

СУБСЕКУНДНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ И РАДИОВСПЛЕСКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е., Склярова Е.М.

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

SUBSECOND X-RAY AND RADIO BURSTS IN SOLAR FLARES

Shabalin A.N., Charikov Yu.E., Sklyarova E.M.

Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

The study of subsecond X-rays and radio spikes in solar flares allows the estimation of the time characteristics of the mechanisms of magnetic reconnection and particle acceleration in the solar atmosphere. In this study, we considered the precursor observational data of the M2.8 class flare on January 12, 2000, during which X-ray and radio bursts were recorded. An improved burst detection method based on empirical modal decomposition (EMD) was used, which allows the detection of subsecond bursts with high sensitivity and a minimum number of false alarms. By analyzing the time structure of the flare, we were able to establish delays between bursts in different energy ranges and estimate the plasma parameters in the emission region.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-343-346>

Введение

Солнечные вспышки, являясь одними из самых мощных проявлений солнечной активности, до сих пор хранят множество загадок относительно точных механизмов энерговыделения и ускорения частиц. Тонкая временная структура рентгеновского и радиоизлучения вспышек в виде субсекундных всплесков, или спайков, предоставляет уникальную возможность для изучения элементарных процессов во вспышечной плазме и разработки новых методов диагностики ее параметров. В рамках исследования был проведен анализ рентгеновских и радио спайков (субсекундных всплесков излучения) в предвспышечной и взрывной фазах солнечных вспышек с целью разработки методов диагностики параметров вспышечной плазмы на ранних стадиях вспышек. Анализ спайков представляет сложную задачу, поскольку сигналы часто имеют малую амплитуду на фоне шума, а их длительность составляет всего несколько десятков миллисекунд. Настоящее исследование направлено на разработку и оптимизацию методов выявления и анализа субсекундных спайков, а также на изучение их взаимосвязи с процессами энерговыделения на Солнце.

Методика

Для обнаружения субсекундных всплесков в данных наблюдений был разработан метод, основанный на эмпирическом модальном разложении (EMD) и последующей фильтрации значений мод (Intrinsic Mode Functions,

или IMF) по критерию превышения амплитудой сигнала уровня 99% процентиля. Основные этапы методики включают:

1. **Эмпирическое модальное разложение (EMD)**. Данные временных рядов разбиваются на внутренние моды, которые выделяют квазипериодические компоненты в разных частотных диапазонах, что дает возможность более точно идентифицировать и исследовать процессы, происходящие на разных временных масштабах. Это позволяет выделить высокочастотные квазипериодические компоненты, на фоне которых выделяются быстрые изменения сигнала, характерные для рентгеновских и радиоспайков, возникающих на субсекундных временных масштабах.

