

Анализ субсекундной структуры рентгеновских и радиовсплесков в солнечных вспышках

© А.Н. Шабалин, Ю.Е. Чариков, Е.М. СклЯрова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: taoastronomer@gmail.com

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.

В окончательной редакции 13 августа 2025 г.

Принято к публикации 15 августа 2025 г.

Рассмотрены результаты наблюдений солнечной вспышки класса M2.8 12 января 2000 г., во время которой были зарегистрированы рентгеновские и радиовсплески. Для их обнаружения использовался усовершенствованный метод, основанный на эмпирической модальной декомпозиции, который позволяет детектировать субсекундные всплески с высокой чувствительностью и минимальным количеством ложных срабатываний. Анализ временной структуры вспышки позволил установить задержки между всплесками в разных энергетических диапазонах и оценить параметры плазмы в области излучения.

Ключевые слова: солнечные вспышки, жесткое рентгеновское излучение, радиоизлучение, субсекундные всплески, ускорение частиц, магнитное пересоединение.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61790.234-25

Солнечные вспышки представляют собой наиболее мощные взрывные процессы в Солнечной системе, сопровождающиеся выделением огромного количества энергии (до 10^{32} erg) за короткое время (см., например, [1]). Фундаментальным механизмом, лежащим в основе вспышек, является быстрое преобразование магнитной энергии, накопленной в короне Солнца, в кинетическую энергию частиц и тепловую энергию плазмы посредством магнитного пересоединения. Одним из ключевых диагностических инструментов для изучения механизмов ускорения частиц во вспышках служит жесткое рентгеновское излучение (ЖР излучение, фотоны с энергией $> 15\text{--}25$ keV), возникающее преимущественно за счет тормозного излучения ускоренных электронов при их взаимодействии с плотной плазмой хромосферы, хотя корональные источники ЖР излучения также наблюдаются, но более редко [1].

Временные профили ЖР излучения во время вспышек часто демонстрируют сложную структуру с быстрыми вариациями потока. Среди них особое место занимают субсекундные всплески, или спайки — короткие (длительностью от десятков миллисекунд до $1\text{--}2$ s) и резкие увеличения потока ЖР излучения [2–5]. Спайки представляют собой самые быстрые наблюдаемые вариации рентгеновского излучения вспышек и являются прямым свидетельством фрагментарности и импульсного характера процессов энерговыделения и ускорения частиц [6]. Короткая длительность спайков накладывает жесткие ограничения на возможные механизмы ускорения и обуславливает высокую эффективность и скорость энерговыделения. Изучение временных, спектральных и пространственных характеристик спайков, а также их связи с другими проявлениями вспышечной активности (например, радиовсплесками) предоставляет уникальную возможность для исследования элементарных актов

энерговыделения во вспышечной плазме и разработки новых методов диагностики ее параметров [7].

Анализ спайков представляет собой сложную задачу. Сигналы спайков имеют малую амплитуду и теряются на фоне шума и медленно меняющейся компоненты излучения вспышки. Их характерная длительность составляет всего несколько десятков или сотен миллисекунд. Традиционные методы обнаружения, основанные на превышении сигналом некоторого порогового уровня (например, 3σ), могут приводить к пропуску реальных событий, особенно при низком отношении сигнал/шум (SNR). Настоящее исследование направлено на разработку и применение усовершенствованного метода для надежного выявления субсекундных спайков в зашумленных данных, а также на исследование характеристик предвспышечной активности и распространения частиц путем анализа их временной структуры в рентгеновском и радиодиапазонах на примере события 12 января 2000 г. Для обнаружения субсекундных всплесков в данных наблюдений был разработан и применен комбинированный метод, основанный на эмпирическом модальном разложении (Empirical Mode Decomposition, EMD) временного ряда [8]. Метод EMD позволяет адаптивно разложить сложный нестационарный сигнал на набор квазипериодических компонент, называемых внутренними модами (Intrinsic Mode Functions, IMF), каждая из которых характеризует колебания в определенном частотном диапазоне, что особенно полезно для отделения короткоживущих непериодических спайков от квазипериодического шума и фоновых колебаний. Это дает возможность выделить высокочастотные компоненты сигнала, на фоне которых быстрые изменения, характерные для рентгеновских и радиоспайков, становятся более заметными.

