

КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПАЙКОВ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Чариков Ю.Е.¹, Складорова Е.М.¹, Шувалова В.И.², Шабалин А.Н.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

ON THE DETECTION OF THE HARD X-RAY SPIKES IN SOLAR FLARES

Charikov Yu.E.¹, Sklyarova E.M.¹, Shuvalova V.I.², Shabalin A.N.¹

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

²The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-341-344>

Detecting millisecond spikes in the hard X-ray emissions of solar flares proves challenging due to the limited number of quanta recorded within a 16 or 64 millisecond interval. The most informative data originate from observations of CGRO/BATSE. The initial time series undergoes processing, including identifying the slowly changing component (trend) and calculating the standard deviation. Further criteria for detecting spikes are introduced, specifically, the number of bins that define the spike profile and the recording of spikes across several energy channels. The detection technique for spikes in X-ray emissions from the SOL1998-08-31 and SOL2017-07-03 flares is demonstrated.

Введение

В структуре жесткого рентгеновского (ЖР) излучения солнечных вспышек регистрируются импульсы различной длительности (см. [1] и ссылки в ней). Элементарные ЖР всплески секундной длительности отчетливо видны даже визуально во временных рядах вспышечного излучения. Намного сложнее обстоит дело с выявлением более тонкой структуры субсекундной длительности. Причина в малом числе квантов в интервале одного бина, наименьшая длительность которого в разных наблюдениях составляет от 16 мс до 256 мс [2, 4], и потому малой величине отношения сигнал/шум. Поэтому, необходимо использовать методы обработки, которые должны учитывать как специфику излучения, так и сам процесс регистрации. Обсудим основные этапы обработки.

1. Вычитание тренда

Спайки являются субсекундными структурами временного ряда, поэтому для их корректного отождествления необходимо выделение быстро меняющейся (высокочастотной) компоненты из исходного сигнала, для чего производится вычитание медленно меняющейся компоненты (тренда). В данной работе предлагается определение тренда путем сглаживания исходного сигнала скользящей средней. С целью

обнаружения в сигнале структур с характерными временными масштабами, не превышающими 1 секунду, предлагается производить сглаживание по временному интервалу длительностью 1.5 с.

2. Вычисление стандартного отклонения

Высокочастотный временной ряд представляет собой совокупность шумовой компоненты и спайковых структур. Для выделения спайка на фоне шума традиционно применяется критерий превышения уровня 3σ . При этом нет единого мнения относительно того, как именно следует вычислять величину стандартного отклонения. Можно выделить следующие подходы: а) классическое определение стандартного отклонения по всему высокочастотному временному ряду вне зависимости от фазы солнечной вспышки [2]; б) вычисление стандартного отклонения в скользящем окне заданной ширины [3]; данный подход позволяет учитывать зависимость шума, связанного с регистрацией рентгеновских квантов, от стадии эволюции вспышки, в) определение стандартного отклонения в каждый момент времени как квадратного корня из соответствующего значения функции тренда [4], также учитывает зависимость шумовой составляющей от фазы вспышки.

3. Критерии выделения спайков

Единый критерий, в соответствии с которым можно было бы однозначно идентифицировать спайк, отсутствует. Общим среди подходов является требование превышения уровня 3σ хотя бы для трех последовательных точек высокочастотного временного ряда, как минимум в двух энергетических каналах [2–4]. Чем больше временных точек наблюдается в профиле спайка, тем более вероятно, что это спайковая структура реального излучения, а не шум. Дополнительным важным критерием в выделении спайков является наличие аналогичных структур в разных энергетических каналах. Обсудим влияние предложенных методов обработки на примере вспышек SOL1998-08-31T15:35:14, M1.5, (BATSE) и SOL2017-07-03 T16:14:05, M1.3, (Fermi/GBM).

3.1. Определение и вычитание тренда

Для вспышки SOL2017-07-03T16:14:05 (это время соответствует $t = 1046$ с на рис. 1, 3 и 5) тренд определен сглаживанием по 4 сек (левые панели) и 1.5 сек (рис. 1, справа). Вычитание тренда, сглаженного по 1.5 сек, удаляет из сигнала временные структуры длительностью более 1–1.5 с, позволяя оценить наличие субсекундных спайков на фоне уровня 3σ .

