(I > \theta) = t_{Di}/t_{\Sigma}$ (Тихонов, 1982). Чтобы критерий отбора импульсов в разные бины был одинаковым, нужно либо изменять размер интервала $\Delta D_i = \Delta D \times D_{max}/D_k$, либо изменять количество всплесков в бинах гистограммы, рассчитанной при постоянном интервале ΔD : $n_i = n_k \times D_k/D_{max}$.

Произведение количества импульсов $n_k \times D_k / D_{max}$ гистограммы $w(D)$ на их длительность D_k дает интервал времени t_{Di} , занимаемый импульсами с одинаковым отклонением длительности в каждом бине k :

$$t_{Di} = w(D_k) N_{\Sigma} \Delta D D_k^2 / D_{max}.$$

Суммарное время излучения всех импульсов, входящих в гистограмму, равно $t_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{N_b} n_k D_k^2 / D_{max}$, где $N_b = \frac{D_{max}}{\Delta D}$ – количество бинов гистограммы.

Отсюда находим вероятность *наблюдения* импульсов длительностью D_i :

$$W(I > 0) = t_{Di} / t_{\Sigma} = \frac{w(D_k) \Delta D N_{\Sigma} D_k^2}{t_{\Sigma} D_{max}},$$

которая показывает, какую часть всего времени излучения источник генерирует всплески *заданной* длительности D_i .

Таким образом, распределение длительности $w(D)$ характеризует *частоту появления* импульсов, а вероятность *наблюдения* $W(I > 0)$ показывает, какую часть всего времени излучения источник генерирует эти всплески. Но обе характеристики не содержат сведений об интенсивности всплесков и поэтому не могут служить основанием при решении вопроса о том, во всплесках какой длительности сосредоточена энергия источника ШБ.

4 Разложение случайного сигнала на компоненты

Для измерения параметров импульса сначала нужно как-то выделить его на записи, т. е. назвать “импульсом” локальное во времени изменение интенсивности. В опубликованной литературе предполагается, что в некоторые моменты времени наложение отсутствует и поэтому импульсы, “наименее искаженные наложением”, “изолированные”, “единичные” или “имеющие сглаженный профиль” являются готовыми элементами разложения. Однако часто импульсы располагаются на оси времени настолько тесно, что разделить их на отдельные компоненты затруднительно, и такие участки данных просто исключаются из рассмотрения. Заметим, что в результате полученная выборка данных уже не отражает полностью свойств генеральной совокупности (т. е. ШБ) (Тихонов, 1982).

Случайно расположенные на оси времени не перекрывающиеся импульсы образуют *пуассоновский поток* событий (Тихонов, 1982). Вероятность того, что событие появится на заданном участке времени t раз или более выражается через неполную гамма-функцию, значения которой в зависимости от *интенсивности потока событий* $\nu = N_{\Sigma} / t_{\Sigma}$ приводятся в (Левин, 1960). По указанным таблицам находим, что $m \geq 1$ событий произойдет за единицу времени с вероятностью 0.995 при интенсивности потока $\nu = 8$. Если единицей времени считать минимальную длительность D_{min} , то это значит, что за время жизни импульса длительностью $8 \times D_{min}$ обязательно появится по крайней мере еще один короткий импульс, и этот участок записи будет исключен из рассмотрения. Следовательно, относительная ширина гистограммы будет составлять приблизительно $D_{max} / D_{min} = 8$. Для сравнения этой величины с эмпирическими результатами мы воспользовались 18 парами величин D_{min} и D_{max} , приведенными в обзоре (Элгарей, 1977). Среднее значение ширины гистограмм оказалось равным $(8.5 \pm 0.8) D_{min}$, что удовлетворительно совпадает с нашей аналитической оценкой. Следовательно, максимальная длительность событий на опубликованных гистограммах определялась не физическими свойствами изучаемого процесса, а методом разложения сигнала на компоненты.

