

УДК 523.98

Ю. Ф. Юровский

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

Влияние случайной рефракции радиоволн в короне на свойства солнечных шумовых бурь

Рассеяние радиоволн на неоднородностях электронной плотности короны неизбежно сопровождается возникновением флуктуаций интенсивности рассеянного сигнала. Согласно выводам теории вероятности распределение интенсивности рассеянного сигнала описывается экспоненциальным законом. Эмпирическое распределение интенсивности большинства шумовых бурь также удовлетворительно описывается экспоненциальным законом. Перечисленные факты свидетельствуют в пользу гипотезы образования всплескового компонента шумовых бурь в результате рассеяния радиоизлучения точечного источника квазипостоянного уровня на неоднородностях короны.

ВПЛИВ ВИПАДКОВОЇ РЕФРАКЦІЇ РАДІОХВИЛЬ У КОРОНІ НА ВЛАСТИВОСТІ СОНЯЧНИХ ШУМОВИХ БУР, Юровський Ю. Ф. — Розсіювання радіохвиль на флуктуаціях електронної щільності корони неминуче супроводжується виникненням флуктуацій інтенсивності розсіяного сигналу. Відповідно до висновків теорії імовірності розподіл інтенсивності розсіяного сигналу описується експоненціальним законом. Емпіричний розподіл інтенсивності більшості шумових бурь також задовільно описується експоненціальним законом. Перераховані факти свідчать на користь гіпотези утворення сплескового компонента шумових бурь у результаті розсіювання радіовипромінювання точкового джерела квазіпостійного рівня на неоднорідностях корони.

INFLUENCE OF RANDOM REFRACTION OF RADIO WAVES IN THE CORONA ON PROPERTIES OF SOLAR NOISE STORMS, by Yurovsky Y. F. — Scattering of radio waves by irregularities in the coronal electron density is inevitably accompanied by occurrence of scattered signal intensity variations. According to the probability theory, an exponential law describes the distribution of scattered signal intensity. An exponential law satisfactorily fits the empirical distribution of intensity of the majority of the observed noise storms as well. The listed facts favour the hypothesis of the noise storm burst component formation as a result of scattering of radio radiation of a quasi stable dot source by coronal irregularities.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенное, сильно флуктуирующее радиоизлучение метрового диапазона волн, выходящее из короны и иногда длящееся несколько дней, называется

шумовой бурей (ШБ). Использование характеристик этого излучения для диагностики корональной плазмы затрудняется тем, что природа происхождения ШБ недостаточно ясна. Распространенное представление о формировании ШБ из короткоживущих всплесков I типа не подтверждается результатами наблюдений, так как спектр ШБ не плоский, а гиперболический [2]. Следовательно, механизм образования ШБ должен обеспечивать излучение долгоживущих флуктуаций. Поэтому гипотезы о формировании всплесков ШБ в результате действия нановсплесков [5, 6] или в результате затухания плазменных колебаний после импульсного возбуждения [3] нуждаются в уточнении, так как ориентированы на генерацию только короткоживущих всплесков.

Есть еще одна возможность образования флуктуаций ШБ. Для объяснения больших видимых размеров ШБ рассматривается гипотеза рассеяния радиоволн на неоднородностях электронной плотности короны. Рассеяние в короне сомнению не подвергается и используется для изучения межпланетной среды методом просвечивания. В работах [3, 4, 7] изучалась величина углового рассеяния излучения солнечных локальных источников, но неизбежное возникновение амплитудной модуляции рассеянного сигнала не рассматривалось. Ниже рассматривается влияние случайной рефракции на свойства ШБ.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Первоначально сферический фронт волны от точечного источника излучения при прохождении через неоднородную корону искажается (рис. 1). На выходе из короны образуется искаженный (не сферический) фронт волны. Нормали к разным точкам этой поверхности образуют лучи, некоторые из них могут быть направлены в сторону наблюдателя. В пункте наблюдений колебания лучей складываются и образуют суммарный (регистрируемый)

