

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАДИОВСПЛЕСКОВ III ТИПА ПО ДАННЫМ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА (ССМД)

Муратова Н.О., Кашапова Л.К.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

STATISTICAL ANALYSIS OF THE TYPE III RADIO BURSTS PARAMETERS ACCORDING TO METER-RANGE SOLAR SPECTROPOLARIMETER (SSMD) DATA

Muratova N.O., Kashapova L.K.

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-231-234>

The paper presents an analysis of the parameters of type III radio bursts registered in the range of 50–500 MHz by the Solar Spectropolarimeter of Meter Range wavelengths (SSMD), radio astrophysical observatory of ISTP SB RAS obtained during 2016–2019 and related to minimum solar activity. We suggested the original method of dynamic spectra processing for getting the characteristics of type III radio burst and estimation their drift rate. The results of the statistical analysis of type III radio burst parameters are discussed from the point of energy release during the minimum of solar cycle.

В классификации радиовсплесков III тип выделяется малой длительностью, широкой занимаемой полосой частот и быстрым частотным дрейфом [1]. Радиовсплески III типа могут наблюдаться в виде отдельных всплесков, в составе групп на различных фазах эволюции солнечных вспышек, а также во время шумовых радиобурь [2]. Их связывают с излучением ускоренных электронов, распространяющихся из солнечной атмосферы в межпланетное пространство. Механизм формирования излучения – плазменный, и в большинстве случаев наблюдается вторая гармоника плазменного излучения [3]. Так как всплески связаны с потоками ускоренных электронов, то они являются индикатором процессов ускорения и энерговыделения во время солнечных вспышек. В связи с этим особый интерес представляют радиовсплески III типа, зафиксированные во время минимума солнечной активности, когда происходят вспышки класса C по GOES и ниже. Для этого класса событий обычно сложно использовать наблюдения в жестком рентгеновском диапазоне для диагностики параметров вспышечной плазмы. Анализ же скоростей дрейфа по частоте во время радиовсплесков III типа позволяет делать оценки параметров потоков ускоренных электронов. Наблюдения, проводившиеся на Солнечном Спектрографе Метрового Диапазона (ССМД) [4] с 2016 по 2020 год предоставили оригинальный материал для проведения такого исследования. Основные характеристики ССМД приведены в таблице.

Целью данной работы было статистическое исследование параметров радиовсплесков III типа, зафиксированных ССМД в 2016–2019 гг. и анализ процессов энерговыделения во время минимума солнечной активности.

Таблица.

Параметр	Значение
Частотный диапазон	50–500 МГц
Число каналов	4608
Ширина канала (шаг)	97.66 КГц (97.66 КГц)
Временное разрешение	1 секунда

Главным критерием для отбора событий служило временное разрешение прибора, поэтому мы выбирали события длительностью не менее 2 секунд. Для достоверности выбирались одиночные всплески, в том числе и находящиеся в составе групп радиовсплесков. Всего для анализа было отобрано около 90 событий за 2016, 2017, 2019 годы. Для расчета параметров событий необходимо было выделить всплески на фоне сильных помех, особенно характерных для нижней части диапазона ССМД 50–500 МГц. Чтобы выделить всплеск, мы для каждого частотного канала производили вычитание фона, интерполяцию сигнала по времени, вписывание функции Гаусса и нахождения максимума интенсивности. Для обработки был написан код на языке IDL. После выделения всплесков мы вычисляли скорости дрейфа $\Delta f/\Delta t$, используя стандартную формулу $\Delta f/\Delta t = (f_e - f_s)/(t_e - t_s)$, где f_e и f_s – конечная и начальная частота всплеска, t_e и t_s – время конца и начала всплеска.

Результаты сравнения полученных скоростей дрейфа с шириной полосы, в которой был зафиксирован всплеск, приведены на рис. 1а. Сплошной прямой показано соотношение скорости дрейфа к полосе частот равное 1 секунде – это значение соответствует разрешающей способности прибора по времени. Штриховой линией отмечено соотношение равное двум секундам. Соответственно, данные, лежащие слева от этой линии, мы не можем считать достоверными, поскольку на такие всплески у нас приходится менее двух временных интервалов. Поэтому для анализа будут использованы только события, лежащие справа от штриховой линии. Отметим, что большинство отобранных событий относится к 2019 году, где вклад в основном вносят слабые всплесочные события. Вклад числа событий 2017 года, когда наблюдалась серия мощных всплесков небольшой и не должен влиять общую статистику.

