

УДК 523.98

Ю. Ф. Юровский, Ю. Ю. Юровский

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, п. Научный

Энергия радиовсплесков солнечных шумовых бурь

Анализ солнечных шумовых бурь (ШБ) с помощью алгоритма разложения случайного сигнала на импульсы показал, что распределение длительности обратно пропорционально квадрату продолжительности всплесков. Ординаты распределения пропорциональны средней частоте повторения импульсов, а максимум соответствует граничной длительности импульсов 0.4–0.6 с. Суммарное время жизни всех коротких всплесков ШБ приблизительно равно суммарному времени жизни всплесков любой другой длительности. Энергия коротких всплесков длительностью 0.2–0.4 с в пять раз меньше энергии более длинных всплесков и составляет лишь 2–5 % энергии всплескового компонента ШБ. Мощность всплесков увеличивается по мере увеличения их длительности от 0.2 до 1.2 с, достигает определенного значения при длительности 1.2–1.4 с и далее остается почти неизменной до конца изученного диапазона длительности 300 с. «Цепочки» всплесков могут представлять собой наложение коротких всплесков на один более длинный. Таким образом, измерение энергии всплесков не подтверждает распространенного мнения о том, что ШБ состоит из кратковременных всплесков I типа.

ЕНЕРГІЯ РАДІОСПЛЕСКІВ СОНЯЧНИХ ШУМОВИХ БУР, Юровський Ю. Ф., Юровський Ю. Ю. — Аналіз сонячних шумових бур (ШБ) за допомогою алгоритму розкладання випадкового сигналу на імпульси показав, що розподіл тривалості обернено пропорційний до квадрата тривалості сплесків. Ординати розподілу пропорційні до середньої частоти повторення імпульсів, а максимум відповідає граничній тривалості імпульсів 0.4–0.6 с. Сумарний час життя всіх коротких сплесків ШБ приблизно дорівнює сумарному часу життя сплесків будь-якої іншої тривалості. Енергія коротких сплесків тривалістю 0.2–0.4 с у п'ять разів менша за енергію довших сплесків і складає лише 2–5 % енергії сплескового компонента ШБ. Потужність сплесків збільшується по мірі збільшення їхньої тривалості від 0.2 до 1.2 с, досягає певного значення при тривалості 1.2–1.4 с і далі залишається майже незмінною до кінця вивченого діапазону тривалості 300 с. «Ланцюжки» сплесків можуть являти собою накладення коротких сплесків на один довший. Таким чином, вимірювання енергії сплесків не підтверджує поширеної думки про те, що ШБ складається з короткочасних сплесків I типу.

BURST ENERGY OF SOLAR NOISE STORMS, by Yurovsky Y. F., Yurovsky Y. Y. — Our analysis of solar noise storms (NS) with the use of decomposition of a random signal on pulses shows that the distribution of burst duration is inversely to their duration. The distribution maximum corresponds to a boundary pulse related duration of 0.4–0.6 s. The distribution ordinates are proportional to the average frequency of pulse occurrence. The total time of existence of all of the short NS bursts is approximately equal to the total time of existence of bursts of any other duration. The total energy of bursts with a duration of 0.2–0.4 s is five times less than the total energy of longer bursts and contains only 2–5 % of NS burst energy. The intensity of bursts increases with growth of their duration from 0.2 up to 1.2 s, reaches established value at a duration of 1.2–1.4 s and then remains the same up to end of the investigated range (300 s). «Chains» of bursts may be considered as a superposition of short bursts with one long. Thus, the measurement of burst energy do not confirm the widespread opinion that NS consists of short-lived type I bursts.

ВВЕДЕНИЕ

Повышения плотности потока солнечного радиоизлучения (рис. 1) продолжительностью от десятков минут до нескольких суток, подверженные флуктуациям и охватывающие широкий диапазон частот от дециметровых до декаметровых волн, получили название солнечных шумовых бурь (ШБ). Накопление энергии в активной области накануне вспышки сопровождается изменением некоторых параметров солнечной атмосферы, что, вероятно, приводит к вариациям свойств ШБ. Однако природа происхождения ШБ еще недостаточно ясна, и это затрудняет использование их наблюдаемых свойств для целей диагностики и прогнозирования солнечной активности.