Предложенный комбинированный метод считает спайк обнаруженным, только если он удовлетворяет двум независимым критериям одновременно:

1) критерий на основе EMD (Percentile): Исходный сигнал разлагается на внутренние моды (IMF). Кандидат в спайки регистрируется, если его амплитуда в высокочастотных IMF превышает порог, равный 99-му процентилю распределения амплитуд для данной моды;

2) критерий на основе локальной дисперсии (Windowed $N\sigma$): Для детрендрованного сигнала регистрируется кандидат в спайки, если его амплитуда превышает N стандартных отклонений ($N\sigma$), рассчитанных в скользящем временном окне (в настоящей работе $N = 2$, длительность окна — 3 s).

Окончательное решение о регистрации спайка принимается только в случае, если оба метода обнаружили событие в один и тот же момент времени (с допустимым допуском, сопоставимым с временным разрешением данных). Такой подход позволяет использовать более мягкий порог в методе Windowed $N\sigma$ ($N = 2$) для повышения чувствительности, в то время как требование одновременного срабатывания второго, независимого критерия, эффективно подавляет ложные обнаружения.

Эффективность данного комбинированного метода была проверена путем сравнения с семью другими методами обнаружения спайков:

1) Global 3σ : классический метод, детектирующий пики, амплитуда которых на детрендрованном сигнале превышает уровень трех стандартных отклонений (σ), рассчитанных для всего временного ряда;

2) Windowed 3σ : вариация предыдущего метода, где уровень 3σ рассчитывается не для всего сигнала, а в скользящем временном окне, что позволяет адаптироваться к локальным изменениям шума;

3) $3\sqrt{\text{trend}}$: метод, предложенный в [5], где пики на детрендрованном сигнале детектируются при превышении уровня $3\sqrt{\text{trend}}$, где trend — это медленно меняющаяся компонента исходного сигнала;

4) Percentile (EMD): метод, использующий эмпирическую модальную декомпозицию (EMD) для разложения сигнала на внутренние моды (IMF). Пики детектируются, когда амплитуда сигнала в одной или нескольких высокочастотных IMF превышает заданный процентиль (например, 99-й) распределения амплитуд этой моды;

5) Energy Ratio (HNS): метод, основанный на анализе Гильберт–Хуанг спектра (HNS). Рассчитывается энергия сигнала в определенном частотном диапазоне (например, 0.5–10 GHz). Пики детектируются, когда отношение текущей энергии к пороговому значению (средняя энергия + $N\sigma$ стандартное отклонение энергии) превышает единицу;

6) Energy Percentile (HNS): вариация предыдущего метода, где пики детектируются, когда энергия сигнала в заданном частотном диапазоне (HNS) превышает порог, соответствующий высокому процентилю (например, 99-му) распределения энергии;

7) Windowed $N\sigma$: метод, аналогичный Windowed 3σ , но использующий настраиваемый множитель N для расчета порога (в настоящей работе $N = 2$). Является одним из двух методов, используемых в нашем комбинированном подходе.

Результаты сравнения (рис. 1) показывают, что предложенный комбинированный метод (EMD + Windowed $N\sigma$) демонстрирует одну из самых высоких вероятностей обнаружения истинных спайков при наименьшем количестве ложных срабатываний по сравнению с другими рассмотренными методами. Моделирование проводилось для 10 000 случайных сигналов с заданными *a priori* параметрами спайков и шума (красного и белого) при SNR = 5 dB. Данное значение отношения сигнал/шум было выбрано как репрезентативное. При более высоких значениях SNR (> 15 dB) эффективность всех рассмотренных методов значительно улучшается, что делает их сравнение менее показательным. Напротив, при SNR < 3 dB надежное детектирование становится затруднительным для любого из алгоритмов.

После разработки и тестирования комбинированного метода он был применен для анализа данных наблюдений предвспышечной фазы солнечной вспышки класса M2.8, произошедшей 12 января 2000 г. Были использованы данные рентгеновского спектрометра BATSE (Burst and Transient Source Experiment) на борту обсерватории CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) и данные радиополяриметров NORP (Nobeyama Radio Polarimeters). В данных BATSE с временным разрешением 16 ms анализировалось рентгеновское излучение в диапазоне энергий 24–127 keV. В радиодиапазоне использовались данные на частотах 17 и 35 GHz с временным разрешением 100 ms.

