

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОВСПЫШЕК В КОРОНЕ СОЛНЦА И МЕТОДЫ ИХ РЕГИСТРАЦИИ

^{1,2}Д.И. Завершинский, ^{1,2}С.А. Белов, ^{1,3}С.А. Богачёв, ^{1,4}Л.С. Леденцов

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия
dimanzav@mail.ru

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

ENERGY DISTRIBUTIONS OF NANOFIARES IN THE SOLAR CORONA AND METHODS OF THEIR DETECTION

^{1,2}D.I. Zavershinskii, ^{1,2}S.A. Belov, ^{1,3}S.A. Bogachev, ^{1,4}L.S. Ledentsov

¹Samara National Research University, Samara, Russia
dimanzav@mail.ru

²Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Samara, Russia

³P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

⁴Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. Мы обсуждаем вопросы, связанные с регистрацией и исследованием солнечных вспышек малых энергий (нановспышек) в короне Солнца. Нановспышки — это события с энергией 10^{24} – 10^{27} эрг, наблюдаемые как кратковременные всплески излучения в вакуумном УФ-диапазоне спектра. В настоящее время данные по нановспышкам в основном получают с помощью телескопов AIA на космической обсерватории SDO. Мы представляем методы регистрации таких событий, их энергетические распределения, а также оценки полной энергии и частоты нановспышек на Солнце. Отдельно обсуждается зависимость частоты нановспышек от фазы солнечного цикла и возможную асимметрию их распределения по диску Солнца.

Ключевые слова: солнечная активность, нановспышки, корона Солнца.

Abstract. We discuss the issues related to detection and study of low-energy solar flares (nanoflares) in the solar corona. Nanoflares have a total energy between 10^{24} – 10^{27} ergs and are usually observed as short-term bursts of radiation in the extreme UV spectral range. Currently, the majority of data on nanoflares are obtained from AIA telescopes on board the SDO space observatory. We discuss the methods to detect such events, present their energy distributions and estimate their total energy and production rate. We also discuss the dependence of nanoflares' characteristics on phase of solar cycle and the possible asymmetry of nanoflares over the solar disk.

Keywords: solar activity, nanoflares, solar corona.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные нановспышки представляют собой класс низкоэнергичных явлений на Солнце (10^{24} – 10^{27} эрг), первые экспериментальные признаки которых были обнаружены в 1980-х гг. в виде тонкой структуры излучения (например [Parker, 1988]). Фактически, было обнаружено, что связанные со вспышками всплески излучения при достаточно высоком временном разрешении распадаются на множество более коротких по времени всплесков с продолжительностью от долей секунды до десятков секунд. После начала работы на орбите достаточно точных космических телескопов, первым из которых, вероятно, надо считать аппарат TRACE с угловым разрешением менее 1 угл. сек., в короне Солнца было обнаружено множество мелкомасштабных источников излучения размером часто ~ 1 пиксель. Данные источники, по общему согласию, были отождествлены именно с солнечными нановспышками (например, [Aschwanden et al., 2000]). Значительный интерес к событиям данного типа возник в связи с представлениями о том, что полная энергия нановспышек, несмотря на их малую индивидуальную мощность, может быть значительной и даже превосходить суммарную энергию обычных вспышек на Солнце. Существует даже возможность обеспечения таким способом нагрева короны Солнца (а по аналогии, и

звездных атмосфер), если рассматривать проблему нагрева короны как чисто энергетическую. Для последней задачи большое значение приобретает распределение нановспышек по энергиям, так как именно от его формы и наклона зависит полная энергия, заключенная в этих событиях. Многочисленные попытки измерить данное распределение на текущий момент приводят к противоречивым результатам. По некоторым данным, распределения нановспышек, которые обычно описываются степенным спектром $f \sim E^{-\phi}$, имеют наклон $\phi > 2$, что благоприятно для моделей нагрева короны данным механизмом, тогда как по другим данным наклон $\phi < 2$. Не исключено, что это связано с тем, что наклон спектра зависит от фазы солнечного цикла, что объясняет разные результаты разных авторов. При такой зависимости, впрочем, данные тоже расходятся. Так, авторы [Ульянов и др., 2019] показали, что наклон спектра различается вблизи минимума и максимума цикла, тогда как [Purkhart, Veronig, 2022] получили отсутствие зависимости наклона от фазы цикла (наклон менялся, но хаотично, без выраженной зависимости). Возможна также зависимость наклона спектра нановспышек от места, где проводятся измерения; в частности, для обычных вспышек хорошо известна зависимость их частоты и характеристик от гелиошироты. Наконец, частота и мощность нано-