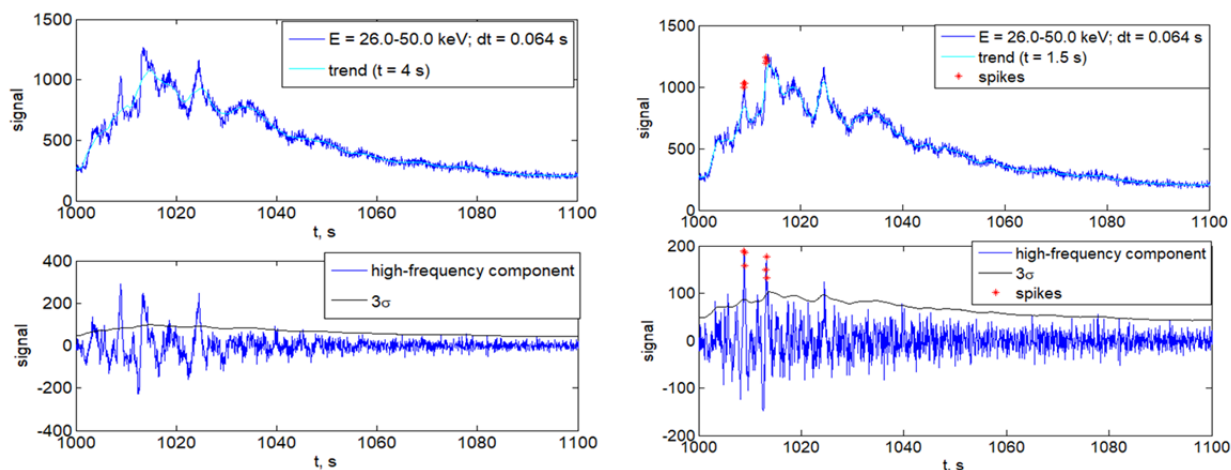


Рис. 1.

3.2. Определение стандартного отклонения

Для вспышки SOL2017-07-03T16:14:05 стандартное отклонение σ было определено несколькими способами – постоянное значение, вычисленное по всему высокочастотному временному ряду; переменное значение, равное квадратному корню из значения тренда в каждом бине; значение, вычисленное в скользящем окне шириной 30 и 60 секунд (рис. 3). Спайки зафиксированы для случаев постоянного значения уровня σ и вычисленного на основе корня из тренда. Второй вариант определения стандартного отклонения представляется более обоснованным, так как учитывает зависимость величины шума от фазы вспышки.

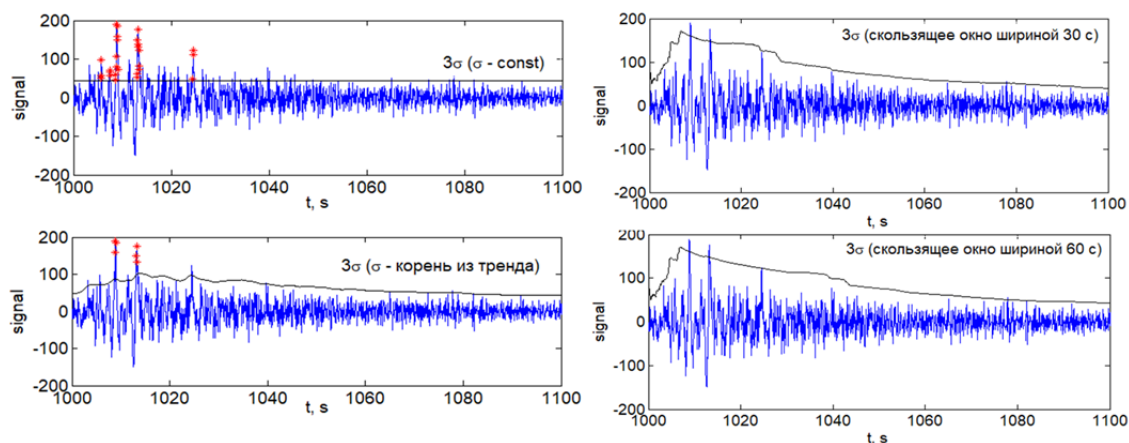


Рис. 3.