В результате анализа были выявлены многочисленные субсекундные спайки как в рентгеновском, так и в радиодиапазоне во время предвспышечной фазы события 12 января 2000 г. (рис. 2).

Основные результаты исследования включают:

1. Временная структура спайков: характерная продолжительность обнаруженных спайков в рентгеновском и радиодиапазонах составила от 30 ms (что близко к пределу временного разрешения спектрометра BATSE) до нескольких сотен миллисекунд. Столь короткие длительности соответствуют минимальному времени, которое можно обнаружить согласно кинетическим расчетам [7]. Это подтверждает, что наблюдаемые спайки отражают элементарные акты ускорения частиц и накладывают ограничение сверху на длительность этих процессов. Присутствие множества спайков в предвспышечной фазе свидетельствует о фрагментарном характере энерговыделения еще до начала основной фазы вспышки.

2. Задержки между диапазонами: был обнаружен систематический временной сдвиг между группами спайков в рентгеновском и радиодиапазонах. Радиоспайки на частоте 17 GHz в среднем запаздывали относительно рентгеновских спайков в диапазоне 33–37 keV на

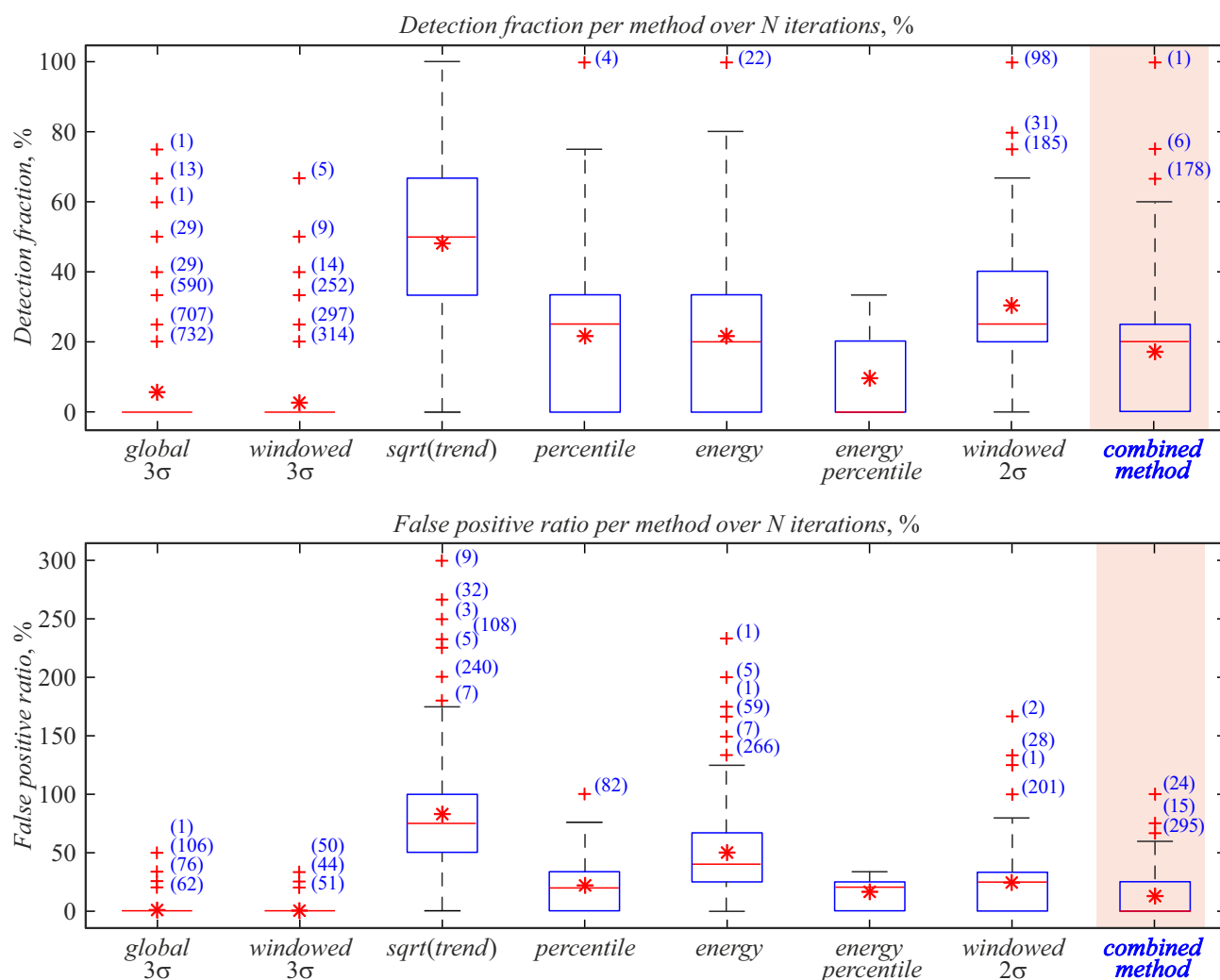


Рис. 1. Сравнение семи методов обнаружения спайков по результатам розыгрыша 10 000 случайных сигналов с предзаданными спайками, с красным и белым шумом, при $\text{SNR} = 5$ dB. Верхняя панель — доля обнаруженных спайков (Detection Fraction). Нижняя панель — отношение ложноположительных срабатываний (False Positive Ratio). Обозначения и фигуры на графиках соответствуют описанию функции boxplot в пакете MATLAB.