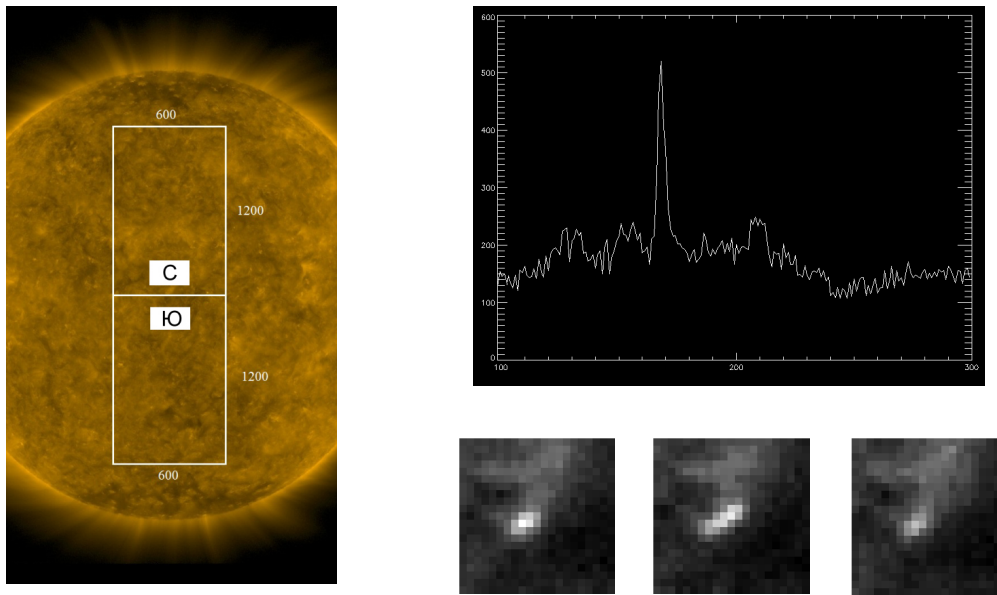


Рис. 1. Примеры исследованных фрагментов Солнца (слева) и обнаруженных нановспышек (справа)

Таблица 1

Серии без пятен для изучения нановспышек 2017–2020 гг.

№	Дата начала серии	Число дней
1	14.01.2017	131
2	01.02.2019	34
3	20.05.2019	37
4	26.11.2019	30
5	04.02.2020	35
6	24.08.2020	32

вспышек могут зависеть от величины фонового магнитного поля. Отметим, что все эти возможные зависимости на данный момент практически не исследованы.

Еще одним фактором, влияющим на результаты измерения нановспышек, являются методы выделения и измерения их характеристик. В отличие от обычных вспышек, потоки излучения от которых превышают фоновые потоки порой на несколько порядков величины, всплески излучения от нановспышек сравнимы с естественным (тепловым или фотонным) шумом регистрации. Поэтому результаты имеют чувствительность к методу обработки.

Мы представляем предварительные результаты исследований, направленных на улучшение методов регистрации нановспышек в короне Солнца, а также на изучение возможных зависимостей их частоты и распределения от времени (например, фазы цикла) и места регистрации.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования мы используем данные телескопа AIA на космическом аппарате SDO, полученные в канале 17.1 нм, где основным источником излучения является корона Солнца с температурой $T \sim 0.6$ млн. К. Поскольку нановспышки наиболее уверенно выделяются на фоне спокойной короны, мы выбрали несколько периодов предыдущего солнечного цикла, когда на диске Солнца отсутствовали

активные области (согласно каталогу NOAA). Соответствующие периоды приведены в табл. 1 (был изучен интервал времени 2017–2020 гг., приведены интервалы продолжительностью не менее 30 дней).

С целью исследования зависимостей распределений от гелиошироты, а также возможных асимметрий в северном и южном полушариях, мы исследуем протяженные участки, расположенные в обоих полушариях (рис. 1).

Для исследования выбирались интервалы времени продолжительностью 1 ч. Поскольку временное разрешение телескопов AIA составляет 12 с, каждая серия состояла из 300 изображений. Производилась компенсация за дифференциальное вращение Солнца, после чего измерялся сигнал в каждом пикселе $I(t)$. Далее для каждого пикселя измерялась разность между соседними кадрами $dI(t_i) = I(t_{i+1}) - I(t_i)$ и находилось ее среднеквадратичное отклонение σ . Для выделения нановспышек в текущем исследовании мы выбирали события по критерию разового роста излучения на величину не менее 3σ , которые затем анализировались более подробно.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование показало, что количество нановспышек, как и следовало ожидать, очень чувствительно к порогу, по которому производится отсечение событий от шума. В табл. 2 приведено количество событий для одного тестового фрагмента Солнца размером 400×200 пикселей, обнаруженное в течение часа.

