

ТЕМП ФОРМИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ НАНОВСПЫШЕК В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

© 2023 г. С. А. Белов^{1,2,*}, Д. И. Завершинский^{1,2}, С. А. Богачев^{1,3}, Л. С. Леденцов^{1,4}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева, Самара, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

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

*E-mail: mr_beloff@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 26.09.2023 г.

Принята к публикации 23.10.2023 г.

Частота и темп формирования солнечных нановспышек (НВ) измерены в 6 корональных спектральных диапазонах (094, 131, 171, 193, 211, 335 Å) и одном, относящимся к переходному слою (304 Å). Были использованы данные SDO/AIA, полученные в минимуме солнечной активности в мае 2019 г. Мы проанализировали одну и ту же область Солнца размером $360'' \times 720''$ во всех каналах на протяжении интервала времени 1 ч. Для поиска НВ во всех спектральных диапазонах мы применили одинаковый алгоритм, основанный на анализе амплитуды быстрых уярчений на изображениях. Частота и темп НВ, как можно ожидать, существенно различаются в различных диапазонах. Для порога 5σ наибольшая частота НВ, 207 с^{-1} , измерена в канале 171 Å. Далее следуют спектральные диапазоны 193 Å (85% от канала 171 Å), 211 Å (74%) и 131 Å (63%). Мы не смогли достоверно измерить частоту в каналах 094 и 335 Å, но установили, что она составляет менее 15% от частоты в канале 171 Å. В канале 304 Å мы обнаружили большое число уярчений, которые не имеют соответствия в короне. Тем не менее около 40% корональных НВ имеют соответствие в линии 304 Å, с порогом выше 5σ .

Ключевые слова: солнечная корона, солнечная активность, нановспышки

DOI: 10.31857/S0004629923120010, **EDN:** DBLBOI

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные нановспышки (НВ) являются одними из самых слабых проявлений солнечной активности и имеют полную энергию от 10^{22} – 10^{24} до 10^{27} эрг. Вспышки с энергией выше 10^{27} эрг относят к микровспышкам, а события с энергией ниже 10^{22} эрг плохо наблюдаются из-за недостаточной чувствительности средств измерения (см., напр., [1]). Нановспышки можно наблюдать по производимому ими тепловому излучению в спектральных линиях вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона, которые соответствуют температуре 0.5–1.0 млн. К. В мягкой рентгеновской области спектра НВ практически не наблюдаются.

Впервые частота слабых вспышек на Солнце была, вероятно, измерена на станции Скайлаб в середине 1970-х гг. Во время наблюдений в короне были обнаружены так называемые яркие рент-

геновские точки со средним темпом формирования около 60 событий в час [2]. Радиационные потери энергии для каждого события были около 10^{28} эрг, что соответствует солнечным микровспышкам средней мощности. Слабые уярчения в спокойной короне Солнца с темпом около 1200 событий в час были обнаружены также прибором SXT на борту спутника Yohkoh при наблюдениях Солнца в рентгеновском диапазоне [3]. Характерная энергия этих событий составила 10^{26} эрг.

Большой объем информации о слабых вспышках был получен в конце 1990-х–начале 2000-х гг. при наблюдениях Солнца в ВУФ области спектра приборами SoHO/EIT [4] и TRACE [5]. Крюкер и Бенц [6] по данным SoHO/EIT в диапазонах 171 и 195 Å обнаружили в спокойной короне Солнца 11 150 событий с амплитудой, которая превышала среднюю вариацию излучения более чем на 3σ .