Методика разложения, выявляющая импульсы любой длительности. Отдельным импульсом будем считать любой максимум, лежащий между двумя минимумами (Фоккер, 1960) (рис. 1, панель б). Если запись является суммой отдельных компонент, то вычитание из начальной кривой импульсов какой-либо одной длительности никак не влияет на количество импульсов другой длительности. На этом основан разработанный нами алгоритм разложения ШБ. Иллюстрация способа разложения приведена на рис. 1.

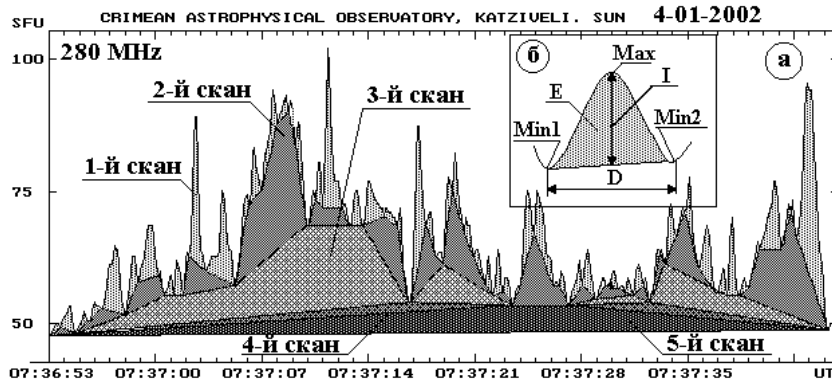


Рис. 1. Разложение случайного сигнала на импульсы

При первом проходе (скане) на записи сигнала отыскивался очередной импульс, определялась и запоминалась его длительность D , интенсивность I и энергия E , после чего он вычитался из исходной кривой. Затем отыскивался следующий импульс, измерялись его параметры и т. д. до конца реализации. После этого скан по реализации повторялся с ее начала. Повторение сканов производилось тех пор, пока не выявлялся последний импульс, почти равный длине реализации (см. рис. 1, панель *a*). При таком способе разложения обеспечивается полная воспроизводимость результатов и включение в рассмотрение компонент любой длительности.

5 Время излучения, энергия и мощность всплесков шумовых бурь

Наблюдения проводились на патрульном радиотелескопе Службы Солнца НИИ «КраО» на частотах 280 и 300 МГц. Вариации потока фактически представляли собой результат излучения мощного источника ШБ, а вклад остальной части диска и шумов аппаратуры был пренебрежимо мал. Частота отсчетов уровня сигнала составляла 10 Гц, точность регистрации при постоянной времени 0.1 с составляла около (2-3)% потока невозмущенного Солнца.

Для исследования были отобраны 10 ШБ, происходивших в 2001-2002 годах и разделенных промежутком времени более месяца. Это давало основание полагать, что результаты анализа относятся к различным ШБ, а не к одной и той же длительно существовавшей ШБ. Продолжительность записей составляла от 30 мин до 175 мин.

Результаты анализа, выявившего более 200 000 всплесков, показаны на рис. 2 в виде наложения графиков. Заметная на графиках концентрация найденных значений около средней величины свидетельствует о том, что закономерности изменения изучаемых свойств характерны для всех рассмотренных ШБ.

Распределение длительности $w(D)$ в диапазоне $D_{max} > 10D_{min}$ теряет наглядность из-за быстрого убывания ординат. Поэтому были вычислены три распределения в трех последовательных диапазонах длительностей 0.3-3 с, 3-30 с и 30-300 с. Полученные графики $w(D)$ объединены на одном рис. 3. Можно отметить, что распределения длительности описываются одним и тем же законом $f(D) \approx a/D^2$. Графики зависимости энергии импульсов от их длительности E/E_s также объединены на рис. 3 и свидетельствуют о том, что энергия всплесков практически не зависит от их длительности во всем исследованном диапазоне от 0.3 до 300 с.