Шумовые бури с момента своего обнаружения в 1942 г. [8] считаются состоящими из двух компонентов: повышенного широкополосного излучения (фона) и накладывающихся на него многочисленных короткоживущих узкополосных всплесков [2, 13]. Если бы это соответствовало действительности, то спектр ШБ был бы плоским подобно спектру «дробового» шума вакуумного диода [6, с. 192]. Однако спектр ШБ не плоский, а гиперболический [10], т. е. наблюдаемые свойства ШБ не подтверждают гипотезу образования всплескового компонента из короткоживущих всплесков. Тем не менее, некоторые исследователи продолжают обсуждать идею композиции ШБ из коротких всплесков I типа [22] и возможность их генерации за счет механизмов, способных генерировать только короткоживущие импульсы, например в результате возникновения в активной области последовательности нановсплесков [20].

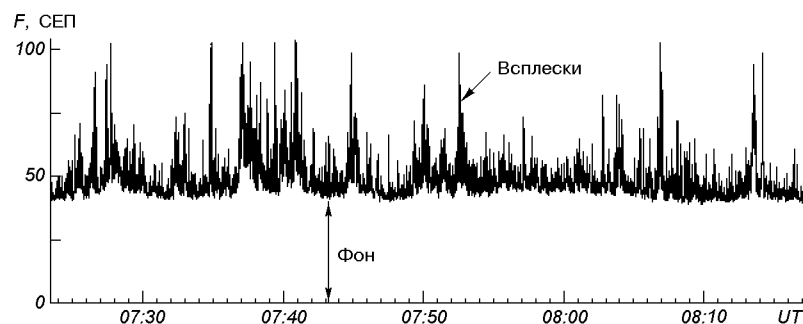


Рис. 1. Запись шумовой бури 4 января 2002 г. на частоте 280 МГц

Цель работы — показать, что визуальное разделение наблюдаемого излучения ШБ на «простые», «изолированные», «не очень искаженные наложением» всплески не отражает свойств всего всплескового компонента ШБ. С помощью нового наблюдаемого параметра — суммарного времени излучения всплесков различной длительности — будут исследованы время излучения и энергия импульсов ШБ, перечислены выявленные новые свойства ШБ, существенно влияющие на разработку механизма их генерации.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для определения «характерной» длительности импульсов ШБ используется гистограмма интерпретируемая как распределение количества наблюдаемых всплесков по их продолжительности. Гистограмма имеет ясно выраженный максимум в области импульсов короткой длительности, поэтому в работах [9, 11, 12, 14, 17, 21, 25, 26, 27] делается заключение о том, что ШБ состоит из этих короткоживущих всплесков. Недостаточная обоснованность этого утверждения следует уже из того, что гистограмма не содержит сведений об амплитуде (мощности) всплесков, поэтому не может служить основанием для решения вопроса о том, во всплесках какой длительности сосредоточена энергия ШБ.

Само название явления «шумовая буря» свидетельствует о том, что ее параметры представляют собой случайный сигнал. Как известно [6], случайная величина D считается заданной, если задана вероятность того, что она примет определенное значение D_i из диапазона своих возможных значений $D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}$. Соотношение, устанавливающее зависимость между возможными значениями D_i и их вероятностями, называется законом распределения.

Закон распределения задается плотностью вероятности $w(D_k)$, которая определяется как предел вероятности попадания (отношения n_k/N_Σ) значений случайной величины D в малый интервал $[D_k, D_k + \Delta D]$ к длине этого интервала ΔD при $\Delta D \rightarrow 0$ [6]:

$$w(D_k) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \frac{n_k}{N_\Sigma \Delta D}.$$

Распределение длительности импульсов ШБ имеет размерность $1/c = \text{Гц}$ и является не зависимостью количества n импульсов от величины длительности D , а величиной, пропорциональной средней частоте следования этих импульсов. Запись плотности вероятности в форме (1) позволяет оценить закон распределения по эмпирическим данным, так как в выражение входят конечное число измерений N_Σ и конечный размер интервала ΔD . Для этого область экспериментальных значений случайной величины D 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 (гистограммы): 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 отражал только свойства исследуемой величины D и не зависел от объема выборки, плотность нормируют к полному количеству событий N_Σ в выборке. Полученная гистограмма и является оценкой распределения по эмпирическим данным. При $\Delta D \rightarrow 0$ и $N_\Sigma \rightarrow \infty$ гистограмма асимптотически приближается к

огибающей, которая при известном характере случайной переменной может быть вычислена аналитическим путем.