Наибольший интерес представляют оценки энергии электронов, сгенерировавших радио всплески III типа. Эти оценки можно сделать, измерив скорости электронов. Известно, что частота основной гармоники f_p связана с концентрацией электронов N_e выражением $f_p = 8,98 \times \sqrt{N_e}$ и в большинстве случаев III тип излучает на второй гармонике $f_s = 2f_p$ [5].

Если же знать, как распределяется концентрация электронов с расстоянием от центра Солнца R , то можно оценить и скорость электронов. Для того чтобы это сделать, мы применили модель Ньюкирка [6], которая описывает распределение их концентрации с высотой формулой $N_e = N_0 \times \alpha \times (10^{4.32(R_0/R)})$, где R_0 – радиус Солнца, N_0 – концентрация электронов и α – коэффициент увеличения электронной плотности, равный 3 для умеренно активного Солнца. Вычислив расстояния R_1 и R_2 для конца и начала всплеска, мы получим скорости электронов по стандартной формуле $v = (R_2 - R_1)/(t_2 - t_1)$, где $t_2 - t_1$ – длительность всплеска.

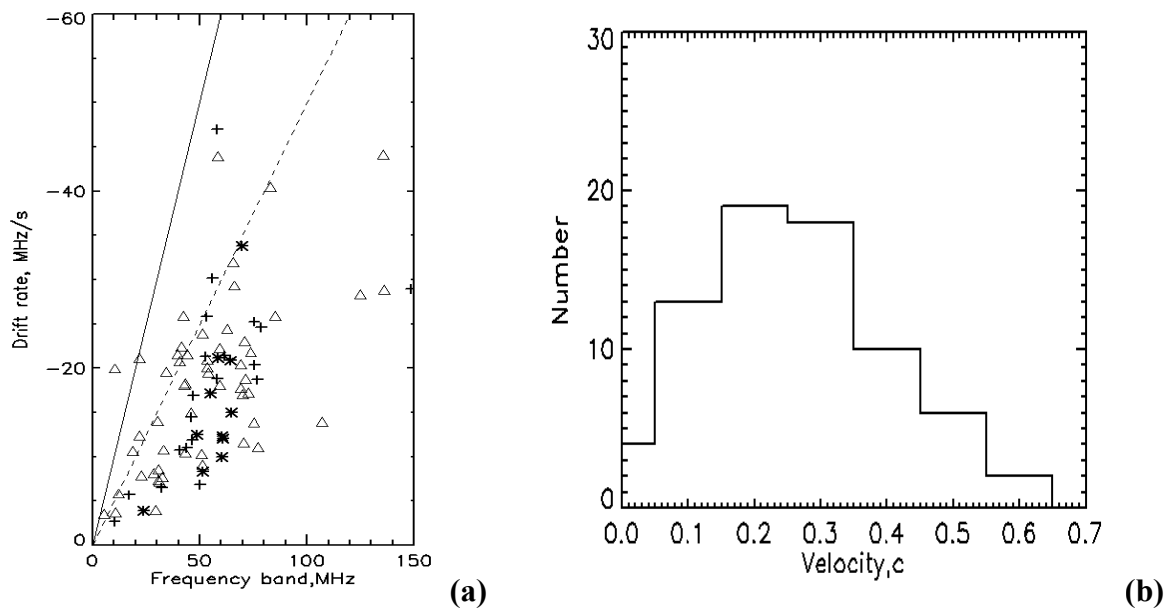


Рис. 1. (a) График зависимости скоростей дрейфа от ширины полосы частот, занимаемой всплеском. Сплошной линией отмечена разрешающая способность ССМД в 1 секунду, штриховая линия соответствует 2 секундам. Треугольником отмечены данные за 2019 год, звездочкой за 2017 и знаком плюс за 2016. (b) Распределение количества событий по скоростям, c – скорость света.