Таблица 1. Частота и темп формирования вспышек малых энергий в различных спектральных диапазонах

Прибор	Диапазон	Исследуемая область	Каденция, с	Порог	Частота, с ⁻¹	Темп, см ⁻² с ⁻¹	Работа
SoHO/EIT	304 Å	420" × 420"	66.5	3σ	14.4	~10 ⁻²¹	[7]
				5σ	0.30	~2 × 10 ⁻²³	
	195 Å		70.5	3σ	1.2	~8 × 10 ⁻²³	
				5σ	0	0	
TRACE	171 Å	510" × 510"	125	3σ	~100	~7 × 10 ⁻²¹	[8]
	195 Å			3σ	~25	~2 × 10 ⁻²¹	
SoHO/EIT	171 Å, 195 Å	420" × 420"	127.8	3σ	—	~2 × 10 ⁻²⁰	[6]
				5σ		~5 × 10 ⁻²¹	
TESIS/FET	171 Å	950" × 380"	4	3σ	—	~6 × 10 ⁻²¹	[10]
		700" × 700"	5				
SDO/AIA	094 Å, 131 Å	400" × 400"	12	5σ	—	~8 × 10 ⁻²¹	[12]
	171 Å, 193 Å						
	211 Å, 335 Å						

Примечание. Частоты вспышек приведены из соответствующих работ; темп вспышек оценен в рамках настоящей работы.

Они предложили использовать данный критерий для поиска НВ. Бергманз и др. [7] сравнили число вспышек, обнаруженных по критерию 3σ и 5σ, в двух каналах SoHO/EIT (304 и 195 Å). В канале 304 Å они нашли 9187 НВ для критерия 3σ и 188 НВ для критерия 5σ, что соответствует частоте НВ 14.4 и 0.3 с⁻¹ соответственно. В канале 195 Å они не обнаружили ни одного события по критерию 5σ. Ашванден и др. [8] обнаружили 3131 события в канале TRACE 171 Å и 904 события в канале TRACE 195 Å, что соответствует частоте около 100 с⁻¹ в канале 171 Å и около 25 с⁻¹ в канале 195 Å. Парнелл и Джапп [9] по данным TRACE нашли в поле зрения 420" × 420" 11 712 событий по критерию 5σ.

В 2009 г. Ульянов и др. [10] измерили энергию более 100 тысяч НВ в канале 171 Å по данным прибора ТЕСИС на космическом аппарате КОРОНАС-Фотон. Исходя из их данных, темп формирования НВ в данном диапазоне составил ~6 × 10⁻²¹ см⁻² с⁻¹ для энергий 10²³–10²⁵ эрг.

Возможности по исследованию солнечных вспышек малых энергий значительно выросли после начала работы инструмента AIA [11] на борту обсерватории SDO. Инструмент предоставил возможность исследовать Солнце в 7 спектральных диапазонах ВУФ, относящихся к короне и переходному слою Солнца. В работе [12], используя данные AIA, был измерен полный темп энерговыделения солнечных нановспышек в диапазоне энергий от 10²⁴ до 10²⁹ эрг, который составил

3.7 × 10⁴ эрг см⁻² с⁻¹. Частота формирования НВ не измерялась.

В табл. 1 мы собрали основные сведения о темпе формирования НВ, полученные ранее. Кроме частоты НВ (количество событий в секунду) мы приводим также темп формирования НВ (количество событий в секунду на см²). Данные параметры позволяют при известной средней энергии события оценить суммарный поток энергии, вносимый обнаруженными событиями. В некоторых работах частота НВ не приведена авторами непосредственно, но может быть рассчитана на основе их данных. В этих случаях мы приводим собственные оценки.

Согласно наблюдениям, частота и темп НВ различаются для разных спектральных диапазонов. В частности, НВ, судя по всему, формируют более интенсивное излучение в диапазоне 171 Å, чем в диапазоне 193–195 Å. В некоторых спектральных диапазонах НВ могут не наблюдаться, либо иметь низкую частоту. Так, в работе [12] при исследовании НВ был исключен канал 304 Å. В работе [13] были исключены каналы 304 и 94 Å (последний по мнению авторов имеет слишком низкое отношение сигнал/шум в спокойной короне). Однако количественное сравнение темпа солнечных НВ в различных спектральных диапазонах на настоящий момент отсутствует.

В данной работе мы сравниваем темп солнечных нановспышек в семи спектральных диапазонах AIA: 094, 131, 171, 193, 211, 304 и 335 Å, используя общую процедуру обработки данных и общий критерий поиска нановспышек для всех каналов.