3.3. Дополнительные критерии выделения спайка

За: наличие спайков сходной формы в **нескольких последовательных энергетических каналах**. Пример: вспышка SOL1991-12-12 (03:00:23UT), M1.1, зарегистрированная спектрометром BATSE/CGRO. Общий временной профиль показан на рис. 4 слева, вертикальные прямые ограничивают анализируемый интервал времени. Временное разрешение соответствует 64 мс. Отметим наличие спайков в различных энергетичес-

ких каналах (рис. 4, справа), несколько отличающихся по форме профиля и смещенных относительно друг друга.

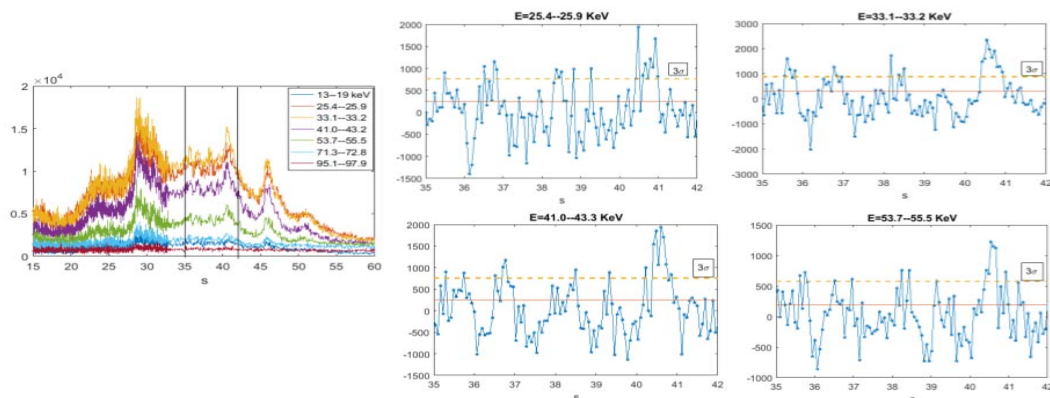


Рис. 4.

3b: количество временных точек в профиле спайка – многоточечные профили являются более вероятными кандидатами в спайки. Примером может служить структура в высокочастотном сигнале вспышки SOL2017-07-03T16:14:05 (рис. 5), многоточечные профили, повторяющиеся в трех энергетических каналах.

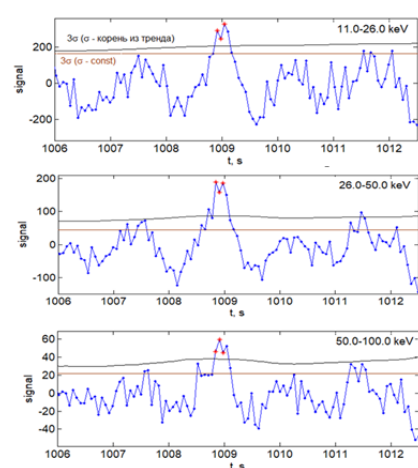


Рис. 5.

На рис. 5 по критериям 3a и 3b можно уверенно выделить 4 спайка, хотя, если руководствоваться только критерием превышения уровня 3σ , их число уменьшается.

Заключение

Приведенный алгоритм определения спайков позволяет детектировать значимые спайки и проводить оценку характерных времен ускорительных процессов. Отметим, что между различными энергетическими каналами могут быть временные задержки, которые необходимо учитывать при кросс-энергетическом поиске временных структур.

Литература

1. *Aschwanden, M.* Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions // Springer Science & Business Media, – 2005.
2. *Qiu, J., Cheng, J.X., Hurford, G.J. et al.* // Astron. Astrophys. 2012. V. 547. P. A72.
3. *Cheng, J.X., Qiu, J., Ding, M.D. & Wang, H.* // Astron. Astrophys. 2012. V. 547. P. A73.
4. *Knuth, T. & Glesener, L.* // Astrophys. J. 2020. V. 903. № 1. P. 63.