величину порядка $2s$ (рис. 2). Такие задержки могут объясняться, например, эффектами захвата и последующего высвобождения частиц (trap-plus-precipitation) в магнитных ловушках [9]. Другой возможной причиной может быть двухстадийный характер процесса ускорения, при котором электроны, ответственные за радиоизлучение (потенциально > 200 keV), ускоряются позже или в другой области по сравнению с электронами, генерирующими рентгеновские фотоны. Детальный анализ таких задержек несет информацию о механизмах ускорения и параметрах плазмы в источнике.

Сравнение результатов на рис. 2 иллюстрирует практическое преимущество предложенного подхода. Комбинированный метод выявляет значительно большее число спайков по сравнению с классическим методом Global 3σ . Полученные результаты подчеркивают важность изучения субсекундной структуры излучения для понимания фундаментальных процессов во вспышках.

Обнаружение спайков в предвспышечной фазе указывает на то, что процессы фрагментарного ускорения частиц могут начинаться до основного импульсного энерговыделения. Наблюдаемые временные задержки между рентгеновскими и радиоспайками несут важную диагностическую информацию о геометрии и физических условиях в области энерговыделения.

На основе более полных выборок спайков, полученных с помощью разработанного метода, дальнейшие исследования будут включать детальное сравнение их характеристик в разных энергетических каналах, а также более точное временное совмещение радио- и рентгеновских данных для надежной идентификации одновременных событий.

Для количественной интерпретации наблюдаемых характеристик спайков, таких как их субсекундная длительность и задержка $\sim 2s$ между радио- и рентгеновским излучением, будущие исследования будут на-