Мы провели исследование для двух критериев поиска: 3σ и 5σ . В разделе 2 мы перечисляем использованные данные наблюдений и излагаем метод их обработки. В разделе 3 мы представляем и обсуждаем результаты. Последний раздел содержит краткие выводы из исследования.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Мы использовали в работе данные телескопа AIA (Atmospheric Imaging Assembly [11]), размещенного на борту космической обсерватории SDO (Solar Dynamics Observatory). AIA состоит из 4 телескопов, которые получают изображения полного диска Солнца размером 4096×4096 пикселей с разрешением $0.6''$ на пиксель. Временной шаг наблюдений составляет 12 с. AIA может проводить измерения в 10 спектральных диапазонах, из которых мы выбрали 7 каналов, относящихся к ВУФ диапазону. Перечень каналов и их основные характеристики приведены в табл. 2.

Измерения проводились по данным AIA, полученным с 12:00 до 13:00 UT (продолжительность 1 ч) 20 мая 2019 г. в период низкой солнечной активности. Мы использовали данные, находящиеся в открытом доступе в базе данных JSOC (Joint Science Operations Center). Так как временной шаг наблюдений AIA составляет 12 с, то число изображений в каждом канале было равно 300 (полное число изображений — 2100). Размер каждого изображения в байтах составляет 32 Мбайт. Общий объем данных — 65.6 Гбайт. Чтобы уменьшить время машинной обработки, мы искали НВ не на всем диске Солнца, а внутри фрагмента размером 600×1200 пикселей вблизи центра диска (см. рис. 1). Фрагмент смещен вниз относительно экватора, чтобы полностью покрыть диапазон широт, где происходят вспышки (в данной работе от 0° до $\sim 45^\circ$). В качестве фонового изображения на рис. 1 использован первый кадр в диапазоне $171 \text{ \AA}$ (2019.05.20 12:00:10 UT).

На рис. 2 показаны примерно одновременные изображения Солнца во всех 7 исследованных диапазонах: 094, 131, 171, 193, 211, 304 и $335 \text{ \AA}$ (фактическое время наблюдений в разных каналах AIA может различаться на несколько секунд). Для всех каналов приведены первые изображения, полученные около 12:00 UT. На графике в нижнем правом углу рис. 2 показан интегральный поток излучения для каждого канала с 12:00 до 13:00 UT (для выбранного фрагмента диска). Рисунок подтверждает, что в течение исследованного периода отсутствовали даже минимальные изменения полного излучения, связанные с солнечной активностью. Можно также заключить, что ни в одном из диапазонов нельзя обнаружить НВ по наблюдению интегрального излучения Солн-

Таблица 2. Каналы AIA, использованные в работе

Канал AIA	Основной ион	Типичная T , $\lg T$, К
094	Fe XVIII	6.8
131	Fe XX	7.0
171	Fe IX	5.8
193	Fe XII	6.1
211	Fe XIV	6.3
304	He II	4.7
335	Fe XVI	6.4

ца или его отдельных областей. Наиболее сильное излучение спокойной короны Солнца наблюдается в каналах 171 и $193 \text{ \AA}$. Самое слабое излучение (в среднем менее 1 отсчета на пиксель) было зарегистрировано в каналах 094 и $335 \text{ \AA}$.

Изображения AIA, полученные из базы JSOC, имели уровень обработки 1.1. Это означает, в числе прочего, что с изображений уже были удалены следы заряженных частиц. Далее изображения были обработаны нами до уровня 1.5. Для обработки использовался пакет программ aiary [14] на языке Python, предназначенный для анализа данных AIA. Обработка включала изменение масштаба (все данные были приведены к масштабу $0.6''$ на пиксель), совмещение центрального меридиана Солнца и оси Y изображения, а также приведение всех изображений к одному времени экспозиции, 1 с. Мы также устранили сдвиг изображений в направлении X из-за дифференциального вращения Солнца с помощью методов из библиотеки SunPy [15] (смещение изображения AIA в центре солнечного диска за час наблюдений составляет чуть больше 16 пикселей).