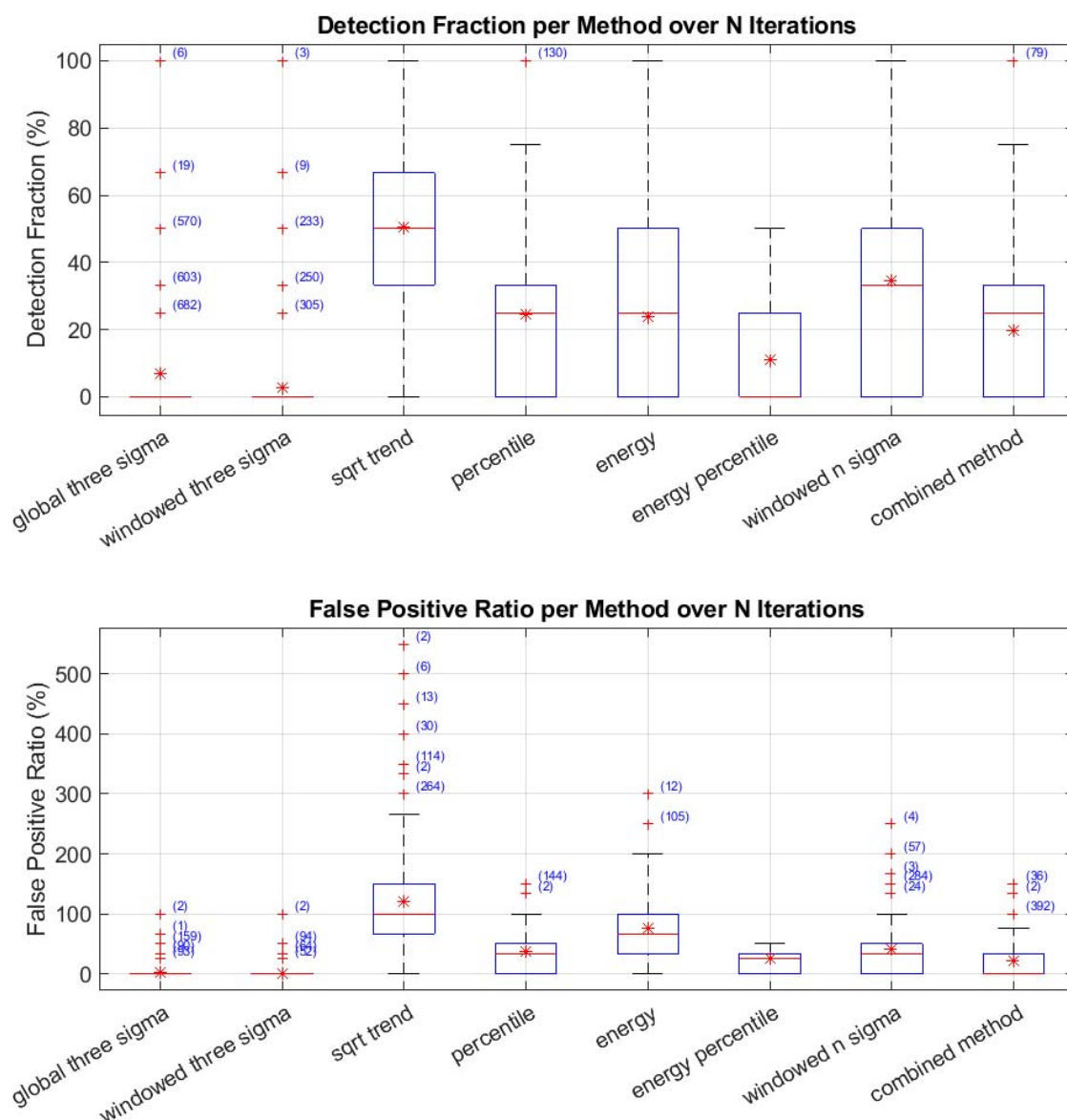


Рис. 1. Сравнение 7-ми методов обнаружения спайков по результатам розыгрыша 10 000 случайных сигналов с предзаданными спайками, с красным и белым шумом, при SNR = 5 Дб. Обозначения и фигуры на графиках соответствуют описанию функции boxplot в пакете MATLAB.

2. Фильтрация IMF и порог 99%. На основе амплитуды сигналов в отдельных IMF-компонентах были отобраны те, которые соответствуют значимым всплескам. Порог 99% процентиль для амплитуд IMF позволил минимизировать количество ложных срабатываний.

3. Дополнительный критерий. Обнаруженные таким образом спайки дополнительно фильтровались по критерию 2σ со скользящим окном 3 с, что позволяло понизить количество ложных срабатываний.

4. Сравнение с традиционными методами. Данный комбинированный метод был сопоставлен с классическими подходами обнаружения спайков на уровне 3σ , где σ вычисляется двумя способами: как стандартное отклонение и как корень из медленной компоненты сигнала [1, 2]. Новый подход продемонстрировал более высокую результативность и позволил минимизировать количество ложных срабатываний, что особенно важно при анализе сигналов с низким SNR (рис. 1).

После разработки и тестирования комбинированного метода были выполнены следующие шаги:

- **Обработка данных предвспышечного излучения в событии 12 января 2000 г., GOES класс M2.8.** Изучены данные рентгеновских и радиоспектров, зарегистрированные BATSE и NORP. В данных с временным разрешением 16 мс выявлены субсекундные спайки в различных каналах в диапазоне 24–127 кэВ для рентгеновского излучения и на частотах 17 и 35 ГГц для радиодиапазона.

- **Выявление задержек между каналами.** Обнаружены временные задержки между рентгеновскими и радиоспайками порядка 2 секунд. Эти задержки указывают на различия в процессах формирования и распространения излучения в различных диапазонах.

- **Планируемое моделирование.** В будущем планируется проведение численного моделирования распространения высокоэнергетичных электронов в магнитных петлях для оценки влияния плотности плазмы и углового распределения частиц на характеристики спайков.

Результаты

Основные результаты исследования включают (рис. 2):

- **Временная структура спайков.** Продолжительность спайков в рентгеновском и радиодиапазонах составила от 30 мс, что соответствует минимальному времени, которое можно обнаружить, согласно кинетическим расчетам [1], и таким образом является ограничением сверху для длительности процесса(ов) ускорения частиц. Присутствие спайков в излучении свидетельствует о фрагментарности энерговыделения.