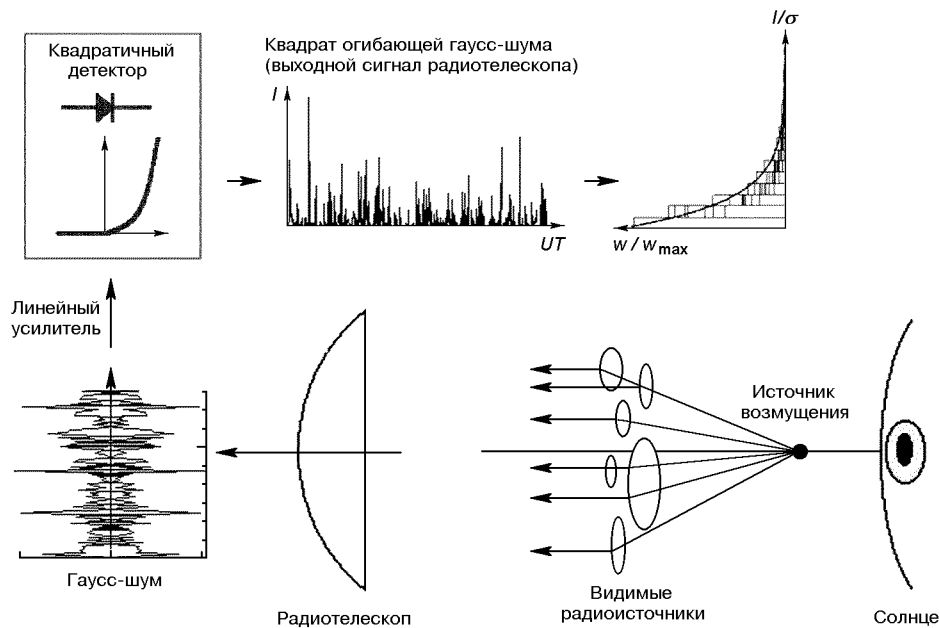


Рис. 1. Схема образования флуктуаций интенсивности шумовой бури при многолучевом распространении радиоволн в турбулентной корональной плазме

сигнал. Параметры неоднородностей изменяются со временем, что приводит к перераспределению фаз колебаний и к вариациям интенсивности суммарного сигнала.

Таким образом, если ШБ — результат сложения множества случайно рефрагированных лучей $a_i \cos(\omega_o t - \varphi_i(t))$, то на выходе линейной части радиотелескопа (на входе квадратичного детектора) действует сумма множества сигналов несущей частоты ω_o (другую частоту радиотелескоп не принимает) со случайными фазами $\varphi_i(t)$ (из-за разной длины пути каждого луча i). Сумма $n > 10$ синусоидальных колебаний $\sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_o t - \varphi_i(t))$ в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности представляет собой гауссовский (нормальный) шум [1, с. 171]:

$$w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n\sigma}} \exp\left(-\frac{(t - na)^2}{2n\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где a и σ^2 — среднее значение и дисперсия каждого слагаемого, а na и $n\sigma^2$ — среднее значение и дисперсия суммы.

Сигнал, поступающий на квадратичный детектор, при реальных наблюдениях недоступен для исследования, так как выходное устройство радиотелескопа обычно регистрирует только выходной сигнал квадратичного детектора. Квадратичный детектор возводит в квадрат суммарное колебание, а следующий за ним фильтр подавляет ВЧ-составляющие на несущей частоте и ее гармониках [1, с. 453]. Именно низкочастотная часть суммарного сигнала (огibaющая) и регистрируется как выходной сигнал радиотелескопа. Естественно полагать, что полоса пропускания фильтра (постоянная времени регистратора) выбрана такой, чтобы он не искажал вариации интенсивности огibaющей, относительно медленные по сравнению со скоростью изменения фазы колебаний $\omega_o t$. Распределение интенсивности в таком случае описывается функцией [1, с. 459]:

$$w(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), \quad I > 0. \quad (2)$$

Этот закон распределения называется экспоненциальным и описывает процесс, асимметричный относительно среднего значения. Первый множитель не зависит от текущей интенсивности, а второй множитель является экспонентой. При $I \rightarrow 0$ множитель $\exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) \rightarrow 1$ и $w(I) \rightarrow \frac{1}{2\sigma^2}$. Затем по мере увеличения I координаты распределения экспоненциально убывают, и $w(I) \rightarrow 0$.

Таким образом, характер (закон) распределения интенсивности рассеянного сигнала известен из аналитических соображений. Если эмпирическое распределение по данным наблюдений реальных ШБ окажется совпадающим с распределением квадрата огibaющей гаусс-шума, то это будет служить доводом в пользу гипотезы образования флуктуаций ШБ за счет случайной рефракции.

ЭМПИРИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ШУМОВЫХ БУРЬ

Аппаратура. Наблюдения проводились на патрульном радиотелескопе Службы Солнца Научно-исследовательского института «Крымская астрофизическая обсерватория», расположенном в п. Кацивели недалеко от Ялты. Антенна радиотелескопа размерами 4×4 м на параллактической монтировке

автоматически сопровождала Солнце при его суточном движении по небосводу. Радиотелескоп имел два приемных канала, настроенные 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 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.

Данные наблюдений. 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. Наличие синхронных записей на близких частотах 280 и 300 МГц позволяло сравнивать параметры ШБ на этих частотах.

Методика оценки распределения *стационарного* эргодического процесса по экспериментальным данным заключается в вычислении относительного времени пребывания реализации в пределах равновеликих интервалов, на которые разбит весь диапазон изменений исследуемой величины [1, с. 218]. Однако ШБ в общем случае не является стационарным процессом, так как она зарождается в какой-то момент времени, эволюционирует и затем затухает. Выбор некоторого короткого фрагмента ШБ не решает полностью проблему стационарности, так как на этом фрагменте будут долгоживущие колебания, параметры которых могут отличаться от среднестатистических из-за малого количества длинных колебаний на короткой реализации. Более того, колебание, вообще не уместившееся на реализации, будет выглядеть как тренд записи. Так как в любом случае конечная длина реализации ограничивает длительность рассматриваемых колебаний, то имеет смысл исключить из исходных данных тренд и долгоживущие колебания с недоверными параметрами.

Исключение тренда. Согласно теории случайных процессов параметры случайной величины, определенные по выборке из генеральной совокупности, с вероятностью 0.5 соответствуют среднестатистическим, если выборка содержит не менее десяти событий [1]. В соответствии с этим из записи ШБ удалялись те колебания, количество которых на рассматриваемой длине реализации было менее 10. Для этого был составлен алгоритм, вычисляющий нижнюю огибающую записи ШБ. Отыскивались два соседние минимума на записи, определяющие длину колебания, и если расстояние между ними было меньше заданного предела, то это колебание сохранялось для дальнейшего анализа. В противном случае колебание вычиталось из исходных данных.

На рис. 2 приведен пример записи ШБ, происходившей 14 июня 2001 г., и показано распределение ее интенсивности до и после устранения тренда, произведенного описанным способом. Достаточно очевидно, что исключение тренда позволяет получить более реальное распределение интенсивности. Однако эта процедура пригодна лишь для ограниченных по времени фрагментов ШБ, так как не устраняет нестационарность, связанную с усилениями и замираниями ШБ в течение ее эволюции. По-видимому, эти отклонения от стационарности несут информацию о динамике физических условий в области возникновения ШБ, но в данном исследова-

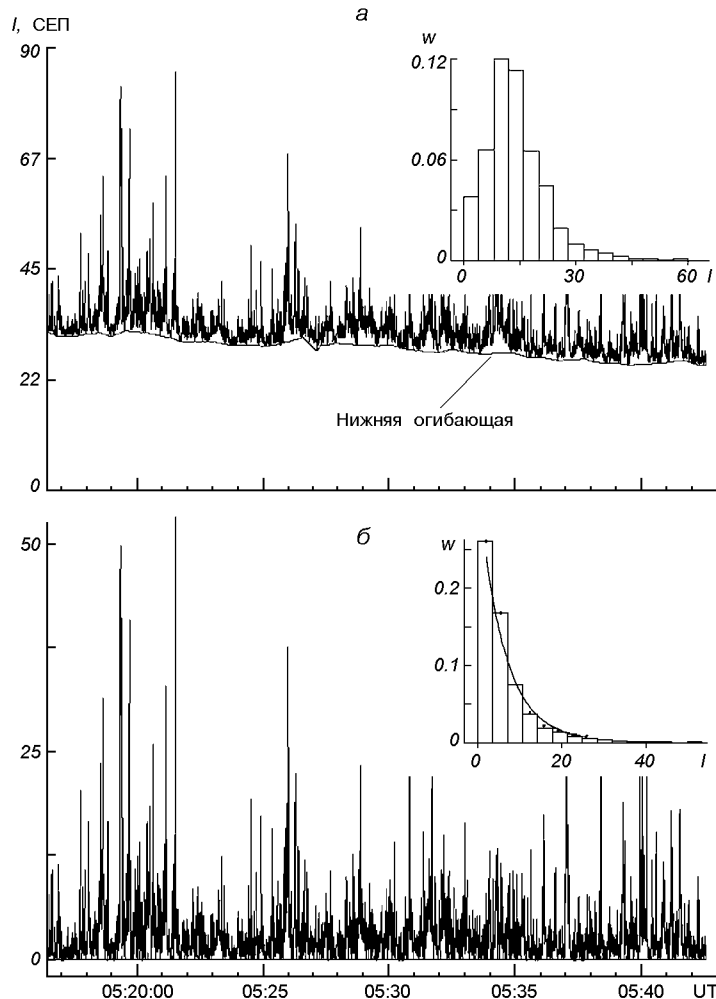


Рис. 2. Интенсивность I шумовой бури на частоте 280 МГц и распределение $w(I)$ всплесков по интенсивности: *a* — для исходной записи бури 14 июня 2001 г., *б* — после устранения тренда

нии выясняется природа происхождения вариаций интенсивности, а не динамика их развития.

Аппроксимация эмпирического распределения показательной функцией $w(I) = ae^{-bI}$ изображена плавной кривой, наложенной на гистограмму. Поскольку значения $a = 0.031$ и $b = 0.033$ довольно близки, то можно заключить, что найденный закон распределения данной ШБ соответствует экспоненциальному распределению, описываемому формулой (2).

Распределение интенсивности шумовых бурь. Для того чтобы выяснить, является ли экспоненциальный закон общим свойством, были исследованы другие ШБ. Список рассмотренных ШБ приведен в таблице. Время в графе «Начало, UT» соответствует началу выбранного участка, а не началу ШБ. В графе «Интервал» указана длина анализируемой записи. Продолжительность записей составляла от 16 мин до 1 ч 12 мин. Средняя на длине записи интенсивность фоновой составляющей приведена в солнечных единицах потока СЕП = 10^{-22} Вт/м²Гц.

Для сравнения аналитического распределения с эмпирическим результаты вычисления по данным разных ШБ были приведены к одинаковому

Перечень исследованных шумовых бурь

Дата	Начало, УТ	Интервал	I , СЕП
30 марта 2001 г.	12 ^h 40 ^m 30 ^s	2 ^h 40 ^m	200
7 мая 2001 г.	05 26 00	0 16	25
14 июня 2001 г.	05 16 24	0 30	30
20 ноября 2001 г.	09 14 10	0 18	22
25 декабря 2001 г.	09 16 54	0 29	70
4 января 2002 г.	07 23 32	0 54	40
14 февраля 2002 г.	06 01 05	1 12	25
28 марта 2002 г.	06 16 19	0 30	20
10 апреля 2002 г.	08 23 29	0 34	17
08 мая 2002 г.	08 23 38	0 55	20

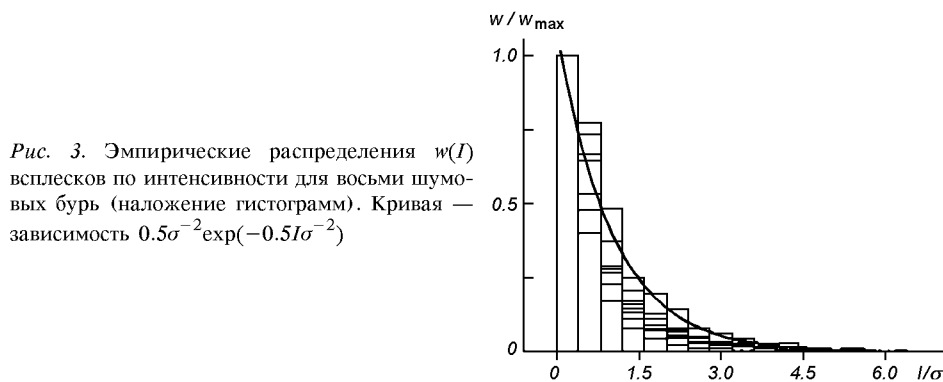


Рис. 3. Эмпирические распределения $w(I)$ всплесков по интенсивности для восьми шумовых бурь (наложение гистограмм). Кривая — зависимость $0.5\sigma^{-2}\exp(-0.5I\sigma^{-2})$

масштабу и изображены на одном рис. 3 в виде наложенных гистограмм. Для десяти из десяти отобранных для изучения ШБ эмпирическое распределение оказалось близко к аналитическому распределению, показанному на рис. 3 в виде плавной кривой. Это свидетельствует в пользу того, что образование флуктуаций интенсивности ШБ может быть результатом случайной рефракции радиоволн на неоднородностях электронной концентрации в короне.