В теории случайных процессов [5, с. 532] доказывается, что средняя частота следования случайных импульсов асимптотически обратно пропорциональна их средней длительности. Поэтому гистограмма $w(D_k)$ 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».

Таким образом, ссылка на гистограмму длительности всплесков не является достаточным основанием для того, чтобы считать ШБ состоящей из короткоживущих всплесков.

СУММАРНОЕ ВРЕМЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЛЕСКОВ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Примем во внимание, что импульс *наблюдается* в произвольный момент измерений t , если его интенсивность $I > 0$. Вероятность обнаружения импульсов длительностью D_i в произвольный момент t_i равна отношению суммарного времени жизни этих импульсов t_{Di} к полному времени наблюдений t_{Σ} : $W (I > 0) = t_{Di}/t_{\Sigma}$ [6, 525]. Заметим, что отношение $\Delta D/D$ не остается постоянным в пределах гистограммы из-за изменения D , т. е. критерий отбора импульсов в разные бины получается различным. Чтобы критерий был одинаковым, нужно либо изменять размер интервала $\Delta D_i = (\Delta D) \cdot D_{\max}/D_k$, либо изменять количество всплесков в бинах гистограммы, уже рассчитанной при постоянном интервале ΔD : $n_i = n_k D_k/D_{\max}$.

С учетом сказанного произведение количества импульсов $n_k D_k/D_{\max}$ гистограммы $w(D_k)$ на их длительность D_k дает интервал времени t_{Di} , занимаемый импульсами с одинаковым отклонением длительности и входящими в каждый бин k :

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

Суммарное время излучения всех таких 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 :

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

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

Таким образом, по измерениям одного параметра D можно построить два существенно отличающихся параметра исследуемого процесса. Распределение длительности $w(D_k)$ характеризует *частоту появления* импульсов, а вероятность *наблюдения* (существования) $W(I > 0)$ всплесков заданной длительности D_i показывает, какую часть всего времени излучения источник генерирует эти всплески. Обе характеристики весьма полезны для описания временных соотношений в механизме излучения ШБ, но они не содержат сведений об интенсивности всплесков и поэтому не могут служить

основанием при решении вопроса о том, во всплесках какой длительности сосредоточена большая часть энергии источника ШБ.

РАЗЛОЖЕНИЕ СЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА НА КОМПОНЕНТЫ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Будем рассматривать представление ШБ в виде суммы импульсов произвольной длительности. Для измерения параметров импульса сначала нужно как-то выделить его на записи, т. е. назвать «импульсом» локальное во времени изменение интенсивности. Эта процедура и является разложением исходного сигнала на импульсные компоненты. В литературных источниках предполагается, что в некоторые моменты времени наложения нет, и поэтому импульсы, «наименее искаженные наложением» [14], «изолированные» [13], «единичные» [25] или «имеющие сглаженный профиль» [17] являются готовыми элементами разложения. В упомянутых исследованиях подчеркивается, что импульсы часто располагаются на оси времени настолько тесно, что разделить их на отдельные компоненты затруднительно, и такие участки исходных данных просто исключаются из рассмотрения. Заметим, что в результате полученная выборка данных уже не отражает полностью свойств генеральной совокупности [6, с. 429].

Оценим длительность исключаемых импульсов. При визуальном разложении исходного сигнала из его состава выбираются случайно расположенные на оси времени неперекрывающиеся импульсы. Такая последовательность случайных событий в статистике называется *пуассоновским потоком*. 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 работе [5, с. 40 и с. 621]. По указанным таблицам находим, что $t \geq 1$ событий произойдет за единицу времени с вероятностью 0.995 при интенсивности потока $\nu = 8$. Если единицей времени считать минимальную длительность имеющихся на гистограмме импульсов D_{\min} , то это значит, что за время жизни импульса длительностью $8 \cdot D_{\min}$ обязательно появится по крайней мере еще один короткий импульс. Этот участок записи с наложением импульсов согласно общепринятой методике будет исключен из рассмотрения вместе с длинным импульсом. 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 работах [9, 11, 12, 14, 17, 21, 25, 26, 27]. 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. Будем полагать, что переменная составляющая излучения ШБ состоит из взаимно *налагающихся* импульсов произвольной длительности. Отдельным импульсом будем считать любой максимум, лежащий между двумя минимумами [15, с. 61] (см. фрагмент на рис. 2). Если запись является суммой отдельных компонентов, 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, иллюстрируемый рис. 2.