- **Задержки между диапазонами.** Наличие задержек порядка 2 секунд между всплесками в рентгеновском и радиодиапазонах подтверждает различия в распространении ускоренных электронов в различных частях магнитных петель.

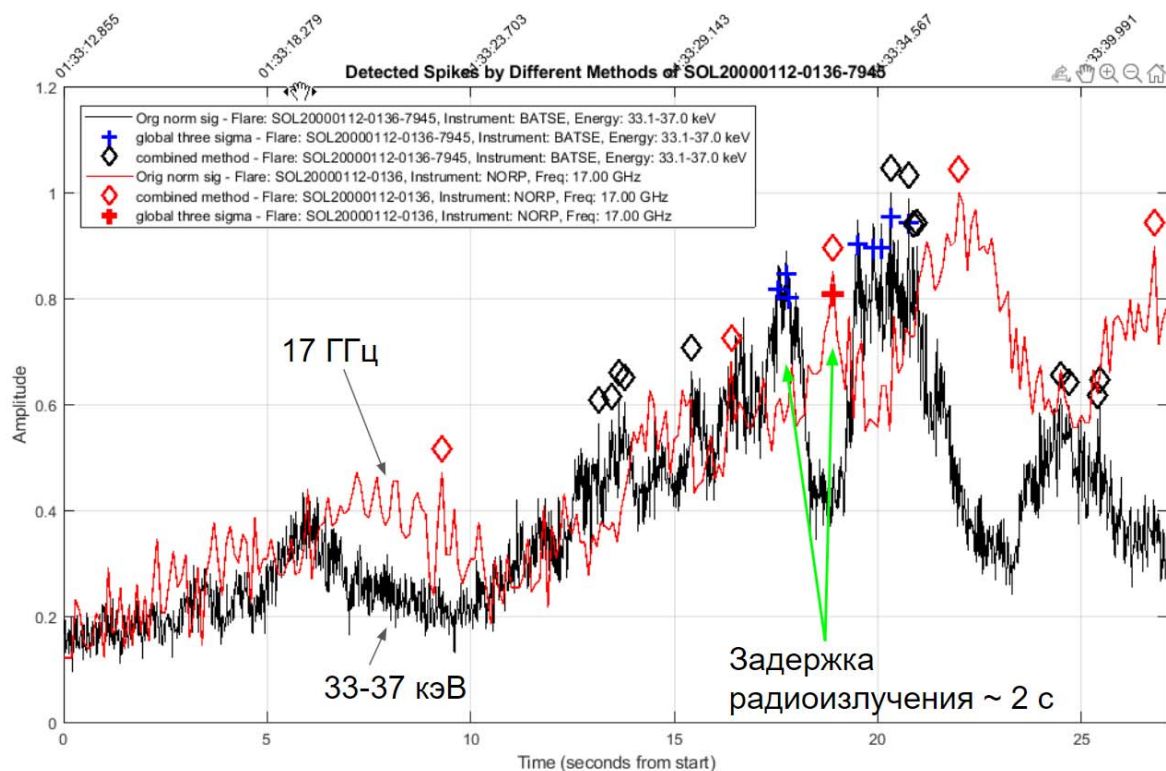


Рис. 2. Обнаруженные спайки для канала 33–37 кэВ (BATSE) и 17 ГГц (NORP) во время предвспышечного излучения в событии 12 января 2000 г.

Будущие исследования будут связаны с моделированием процесса распространения ускоренных во вспышке электронов в магнитоактивной плазме, чтобы понять, как амплитуда рентгеновских всплесков зависит от параметров плазмы и пучка ускоренных электронов: распределения концентрации плазмы вдоль петли магнитного поля, углового и энергетического распределения ускоренных электронов. Это позволит уточнить параметры магнитного поля и плотности плазмы в источниках рентгеновских и радиоспайков.

Работа Чарикова Ю.Е., Складовой Е.М. выполнена в рамках Государственной программы FFUG-2024-0002. Работа Шабалина А.Н. выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-72-10158.

Литература

1. Charikov, Y.E. et al. Generation of X-Ray Spikes in Solar Flare Plasma // *Geomagn. Aeron.* 2022. V. 62. N 8. P. 1085–1095. <https://doi.org/10.1134/S0016793222080072>
2. Knuth, T. and Glesener, L. Subsecond Spikes in Fermi GBM X-Ray Flux as a Probe for Solar Flare Particle Acceleration // *Astrophys. J.* 2020. V. 903. N 1. P. 63. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab>