Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 185–187.

УДК 523.985.3
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-185
ORCID: 0009-0004-2467-2116

ОСОБЕННОСТИ ПОИСКА И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СОЛНЕЧНЫХ НАНОВСПЫШЕК НА ОСНОВЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Е.А. Янчикова[1], Л.С. Леденцов[2]

[1]Физический факультет
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, elizaveta.ianchikova@gmail.com
[2]Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

FEATURES OF DETECTION AND STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR NANOFLARES BASED ON ULTRAVIOLET OBSERVATIONS

E.A. Ianchikova[1], L.S. Ledentsov[2]

[1]Moscow State University Faculty of Physics, Moscow, Russia,
elizaveta.ianchikova@gmail.com
[2]Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. На основе ультрафиолетовых наблюдений прибора AIA/SDO за 20 мая 2019 г. проведен статистический анализ солнечных нановспышек. Модифицирован алгоритм поиска: исправлены ошибки выделения областей, компенсация дифференциального вращения ускорена с помощью joblib (обработка канала сокращена с 2.5 ч до 20 мин), а этапы фильтрации и детектирования оптимизированы JIT-компиляцией Numba (90 с на канал для одного полушария). Упрощено условие временнóго пересечения и реализована кластеризация на основе графов (NetworkX).

Ключевые слова: солнечная корона, солнечная активность, нановспышки

Abstract. Based on ultraviolet observations from the AIA/SDO instrument on May 20, a statistical analysis of solar nanoflares is performed. The detection algorithm is modified: region selection errors are fixed, differential rotation compensation is accelerated using joblib (channel processing reduced from 2.5 hr to 20 min), and filtering and detection stages are optimized with Numba JIT-compilation (90 s per channel per hemisphere). The temporal overlap condition is simplified, and graph-based clustering (NetworkX) is implemented.

Keywords: solar corona, solar activity, solar nanoflares

ВВЕДЕНИЕ

Причина нагрева солнечной короны представляет собой одну из ключевых нерешенных проблем современной астрофизики. Согласно гипотезе, впервые предложенной Паркером [Parker, 1988], основным механизмом нагрева могут служить нановспышки — кратковременные (десятки секунд) локальные проявления солнечной активности с энерговыделением ~10^{24} эрг, что на девять порядков меньше энергии обычных солнечных вспышек. Несмотря на малую энергию каждого отдельного события, их высокая частота возникновения предположительно способна обеспечить наблюдаемый энергетический баланс короны [Hudson, 1991]. Современные космические обсерватории, в том числе Solar Dynamics Observatory (SDO) с прибором Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [Lemen et al., 2012], предоставляют уникальную возможность исследования нановспышек благодаря одновременным наблюдениям в нескольких ультрафиолетовых каналах с высоким пространственным и временным разрешением.

Настоящая работа продолжает исследование [Belov et al., 2024]. На первом этапе независимо повторялся поиск нановспышек с целью верификации их статистических характеристик (общее количество, распределение между полушариями). На втором этапе в алгоритм обнаружения и кластеризации были внесены коррективы и проведена его доработка.

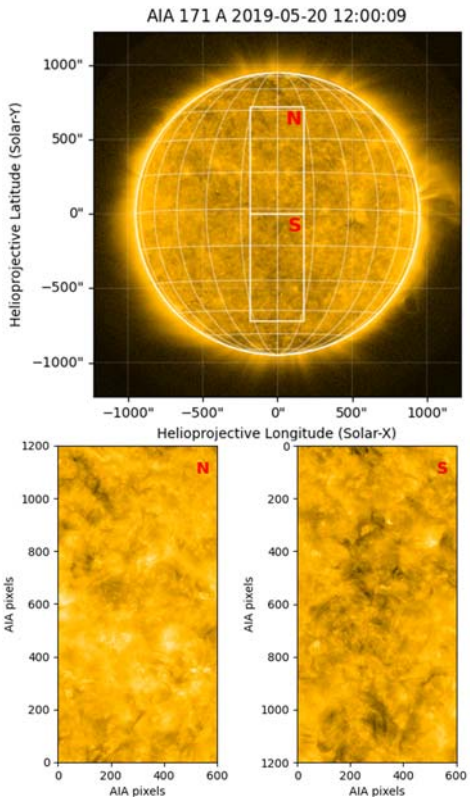

Рис. 1. Изображение Солнца с выделенными в северном (N) и южном (S) полушариях областями, используемыми для дальнейшего анализа