Вычисления позволили выявить следующие общие свойства ШБ:

1. Закон распределения длительности $w(D)$ (средней частоты повторения всплесков) описывается показательной функцией $f(D) = a/D^2$.
2. Максимум распределения соответствует длительности всплесков 0.4-0.6 с.

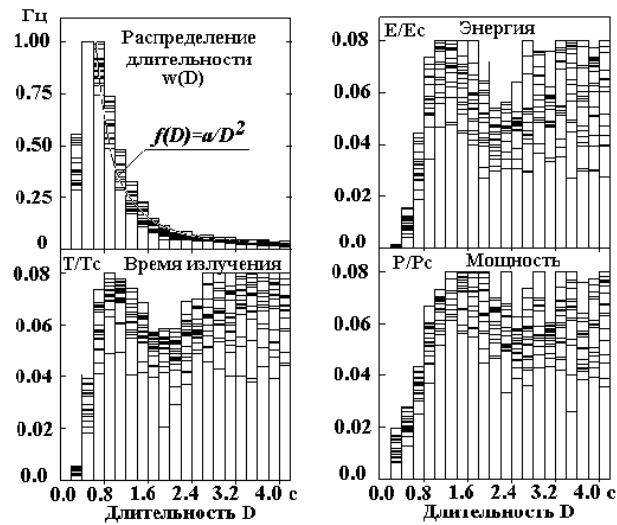


Рис. 2. Распределение длительности, время излучения, энергия и мощность импульсов 20-ти разных ШБ, содержащих более 200 000 всплесков

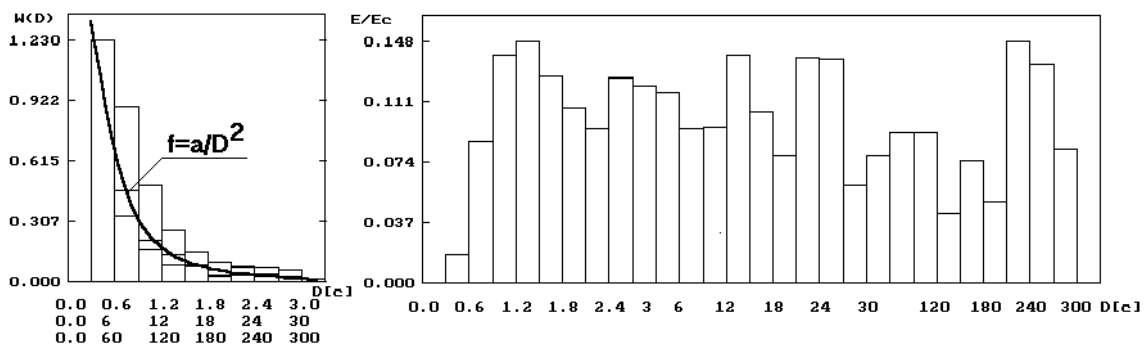


Рис. 3. Распределение длительности и энергии всплесков ШБ в 3-х диапазонах длительности

3. Суммарное время излучения всплесков быстро возрастает по мере увеличения их длительности от 0.2 до 0.8 с, а после 0.8 с остается максимальным и почти не зависит от продолжительности всплесков.
4. Суммарная энергия коротких всплесков длительностью 0.2-0.4 с приблизительно в 5 раз меньше энергии более длинных всплесков.
5. Мощность импульсов достигает установившегося значения при длительности 1.2-1.4 с и далее остается почти неизменной и максимальной вплоть до длительности 300 с.