Обращает на себя внимание, что падение числа событий с ростом порога происходит заметно медленнее, чем это можно ожидать в случае нормального распределения. Если для уровня 2σ доля событий примерно совпадает с ожидаемой для нормального распределения (если учесть, что мы выбираем события только по критерию $+2\sigma$), то далее она начинает превышать ожидаемую. Особенно значительные отклонения возникают при больших значениях порога.

Зависимость числа нановспышек от порога их отделения от шума

Порог	2σ	3σ	4σ	5σ	6σ	7σ	8σ
Число	528 852	41 689	2 925	474	231	132	87
Доля, %	2.2	0.17	0.012	0.0020	0.0096	0.00055	0.00036

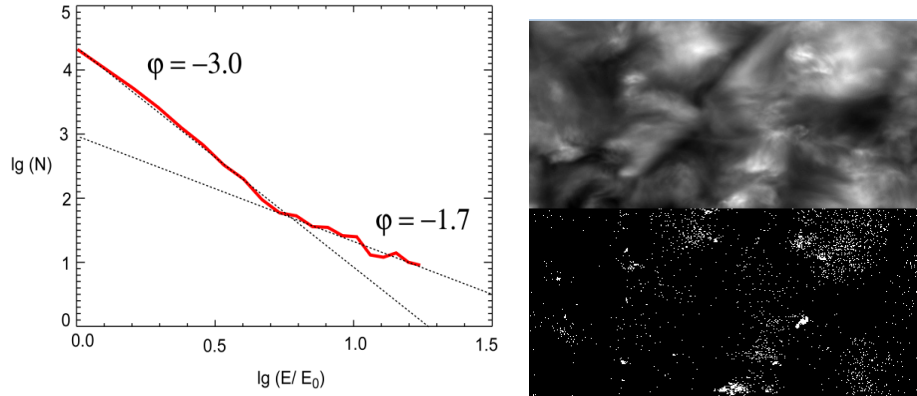


Рис. 2. Примеры распределения нановспышек по энергиям (слева) и по поверхности Солнца (справа; сверху — корона Солнца, внизу — нановспышки)

Мы объясняем это тем, что при любом способе детектирования нановспышки будут смешиваться с естественными статистическими отклонениями шума. При этом при низком пороге отсека должна доминировать естественная шумовая компонента, имеющая нормальное распределение. При росте порога, напротив, должны доминировать всплески излучения вспышек, распределение которых имеет иной характер (предположительно, степенной). В частности, если полагать, что при нормальном распределении за пределами $+3\sigma$ должны находиться 0.1 % событий, а мы измерили 0.17 %, можно сделать вывод, что около половины событий при таком пороге отсека являются нановспышками.

Распределения нановспышек, выявленные таким методом, имеют степенной спектр (рис. 2), однако во многих случаях наблюдается излом спектра: распределение на высоких энергиях является более пологим, чем на низких. Это может быть еще одной причиной неопределенности ранее полученных результатов: попытка привести спектр к одному наклону, без учета его возможной двухстепенной формы. Сравнение пространственного распределения нановспышек (справа на рис. 2) показывает его высокую корреляцию с обла-

стями повышенного магнитного поля. Здесь, однако, может играть роль более высокий уровень шума в более ярких областях, что приводит к зашумленности измерений. Соответственно, требуется более детальное исследование.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-22-00879.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ульянов А.С., Богачёв С.А., Рева А.А. и др. Распределение энергии нановспышек в минимуме и на фазе роста 24-го солнечного цикла. *Письма в АЖ*. 2019. Т. 45, № 4. С. 290–300.

Aschwanden M.J., Tarbell T.D., Nightingale R.W., et al. Time variability of the quiet Sun observed with TRACE. II. Physical parameters, temperature evolution, and energetics of extreme-ultraviolet nanoflares. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 535. P. 1047–1065.

Parker E.N. Nanoflares and the solar X-ray corona. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 330. P. 474–479.

Purkhart S., Veronig A.M. Nanoflare distributions over solar cycle 24 based on SDO/AIA differential emission measure observations. *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 661, id.A149.