НАБЛЮДЕНИЯ

Исследование основывается на данных прибора Atmospheric Imaging Assembly на борту космической Обсерватории солнечной динамики (Solar Dynamics Observatory, SDO). Из 10 каналов семь узких полос жесткого УФ — корональные 94, 131, 171, 193, 211, 335 Å и линия переходного слоя 304 Å — были использованы в данной работе. В качестве исходных данных взяты наблюдения 20 мая 2019 г. с 12:00 до 13:00 UT (1 ч), пришедшиеся на минимум между 24-м и 25-м циклами солнечной активности, что позволяет изучать характеристики нановспышек, избежав наложения более мощных событий. При частоте съемки 12 с в каждом канале в данном временном интервале содержится 300 кадров (4096×4096 пикселей, 0.6″/пкс); суммарно для всех длин волн объем составил 2100 изображений. Чтобы сократить время обработки и уменьшить влияние эффектов проекции, поиск нановспышек выполнялся не по всему диску, а в двух прямоугольных областях 600×1200 пкс в северном и южном полушариях (рис. 1).

МЕТОДЫ

Методика обработки на языке Python в целом повторяет описанную в [Belov et al., 2024]. Можно выделить следующие основные этапы.

1. Приведение изображений к уровню 1.5 с помощью библиотеки aiapy [Barnes et al., 2020a] (приведение к единому масштабу 0.6″/пкс, нормализация экспозиции, совмещение нулевого меридиана с вертикальной осью).

2. Компенсация дифференциального вращения Солнца совмещением всех кадров серии с опорным с использованием программного пакета Sunpy [Barnes et al., 2020b].

3. Извлечение для каждого пикселя (x, y) временно́й зависимости интенсивности $I_{xy}(n)$, где n — номер кадра.

4. Фильтрация каждой временно́й серии: удаление наиболее коротких всплесков (треков заряженных частиц) и избавление от медленной шумовой составляющей медианным фильтром.

5. Поиск событий по критерию превышения порога 5σ над средним уровнем сигнала; все найденные события сохраняются в csv-файл.

6. Кластеризация — объединение однопиксельных одноканальных событий в одно с учетом пространственной близости и пересечения во времени. Кластеризация проводится как для каждого канала в отдельности, так и с учетом вероятного проявления одного события сразу в нескольких каналах.

Опишем некоторые особенности подхода по сравнению с [Belov et al., 2024] подробнее.

Прежде всего были исправлены неточности выделения области, которые приводили к сдвигу области на несколько пикселей относительно центра кадра по обеим осям и несоответствию размеров заявленным 600×1200 (также разброс в несколько пикселей по обеим осям) — ошибки были связаны с некорректным заданием области (не было учтено, что метод submap библиотеки aiapy включает обе границы, bottom_left и top_right) и передачей WCS для последующей предварительной обрезки до приведения к уровню 1.5, т. е. без учета последующей корректировки положения центра кадра и изменения разрешения пикселя.

Далее были внесены дополнения в процесс компенсации дифференциального вращения, который является самым продолжительным этапом обработки: для одного полного изображения деротация может занимать примерно 1 мин программного времени, что приводит к выводу о необходимости ускорения вычислений. Несложно оценить, что за час наблюдений смещение изображения AIA в центре диска составляет немногим более 16 пкс. Следовательно, для корректного проецирования в течение поворота достаточно области, лишь ненамного превышающей участок, необходимый для последующего анализа [Белов С.А., личная переписка]. По этой причине после приведения к уровню 1.5 кадры обрезаются с запасом 20 пкс по каждой оси, после чего выполняется деротация. Дополнительное ускорение достигнуто распараллеливанием вычислений с помощью средств пакета joblib [The joblib developers, 2025]. После выполнения этого этапа изображения обрезаются до требуемых размеров и сохраняются, что также уменьшает затраты внутренней памяти при обработке, так как перестает быть необходимым хранение исходных изображений.

Следующий этап — очистка временных рядов и поиск поярчаний — предполагает, по большей части, работу с одномерными и многомерными NumPy-массивами данных. Для увеличения скорости обработки на этих этапах использовалась Just-In-Time компиляция, позволяющая достигнуть уровня производительности, сравнимого с C, C++ и Fortran, а именно декоратор @njit библиотеки Numba [Lam et al., 2015] — инструмент, совместимый с NumPy и позволяющий преобразовывать функции сразу в высокоэффективный машинный код без возврата к медленному интерпретируемому режиму Python.