При первом проходе (скан 1) на записи сигнала отыскивался очередной импульс, определялась и запоминалась его длительность D , интенсивность

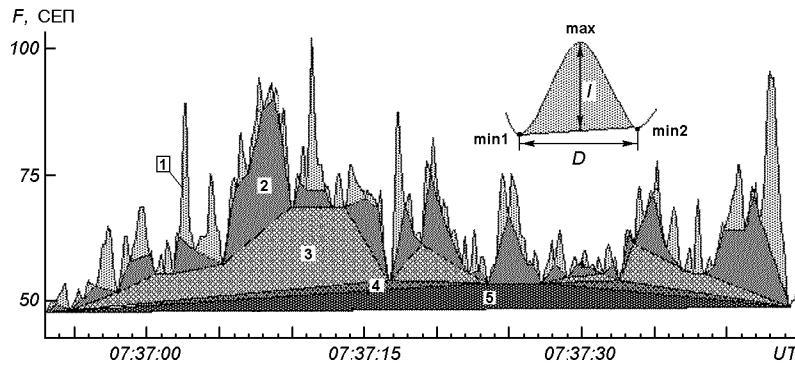


Рис. 2. Иллюстрация разложения случайного сигнала на импульсы произвольной длительности; 1–5 — номера последовательных сканов

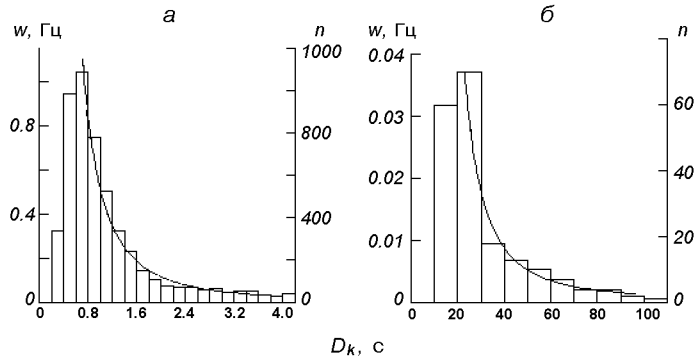


Рис. 3. Распределение длительности всплесков шумовой бури в двух диапазонах длительности; кривые — МНК-аппроксимации $W = \text{const}D^{-2.02}$ (а) и $W = \text{const}D^{-2}$ (б)

I и энергия E , после чего он вычитался из исходной кривой. Так как энергия находилась как вся площадь под огибающей импульса, то форма импульса существенной роли не играла. Затем отыскивался следующий импульс, измерялись его параметры и т. д. до конца реализации. После этого скан по реализации повторялся с ее начала (скан 2). Повторение сканов производилось тех пор, пока не выявлялся последний импульс, почти равный длине реализации (рис. 2, скан 5). При таком способе разложения обеспечивается полная воспроизводимость результатов и включение в рассмотрение компонентов любой длительности.

Компьютерное разложение сигнала на импульсы ранее не применялось, поэтому полезно проверить его эффективность. Для этого сравним параметры всплесков, выявляемые с применением описанного способа разложения ШБ на компоненты, с опубликованными гистограммами, полученными путем визуального анализа. Для этого исследуем типичную ШБ, наблюдавшуюся 4 января 2002 г. на радиотелескопе КрАО (рис. 1) в двух диапазонах длительности 0.2–4.0 с и 10–100 с. Вычисленные распределения $w(D_k) = \frac{n_k}{N_{\Sigma}\Delta D}$ показаны на рис. 3. По оцифровке на правой оси ординат можно определить количество всплесков n_k , вошедших в каждый бин гистограммы. Правый склон гистограммы аппроксимирован методом наименьших квадратов показательной функцией $f(D) = aD^{\nu}$, и результат аппроксимации