Ниже мы описываем метод поиска НВ на изображениях, который был одинаковым для всех каналов:

1. Мы преобразуем серию изображений в каждом канале в массив данных $D(x, y, i)$, где x, y — координаты пикселя (x меняется от 0 до 599; y меняется от 0 до 1199), а i — номер изображения (от 0 до 299). Полное число пикселей составляет 720000 в каждом канале.

2. Для каждого пикселя (x, y) , мы определяем зависимость интенсивности излучения от времени:

$$I_{xy}(t) = D_k(x, y, i = 0 \dots 299).$$

Пример графика $I_{xy}(t)$ для канала $171 \text{ \AA}$ показан на панели А рис. 3 (координаты пикселя: $x = 212$, $y = 7$).

3. Мы рассчитываем фоновый сигнал $C_{xy}(t)$. Для этого мы применяем к функции $I_{xy}(t)$

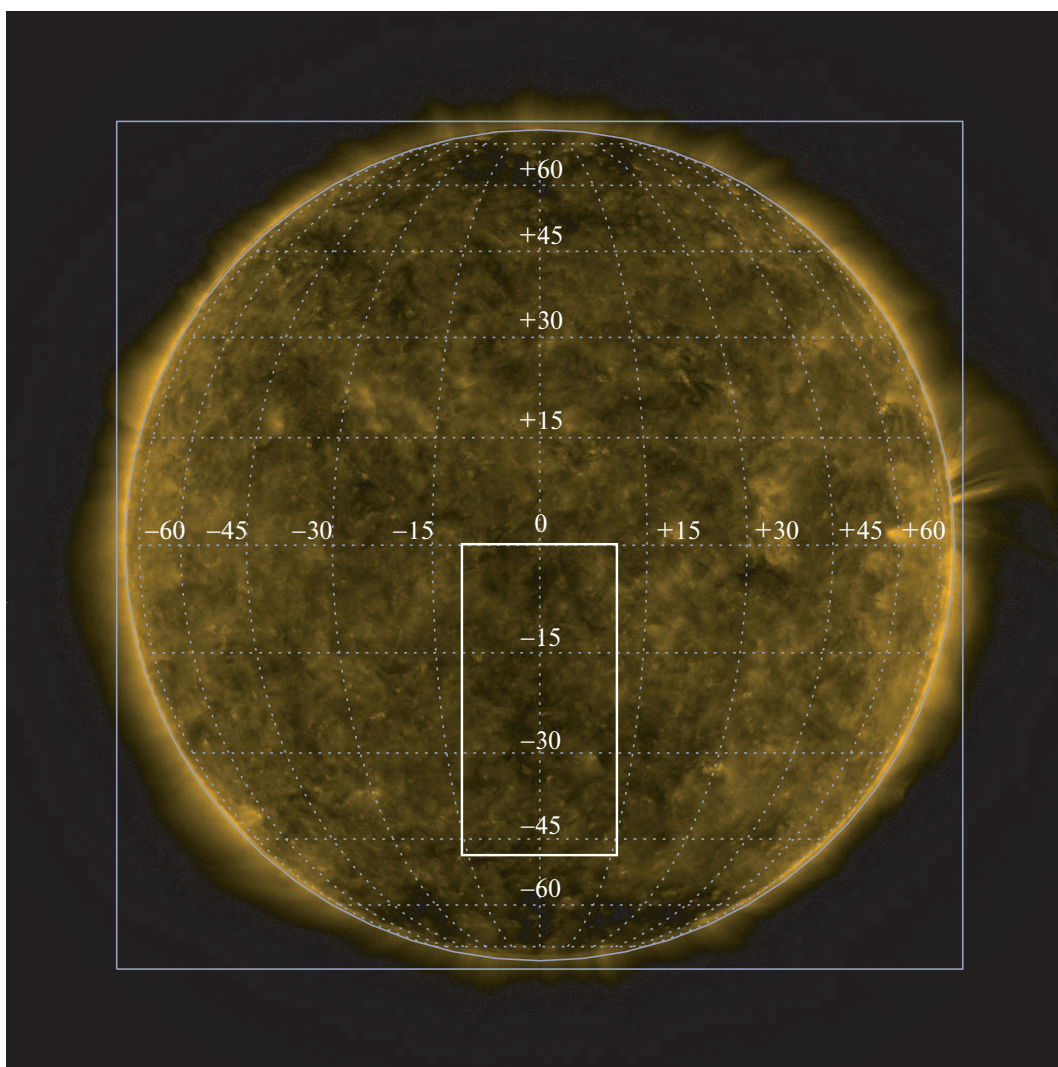


Рис. 1. Солнце в канале $171 \text{ \AA}$ 20.05.2019 в 12:00:10 UT (первое изображение в соответствующей серии). Белый прямоугольник — область поиска НВ (600×120 пикселей; $360'' \times 720''$).

медианный фильтр с размером ядра $\Delta t = 300$ с (25 кадров):

$$C_{xy}(t) = \text{MEDIAN}(I_{xy}(t), \Delta t = 300 \text{ с}).$$

Функция $C_{xy}(t)$ (также показана на панели А рис. 3) соответствует излучению спокойной короны Солнца в пикселе (x, y) . Размер ядра позволяет исключить быстрые изменения излучения с характерными временами, меньшими 300 с, что покрывает предполагаемый диапазон длительностей нановспышек. Отметим также, что такой же размер фильтра был использован ранее в работе [10].

4. Мы вычитаем фоновый сигнал,

$$I_{xy}(t) \rightarrow I_{xy}(t) - C_{xy}(t),$$

и находим среднее квадратичное отклонение σ_{xy} для пикселя xy . Временной профиль излучения после вычитания фона и уровень 1σ для канала $171 \text{ \AA}$ показаны на панели В рис. 3. Следует отметить, что вычитание фонового сигнала позволяет сосредоточиться на быстрых по сравнению с размером ядра изменениях излучения.

5. Если для локального максимума t_m на графике $I_{xy}(t)$ выполняется условие

$$I_{xy}(t_m) \geq n\sigma_{xy},$$

где n — выбранный критерий (мы используем $n = 3$ и $n = 5$), то точка t_m считается максимумом нановспышки.