Процедура кластеризации в данной работе также модифицирована по сравнению с [Belov et al., 2024]. Как следует из [Белов С.А., личная переписка], в исходной версии применялся рекурсивный алгоритм: для каждого события с координатами (x, y) и временны́м интервалом $[n_{\text{start}};\ n_{\text{end}}]$ находились пересекающиеся по времени (условие $(n'_{\text{start}} < n_{\text{end}}) \wedge (n'_{\text{end}} \geq n_{\text{end}})$ или $(n_{\text{start}} < n'_{\text{end}}) \wedge (n_{\text{end}} \geq n'_{\text{end}})$) и соседние в пространстве (в квадрате 3×3 с центром в (x, y) события, после чего поиск повторялся для присоединенных событий. В настоящей работе устранены ошибки, связанные с обработкой событий на границах области, и упрощено условие временно́го пересечения — теперь используется стандартная проверка $(n'_{\text{start}} \leq n_{\text{end}}) \wedge (n'_{\text{end}} \geq n_{\text{end}})$, допускающая перекрытие в один кадр.

Кластеризация реализована на основе графов средствами пакета NetworkX [Hagberg et al., 2008]: события представляют собой узлы, ребра соединяют узлы, удовлетворяющие пространственному и временно́му критериям, а искомые кластеры являются компонентами связности построенного графа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате предпринятых модификаций удалось избавиться от некоторых неточностей алгоритма и существенно сократить время обработки данных. На этапе компенсации дифференциального вращения внесенные корректировки позволили снизить время обработки одного канала с ~2.5 ч до 20 мин. На этапах очистки временны́х рядов и поиска поярчаний использование JIT-компиляции (@njit библиотеки Numba) сократило время выполнения до 90 с на канал для одного полушария.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы проведен статистический анализ солнечных нановспышек на основе ультрафиолетовых наблюдений AIA/SDO за 20 мая 2019 г. (период солнечного минимума). Модифицирован и оптимизирован алгоритм поиска событий, включающий приведение данных к уровню 1.5, компенсацию дифференциального вращения, очистку от треков заряженных частиц, медианную фильтрацию, детектирование по 5σ-критерию и кластеризацию на основе графов.

Благодаря предложенным методам ускорения (комбинация предварительной обрезки кадров и распараллеливания с помощью joblib, JIT-компиляция Numba) время обработки одного канала сокращено примерно с 2.5 ч до ~20 мин, что закладывает фундамент для более массовых исследований солнечных нановспышек и может быть полезно для решения проблемы нагрева солнечной короны.

В дальнейшем планируется продолжить исследование влияния на статистику различных методов обработки, а также выложить реализованный код в открытый доступ на GitHub для использования научным сообществом.

Авторы выражают искреннюю благодарность Фонду «Рубежи Науки» за поддержку команды и данного исследования, а также Сергею Александровичу Белову за предоставленные сведения, необходимые для сравнения подходов к программной реализации.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Barnes W., Cheung M., Bobra M., et al. aiapy: A Python Package for Analyzing Solar EUV Image Data from AIA // J. Open Source Software. 2020a. V. 5, iss. 55. P. 2801.

Barnes W.T., Bobra M.G., Christe S.D., et al. The SunPy Project: Open Source Development and Status of the Version 1.0 Core Package // Astrophys. J. 2020b. V. 890, iss. 1. P. 68.

Belov S.A., Bogachev S.A., Ledentsov L.S., Zavershinskii D.I. Solar nanoflares in different spectral ranges // Astron. Astrophys. 2024. V. 684. A60.

Hagberg A.A., Schult D.A., Swart P.J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX // Proc. 7th Python in Science Conference (SciPy2008). Pasadena, CA USA, 2008. P. 11–15.

Hudson H.S. Solar flares, microflares, nanoflares, and coronal heating // Solar Phys. 1991. V. 133. P. 357–369.

Lam S.K., Pitrou A., Seibert S. Numba: a LLVM-based Python JIT compiler // Proc. Second Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC (LLVM '15). New York, NY, USA, 2015. P. 1–6.

Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 17–40.

Parker E.N. Nanoflares and the solar X-ray corona // Solar Phys. 1988. V. 330. P. 474–479.

The joblib developers. joblib (1.5.3) [Электронный ресурс] // Zenodo. 2025. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.17936197 (дата обращения: 23.05.2025).