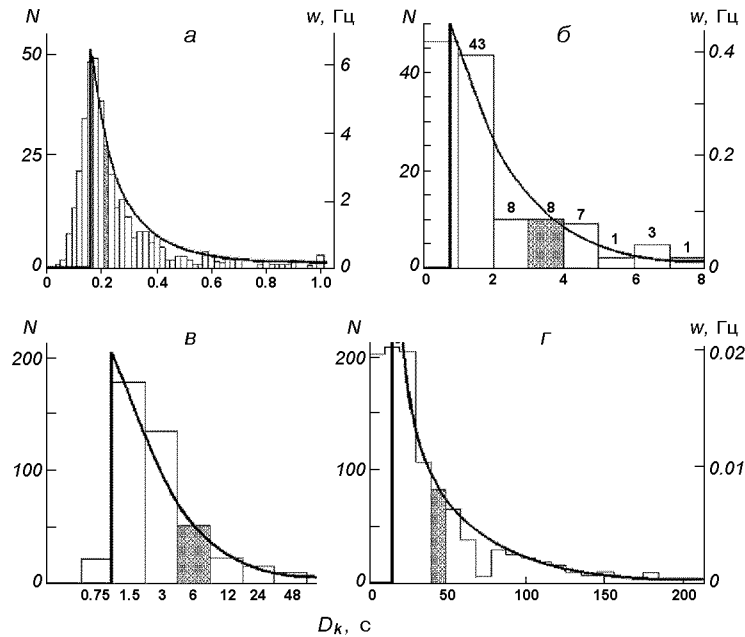


Рис. 4. Гистограммы длительности всплесков шумовой бури, полученные путем визуального разложения записей на компоненты: *a* — по наблюдениям ШБ 1966 г. [17], *б* — 1969 г. [21], *в* — 1951 г. [26], *з* — 1966 г. [18]

показан сплошной кривой. Показатель степени получился близким к $\gamma = -2.02$, т. е. закон распределения можно считать обратно пропорциональным квадрату длительности:

$$w(D_k) = \text{const}/D^2.$$

Из множества опубликованных гистограмм для сравнения с нашими результатами мы отобрали четыре, которые в наибольшей степени отличаются по максимальной длительности включенных в них всплесков (рис. 4). Один из бинов на правом склоне каждой гистограммы (заштрихован) принимался за опорный, относительно него были вычислены функции $f(D) = aD^{-2}$, и их графики нанесены на гистограммы в виде сплошной кривой. На левых осях ординат приведено количество всплесков. Правые оси оцифрованы нами (если это было возможно) в единицах плотности вероятности.

Можно отметить, что средняя частота появления всплесков $w(D_k)$ на вычисленной нами гистограмме приблизительно равна частоте повторения всплесков на опубликованных гистограммах, несмотря на различие методов разложения ШБ на компоненты, различие длин волн наблюдений и на то, что исходные данные получены по наблюдениям разных ШБ. Например, в нашем случае всплески длительностью 0.6 с имели частоту повторения $w(D_k) \approx 1$ Гц, а на гистограмме рис. 4, *a* [17] такой частоте повторения соответствуют всплески довольно близкой длительности 0.4 с. Частота повторения $w(D_k) \approx 0.4$ Гц соответствует всплескам длительностью около 1 с как на нашей гистограмме, так и на гистограмме рис. 4, *б* [20].

События ШБ, состоящие из последовательности коротких всплесков, между которыми интенсивность не опускается до фонового уровня, в литературе выделяются в самостоятельный тип явлений и называются

«цепочками» всплесков [13]. При этом свойства короткоживущих всплесков, образующих цепочку, ничем не отличаются от свойств «изолированных» всплесков [18]. На рис. 3 видно, что распределение в диапазоне длительности «цепочек» 10—100 с также описывается законом $f(D) = a/D^2$. Более того, частота появления «цепочек», найденная в работе [18], близка к полученной нами частоте повторения элементов разложения. Например (см. рис. 3 и рис. 4, з), события длительностью 30—40 с имеют частоту повторения $w(D_k)$ приблизительно равную 0.01 Гц в обоих случаях. Следовательно, цепочки могут представлять собой наложение коротких всплесков на один более длинный.

Таким образом, сравнение полученного нами распределения длительности $w(D_k)$ и с данными других исследователей опубликованного в литературе позволило убедиться, что разработанный алгоритм разложения случайного сигнала на налагающиеся всплески различной длительности правильно отражает уже известные свойства всплескового компонента ШБ.