На рис. 1(b) показано полученное в результате расчёта распределение электронов по скоростям. Распределение по скоростям электронов для различных событий нормальное, максимальное число событий приходится на скорость 0.3 от скорости света. С одной стороны, это совпадает с результатами, полученными другими авторами и указывает на отсутствие различия в энергиях электронов, связанных со слабыми событиями в период минимума солнечной активности, с другой стороны позволяет использовать для оценки энергии формулу для нерелятивистских электронов $E = m_e v^2/2$. На рис. 2(a) представлена зависимость энергий электронов от длительности всплеска. Отметим общую тенденцию увеличения длительности всплеска с уменьшением энергии сгенерировавших его электронов. Ширина полосы энергий электронов составляет около одного порядка. События 2017 года, связанные с мощными вспышками, находятся на верхней грани-

це энергий этой полосы, в то время как события 2019 года, когда не наблюдалось мощных вспышек, равномерно распределены по энергиям. Как видно на рис. 2(b), данный факт нельзя объяснить особенностями распределения событий по энергиям. На этом рисунке можно также видеть, что большинство проанализированных событий имело энергии в диапазоне 10–30 keV со спадом числа событий с высокими энергиями.

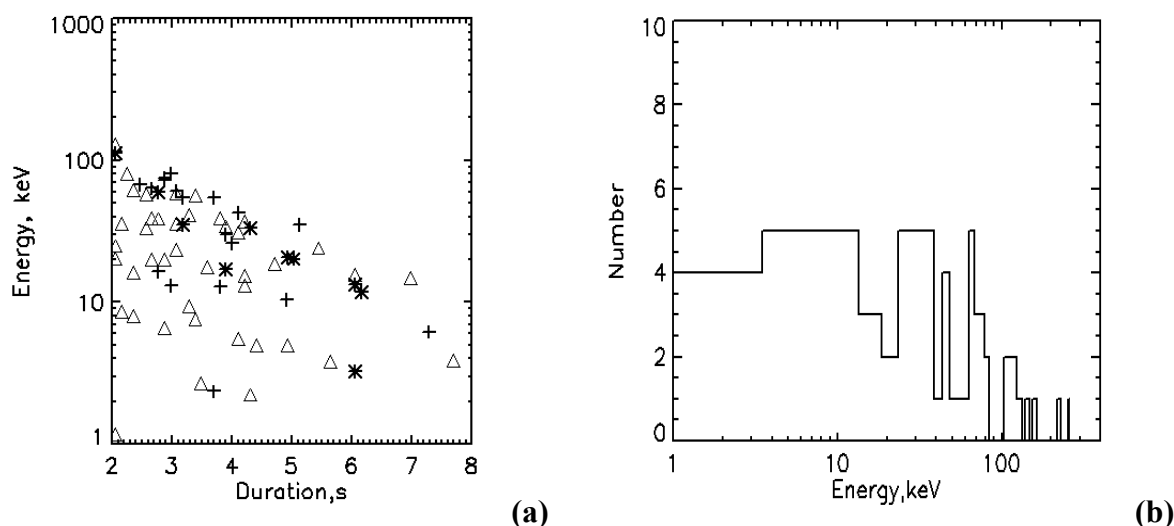


Рис. 2. (а) График зависимости энергии электронов от длительности. Треугольником отмечены данные за 2019 год, звездочкой за 2017 и знаком плюс за 2016. (b) Зависимость числа событий от энергии электронов.

Результаты статистического анализа параметров радиовсплесков III типа, наблюдавшихся на ССМД показали, что в целом параметры событий согласуются с результатами, полученными ранее, что указывает на их достоверность. События 2019 года, связанные с самым слабым периодом солнечной активности показали широкий разброс по энергиям при анализе зависимости между энергией электронов и продолжительностью событий. Это может указывать как на то, что процессы ускорения не зависят от мощности вспышек, так и на то, что процесс может быть связан с изменением распределения электронной плотности с высотой в активных областях в период минимума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A. // Ann. Rev. Astron. Astrophys, 1963, v. 1, no. 1, 291–366 pp.
2. https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/5
3. Reid H.A.S., Ratcliffe H. // Res. Astron. Astrophys, 2014, v. 14, no. 7, 773-805 pp.
4. Муратова Н.О., Муратов А.А., Кашиanova Л.К. // Солнечно-земная физика, 2019. т. 5, № 3. с. 3–10.
5. Suzuki, S., Dulk, G.A. // Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths, 1985, 289-332 pp.
6. Newkirk, G. Jr. // Astrophys. J., 1961, v. 133, p. 983.