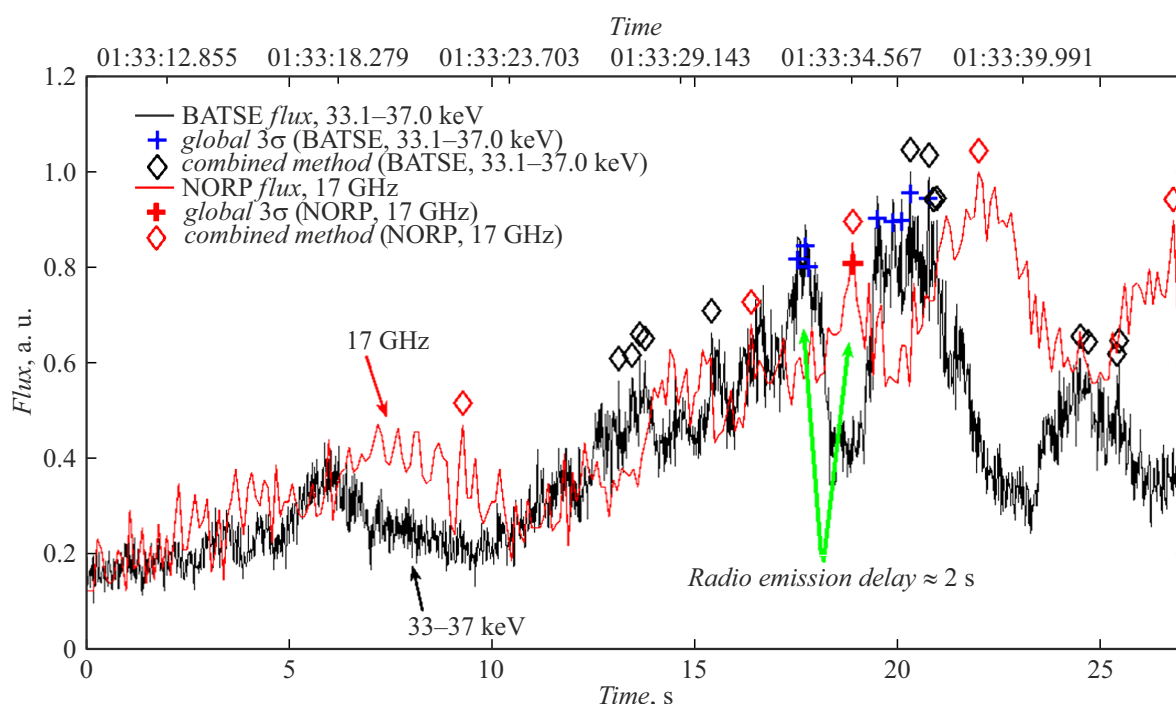


Рис. 2. Пример обнаруженных спайков (отмечены символами) с использованием комбинированного метода (красные кресты для 17 GHz, синие кресты для 33–37 keV) и метода global three sigma (черные ромбы для 33–37 keV, красные ромбы для 17 GHz) на фоне нормированных временных профилей излучения в рентгеновском канале 33–37 keV (BATSE, черная кривая) и на радиочастоте 17 GHz (NORP, красная кривая) во время предвспышечного излучения в событии 12 января 2000 г. Зелеными стрелками показана характерная задержка радиоизлучения относительно рентгеновского.

правлены на численное моделирование процесса распространения пучков ускоренных электронов в магнитных петлях вспышек. Целью моделирования является установление количественной связи между наблюдаемыми характеристиками рентгеновских и радиоспайков (амплитудой, длительностью, спектром, временными задержками) и параметрами вспышечной плазмы и ускоренных частиц. В частности, планируется исследовать зависимость характеристик спайков от распределения концентрации и температуры плазмы вдоль петли, параметров магнитного поля, а также от энергетического и питч-углового распределения ускоренных электронов. Такое моделирование позволит использовать наблюдаемые свойства спайков для более точной диагностики параметров плазмы и характеристик процессов ускорения частиц в источниках вспышечного излучения.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственной программы FFUG-2024-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.J. Aschwanden. *Physics of the Solar Corona* (Springer Berlin Heidelberg, 2006), DOI: 10.1007/3-540-30766-4
- [2] A.L. Kiplinger, B.R. Dennis, K.J. Frost, L.E. Orwig, A.G. Emslie. *Astrophys. J.*, **265**, 99 (1983). DOI: 10.1086/183966
- [3] J. Qiu, J.X. Cheng, G.J. Hurford, Y. Xu, H. Wang. *Astron. Astrophys.*, **547**, A72 (2012). DOI: 10.1051/0004-6361/201118609
- [4] J.X. Cheng, J. Qiu, M.D. Ding, H. Wang. *Astron. Astrophys.*, **547**, A73 (2012). DOI: 10.1051/0004-6361/201118608
- [5] T. Knuth, L. Glesener. *Astrophys. J.*, **903** (1), 63 (2020). DOI: 10.3847/1538-4357/abb779
- [6] A.O. Benz. *Sol. Phys.*, **96** (2), 357 (1985). DOI: 10.1007/BF00149690
- [7] Y.E. Charikov, V.I. Shuvalova, E.M. Sklyarova, A.N. Shabalin. *Geomagn. Aeron.*, **62** (8), 1085 (2022). DOI: 10.1134/S0016793222080072
- [8] G. Wang, X.Y. Chen, F.L. Qiao, Z. Wu, N.E. Huang. *Adv. Adapt. Data Anal.*, **2** (3), 277 (2010). DOI: 10.1142/S1793536910000549
- [9] M.J. Aschwanden, R.M. Bynum, T. Kosugi, H.S. Hudson, R.A. Schwartz. *Astrophys. J.*, **487** (2), 936 (1997). DOI: 10.1086/304633