ВРЕМЯ ИЗЛУЧЕНИЯ, ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ВСПЛЕСКОВ СОЛНЕЧНЫХ ШУМОВЫХ БУРЬ

Наблюдения проводились на патрульном радиотелескопе Службы Солнца НИИ КраО на частотах 280 и 300 МГц. Так как излучение ШБ значительно превышало излучение спокойного Солнца, то вариации потока фактически представляли собой результат излучения источника ШБ, а вклад остальной части диска и шумов аппаратуры был пренебрежимо мал. Частота отсчетов уровня сигнала каждого канала составляла 10 Гц. Квантование сигнала производилось на ± 512 уровней, точность регистрации при постоянной времени 0.1 с составляла 2—3 % потока невозмущенного Солнца.

Для исследования были отобраны 10 ШБ, происходивших в 2001—2002 гг. и разделенных промежутком времени более месяца. Это давало основание полагать, что результаты анализа относятся к различным ШБ, а не к одной и той же долгоживущей ШБ. Каждая запись разделялась по времени на два равных фрагмента, для каждого из которых вычислялось среднее 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. Продолжительность отобранных записей составляла от 30 до 175 мин, интенсивность была в пределах $F = 20 \dots 200$ СЕП (1 СЕП = 10^{-22} Вт/м² Гц).

Результаты анализа, выявившего более 200 000 всплесков, показаны на рис. 5 в виде наложенных графиков. Для приведения графиков времени излучения, энергии и мощности разных ШБ к одному масштабу по оси

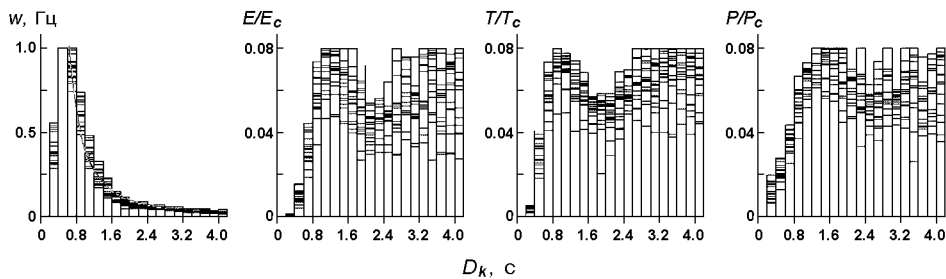


Рис. 5. Распределение длительности $w(D_k)$ и зависимости времени излучения T/T_c , энергии E/E_c и мощности импульсов P/P_c от их длительности D

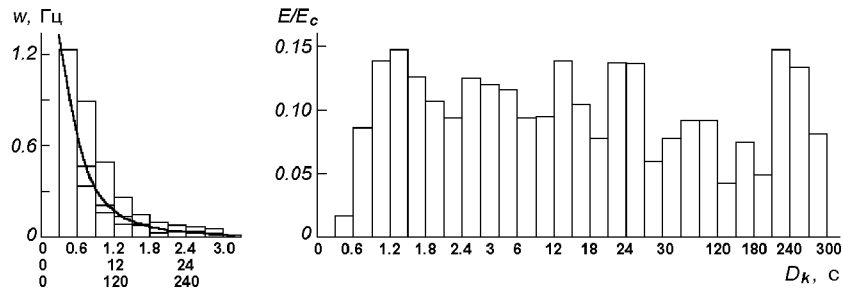


Рис. 6. Распределение длительности и энергии всплесков шумовой бури в трех диапазонах длительности

ординат отложены отношения этих величин к среднему значению, определенному по данным каждой реализации. Заметная на графиках концентрация найденных значений около средней величины свидетельствует о том, что закономерности изменения изучаемых свойств характерны для всех рассмотренных ШБ.

Распределение длительности $w(D_k)$ в диапазоне $D_{\max} > 10D_{\min}$ теряет наглядность из-за уменьшения ординат. Поэтому были вычислены три распределения в трех последовательных диапазонах длительностей 0.3—3.0 с, 3—30 с и 30—300 с. Полученные графики $w(D_k)$ объединены на одном рис. 6. Можно отметить, что распределения длительности описываются одним и тем же законом $f(D) \approx a/D^2$.

Три графика зависимости энергии импульсов от их длительности E/E_c также объединены на рис. 6 и свидетельствуют о том, что энергия всплесков практически не зависит от их длительности во всем изученном диапазоне от 0.3 до 300 с. Заметим, что гиперболический характер плотности спектра в [10] прослежен до периода 1000 с, и в этом диапазоне также не отмечено существенного отклонения от монотонности. Другими словами, граница максимальной длительности колебаний в этих исследованиях не выявлена.

Вычисления позволили выявить следующие общие свойства ШБ.

1. Закон распределения длительности $w(D_k)$ (средней частоты повторения всплесков) описывается показательной функцией $f(D) = a/D^2$.

2. Максимум распределения соответствует длительности всплесков 0.4—0.6 с.

3. Суммарное время излучения всплесков быстро увеличивается 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 пять раз меньше энергии более длинных всплесков. Следовательно, мнение о том, что ШБ состоит из коротких всплесков, не подтверждается результатами наблюдений.

5. Мощность импульсов увеличивается по мере увеличения их длительности от 0.2 до 1.2 с, достигает установившегося значения при длительности 1.2—1.4 с и далее остается почти неизменной и максимальной вплоть до конца изученного диапазона длительности 300 с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ШУМОВЫХ БУРЬ

Итак ШБ не может состоять только из всплесков короткой длительности, так как источник затрачивает одинаковое количество энергии на генерацию всплесков любой длительности. Суть плазменной гипотезы происхождения

ШБ [24] состоит в следующем. При столкновении двух волновых пакетов альвеновских волн возникает поток ускоренных электронов (механизм Ферми ускорения частиц). Этот поток возбуждает когерентные плазменные волны, которые трансформируются в электромагнитные. В дальнейшем гипотеза уточнялась и развивалась в работах [1—3, 23]. Длительность всплесков ШБ в этих гипотезах определяется либо продолжительностью столкновения альвеновских (или ударных) волн, либо временем затухания плазменных колебаний, и поэтому является короткой. Следовательно, перечисленные плазменные гипотезы не объясняют выявленные новые свойства ШБ.

В другой группе гипотез рассматривается циклотронный механизм генерации радиоволн потоками ускоренных электронов в магнитном поле активной области [16]. Дальнейшая модификация этой гипотезы привела к предположению, что неустойчивость системы поток—плазма приводит к появлению коротких всплесков продолжительностью 0.6 с [19]. Как и в предыдущем случае, этот вывод не согласуется с наблюдаемым характером флуктуаций интенсивности ШБ.

Обе группы гипотез, и плазменная, и циклотронная, основаны на предположении о наличии потока ускоренных электронов. Очевидно, что время жизни этих потоков должно быть не меньше продолжительности ШБ, иногда длящейся в течение часов и дней. Электроны, инжектированные в область источника ШБ, теряют свою энергию из-за столкновения с тепловыми частицами окружающей плазмы за время [13]

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

где E — кинетическая энергия быстрых электронов (в кэВ), N_e — концентрация этих электронов (в см^{-3}). Взяв типичные значения $E = 100$ кэВ и $N_e = 10^8 \text{ см}^{-3}$, получаем $t_E \approx 25$ мин. Следовательно, электроны должны непрерывно ускоряться в источнике излучения или откуда-то инжектироваться. Одна из возможностей постоянного наличия в активной области быстрых электронов рассмотрена в работе [4] 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 $2-3R_\odot$, можно рассматривать как признак наличия в этой области ускоренных электронов, кинетическая температура которых превышает температуру короны.

ВЫВОДЫ

1. Распределение (гистограмма) длительностей всплесков не является достаточным основанием для определения компонентного состава ШБ, так как не содержит информации об энергии этих компонентов.

2. В изученном диапазоне длительности от 1 до 300 с энергия всплесков приблизительно одинакова, а энергия коротких всплесков длительностью менее 1 с составляет лишь около 2—5 %.

3. Гипотезы происхождения ШБ, в которых предусматривается излучение только короткоживущих всплесков радиоизлучения, нуждаются в уточнении, так как 95 % энергии излучается в виде долгоживущих всплесков.

4. В активной области, над которой есть источник ШБ, происходит постоянное ускорение заряженных частиц, повышающее их кинетическую температуру.