Однако эмпирическое распределение ШБ (рис. 4, *a*), наблюдавшейсяся 30 марта 2001 г., существенно отличалось от аналитического, задаваемого формулой (2). Изменение длины реализации от 10 до 150 мин и вычитание тренда существенно не изменяло характер распределения. По-видимому, отличие от экспоненциального закона является свойством данной ШБ. Ее особенностью являлась весьма большая интенсивность.

Причиной повышенной интенсивности могло быть либо увеличение размеров источника, либо одновременное существование на диске Солнца нескольких ШБ. По законам теории вероятности в обоих случаях следует ожидать нормализации распределения. Например, если первичный источник излучения не является точечным, то в пункте приема будут суммироваться флуктуации интенсивности от его отдельных частей. Согласно центральной предельной теореме теории вероятности закон распределения суммы независимых случайных величин по мере увеличения числа слагаемых стремится к нормальному независимо от того, каково было распределение слагаемых.

Действительно, суммарный поток излучений семи ШБ из таблицы (в предположении их одновременного наличия на диске Солнца) приблизи-

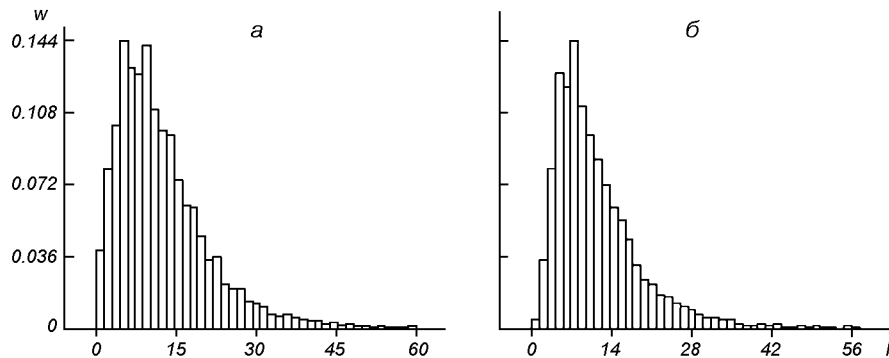


Рис. 4. Распределение $w(I)$ для мощной шумовой бури 30 марта 2001 г. (а) и распределение для суммы семи шумовых бурь (б)

тельно равен потоку ШБ 30 марта 2001 г. Распределение полученной суммы показано на рис. 4, б. Как и следовало ожидать, распределение суммы стремится к нормальному, несмотря на то, что каждое слагаемое суммы распределено по экспоненциальному закону. Этот результат является еще одним свидетельством в пользу справедливости гипотезы образования флуктуаций интенсивности ШБ за счет многолучевого распространения радиоволн в турбулентной плазме солнечной короны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассеяние радиоволн на неоднородностях электронной плотности короны, являющееся общепризнанным фактом, неизбежно сопровождается возникновением флуктуаций интенсивности рассеянного сигнала.
2. Согласно выводам теории вероятности распределение интенсивности рассеянного сигнала описывается экспоненциальным законом.
3. Эмпирическое распределение интенсивности большинства шумовых бурь также удовлетворительно описывается экспоненциальным законом.
4. Перечисленные факты свидетельствуют в пользу гипотезы образования всплескового компонента шумовых бурь в результате рассеяния излучения точечного источника квазипостоянного уровня на неоднородностях короны.

1. Левин Б. П. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1960.—663 с.
2. Юровский Ю. Ф. Определение длительности всплесков солнечных шумовых бурь по их спектру мощности // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2003.—99.—С. 92—100.
3. Elgaroy Q. Solar Noise Storms. — Pergamon Press, 1977.—363 p.
4. Fokker A. D. Coronal scattering of radiation from solar radio sources // Bull. Astron. Inst. Netherlands.—1965.—1, N 2.—P. 111—124.
5. Mercier C., Trotter G. Coronal radio bursts: a signature of nanoflares? // Astrophys. J.—1997.—474, N 1.—P. L65—L68.
6. 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.
7. Steinberg J. L., Auber-Giraud M., Leblanc Y., Boisshot A. Coronal scattering, absorption and refraction of solar radioburst // Astron. and Astrophys.—1971.—10, N 3.—P. 362—376.

Поступила в редакцию 09.10.06