6 Обсуждение результатов анализа шумовых бурь

Итак, выяснено, что ШБ не может состоять только из всплесков короткой длительности, так как источник затрачивает одинаковое количество энергии на генерацию всплесков любой длительности. Длительность всплесков в “плазменных” гипотезах происхождения ШБ (Такакура, 1963; Железняков, 1970; и др.) определяется либо продолжительностью столкновения альвеновских (или ударных) волн, либо временем затухания плазменных колебаний и поэтому является короткой. В другой группе гипотез рассматривается циклотронный механизм генерации радиоволн

потоками ускоренных электронов. Предполагается, что неустойчивость системы поток-плазма приводит к появлению коротких всплесков продолжительностью 0.6 с (Мэнжени, Велтри, 1976). Следовательно, упомянутые гипотезы не объясняют наблюдаемые свойства ШБ.

Обе группы гипотез (и плазменная, и циклотронная) основаны на предположении о существовании потока ускоренных электронов. Очевидно, что время существования этих потоков должно быть не меньше продолжительности ШБ, иногда длящейся часами и днями. Электроны, инжектированные в область источника ШБ, теряют свою энергию из-за столкновения с тепловыми частицами окружающей плазмы за время (Элгарей, 1977)

$$t_E \approx \frac{1.5 \times 10^8 E^{3/2}}{N_e},$$

где E – кинетическая энергия быстрых электронов в кэВ , N_e – концентрация этих электронов в см^{-3} . Взяв типичные значения $E = 100 \text{ кэВ}$ и $N_e = 10^{-8} \text{ см}^{-3}$, получаем $t_E \approx 2.5 \text{ мин}$. Следовательно, электроны должны непрерывно ускоряться в источнике излучения или откуда-то инжектироваться. Одна из возможностей постоянного существования в активной области быстрых электронов рассмотрена в (Каплан, Пикельнер, Цытович, 1977) и заключается в накоплении ускоренных частиц в магнитной ловушке активной области благодаря наличию ионно-звуковых волн.

Таким образом, излучение ШБ, по высоте захватывающее фактически всю корону от 0.1 до $(2-3)R_\odot$, можно рассматривать как признак существования в этой области ускоренных электронов, кинетическая температура которых превышает температуру короны.

7 Выводы

1. Гистограмма длительности не является достаточным основанием для определения компонентного состава ШБ, так как не содержит информации об энергии этих компонент.
2. В диапазоне длительности от 1 до 300 с энергия всплесков приблизительно одинакова, а доля энергии коротких всплесков длительностью менее 1 с составляет лишь около (2-5)%.
3. Гипотезы происхождения ШБ, в которых предусматривается излучение только короткоживущих импульсов радиоизлучения, нуждаются в уточнении, так как 95% энергии излучается в виде долгоживущих всплесков.
4. В активной области, над которой существует источник ШБ, происходит постоянное ускорение заряженных частиц, повышающее их кинетическую температуру.

Литература

- Железняков В.В. // Радиоизлучение Солнца и планет. М. "Наука". ГРФМЛ. 1964.
- Каплан С.А., Пикельнер С.Б., Цытович В.Н. // Физика плазмы солнечной атмосферы. М. "Наука". ГРФМЛ. 1977.
- Левин Б.Р. // Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М. Сов. Радио. 1960.
- Мерсье, Тротье (Mercier C., Trottet G.) // *Astrophys. Journ.* 1997. V. 474. P. L65-L68.
- Мэнжени, Велтри (Mangeney A., Veltri P.) // *Astron. Astrophys.* 1976. V. 47. P. 165.
- Сандерем, Сабремениен (Shanmugha Sundaram G.A., Subramanian K.P.) // *Solar Physics.* 2004. V. 222. P. 311-322.
- Такакура (Takakura T.) // *Publ. Astr. Soc. Japan.* 1963. V. 15. P. 462.
- Тихонов В.И. // Статистическая радиотехника. Москва. "Радио и Связь". 1982.
- Фоккер (Fokker, A.D.) // *Studies of enhanced solar radio emission at frequencies near 200 MHz.* Leiden. 1960.
- Элгарей (Elgaroy Q.) // 1977. *Solar Noise Storms.* Pergamon Press. 1977.
- Юровский Ю.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2003. Т. 99. С. 92.