1. *Верешков Г. М.* Природа всплесков I типа спорадического излучения Солнца // *Астрон. журн.*—1974.—**51**.—С. 261—272.
2. *Железняков В. В.* Радиоизлучение Солнца и планет. — М.: Наука, ГРФМЛ, 1964.—560 с.
3. *Зайцев В. В., Фомичев В. В.* Возникновение цепочек солнечных всплесков I типа // *Астрон. журн.*—1972.—**49**.—С. 817—822.
4. *Каплан С. А., Пикельнер С. Б., Цытович В. Н.* Физика плазмы солнечной атмосферы. — М.: Наука, ГРФМЛ, 1977.—255 с.
5. *Левин Б. Р.* Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1960.—663 с.
6. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982.—624 с.
7. *Трахтенгерц В. Ю.* К теории солнечных радиовсплесков I типа // *Астрон. журн.*—1966.—**43**.—С. 356—362.
8. *Хей Дж.* Радиовселенная: Пер. с англ. Б. Н. Пановкина. — М.: Мир, 1978.—283 с.
9. *Элгарей Э.* Смещение частоты и тонкая структура всплесков солнечного излучения на частоте 200 МГц // *Радиоастрономия. Парижский симпозиум.* — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.—С. 244—247.
10. *Юровский Ю. Ф.* Определение длительности всплесков солнечных шумовых бурь по их спектру мощности // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—2003.—**99**.—С. 92—100.
11. *Eckhoff H. K.* On some properties of solar bursts in the 200 Mc/s region. — Oslo, 1966.—20 p.—(Inst. Theor. Astrophys., Rep. N 18).
12. *Elgaroy Q.* On the wavelength dependence of the bandwidth and the duration of type I solar radio bursts // *Astrophys. Lett.*—1967.—**1**.—P. 13—14.
13. *Elgaroy Q.* Solar Noise Storms. — Pergamon Press, 1977.—363 p.
14. *Elgaroy Q.* Short lasting type I bursts // *Pros.4th CESRA Workshop on «Solar Noise Storm» / Eds A. O. Benz, P. Zlobec.* — Trieste, Italy, 1982.—P. 347—352.
15. *Fokker A. D.* Studies of enhanced solar radio emission at frequencies near 200 MHz. — Leiden, 1960.—249 p.
16. *Fung P. C. W., Yip W. K.* Theoretical dynamic spectra of solar type I storm bursts // *Planet. and Space Sci.*—1966.—**14**.—P. 1139.
17. *Groot T.* Weak solar radio bursts // *Rech. Astr. Obs. Utrecht.*—1966.—**18**, N 1.—P. 102.
18. *Hanasz J.* Chains of type I solar radio bursts // *Austral. J. Phys.*—1966.—**19**.—P. 635—647.
19. *Mangency A., Veltri P.* On the theory of type I solar radio bursts. I. Beam plasma instabilities in a turbulent magnetized plasma. II. A model for the source // *Astron. and Astrophys.*—1976.—**47**.—P. 165—192.
20. *Mercier C., Trotter G.* Coronal radio bursts: a signature of nanoflares? // *Astrophys. J.*—1997.—**474**.—P. L65—L68.
21. *Sastry Ch. V.* Observations on the time structure of solar radio bursts at a wavelength of 12 m // *Solar Phys.*—1969.—**10**, N 2.—P. 429—432.
22. *Shanmugha Sundaram G. A., Subramanian K. P.* Quasi-periodicity in global solar radio flux at metric wavelengths during noise storm // *Solar Phys.*—2004.—**222**.—P. 311—322.
23. *Sy W. N.-C.* A Theory of type I solar radio bursts // *Proc. ASA.*—1973.—**2**.—P. 215—221.
24. *Takakura T.* Some characteristics of solar radio type IV bursts // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1963.—**15**, N 3.—P. 327—335.
25. *Vitkevich V. V., Gorelova M. V.* Dynamic spectra and principal characteristics of short-lived bursts of solar radio emission // *Sov. Astron.*—1961.—**4**.—P. 595—603.
26. *Wild J. P.* Observations of the Spectrum of High-Intensity Solar Radiation at Metre Wavelengths. IV. Enhanced Radiation // *Austr. J. Sci. Res.*—1951.—**4**, N 1.—P. 36—50.
27. *Yoh P., James J. C.* Short-duration, narrow-band solar bursts at 38 MC/s // *Astrophys. J.*—1967.—**149**.—P. 441—445.

Поступила в редакцию 06.02.06.