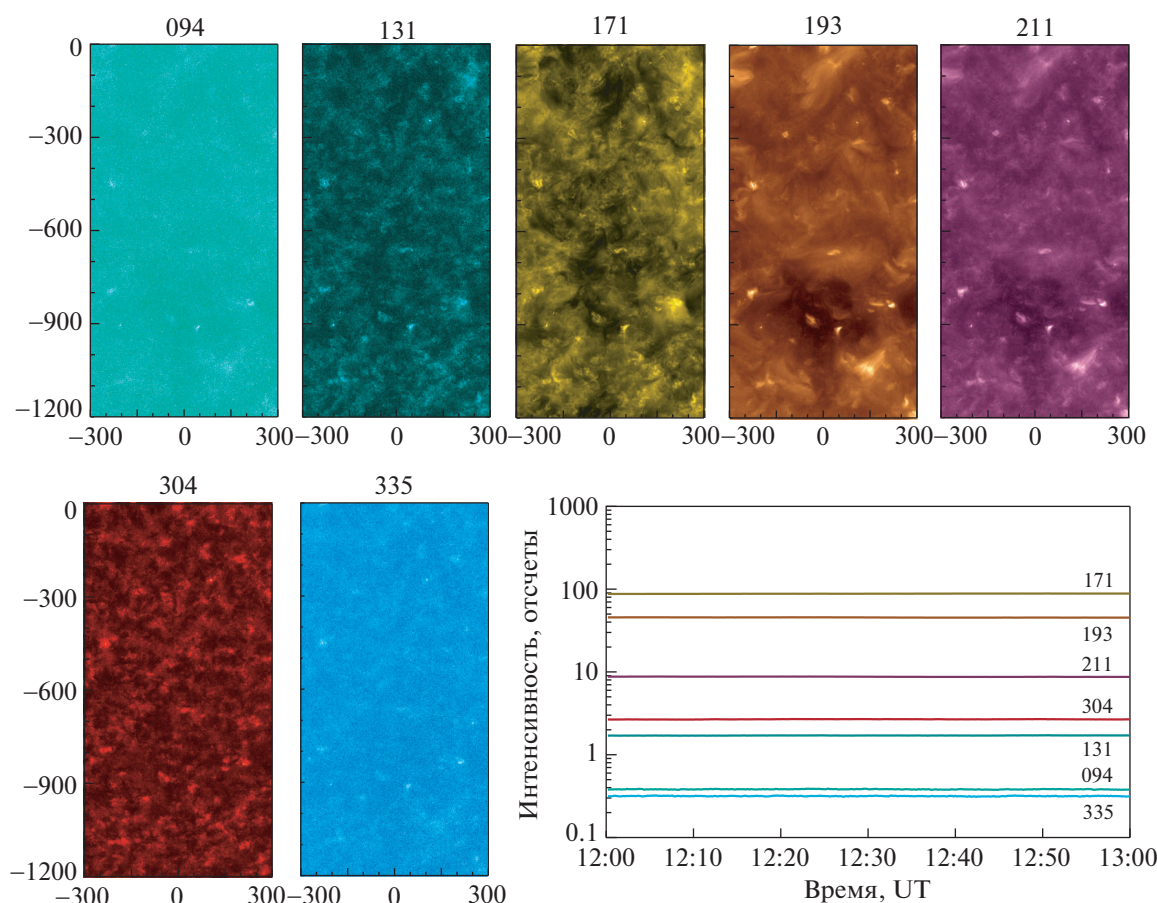


Рис. 2. Фрагмент Солнца (соответствует белому прямоугольнику на рис. 1) в 7 спектральных диапазонах SDO/AIA. График — изменение интегрального потока излучения из фрагмента в течение времени наблюдений (с 12:00 по 13:00 UT).

5. В качестве начала НВ мы принимаем первую точку t_s , слева от максимума t_m , которая ниже, чем две следующие:

$$I_{xy}(t_s) < \begin{matrix} I_{xy}(t_{s-1}); \\ I_{xy}(t_{s-2}). \end{matrix}$$

Аналогично, в качестве окончания НВ принимается первая точка t_e , справа от максимума t_m , которая ниже, чем две следующие:

$$I_{xy}(t_e) < \begin{matrix} I_{xy}(t_{e+1}); \\ I_{xy}(t_{e+2}). \end{matrix}$$

Время начала и окончания НВ, определенное таким способом, показано на панели В рис. 3. Найденный профиль НВ выделен красным цветом.

На панелях С–Н рис. 3 приведены одновременные профили излучения в остальных спектральных диапазонах. Можно сделать вывод, что по критерию 5σ данная НВ наблюдалась в двух спектральных диапазонах: 171 и 304 Å. По крите-

рию 3σ вспышка наблюдалась во всех диапазонах, кроме 131, и 335 Å.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы использовали процедуру, описанную в разделе 2, чтобы обработать данные, полученные во всех 7 спектральных диапазонах. Результаты (число НВ в каждом диапазоне для порога 3σ и 5σ) приведены в табл. 3.

Если шум на изображении имеет нормальное распределение по амплитуде, то вероятность роста излучения выше порога $+n\sigma$ может быть определена по формуле:

$$p = \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right)}{2}. \quad (1)$$

Для $n = 3$ $p \approx 1.35 \times 10^{-3}$. Для $n = 5$ $p \approx 2.98 \times 10^{-7}$. Так как полное число пикселей в кубе данных $D(x, y, i)$ равно $N_p = 1200 \times 600 \times 300 = 2.16 \times 10^8$, то в каждом канале за время наблюдения могло

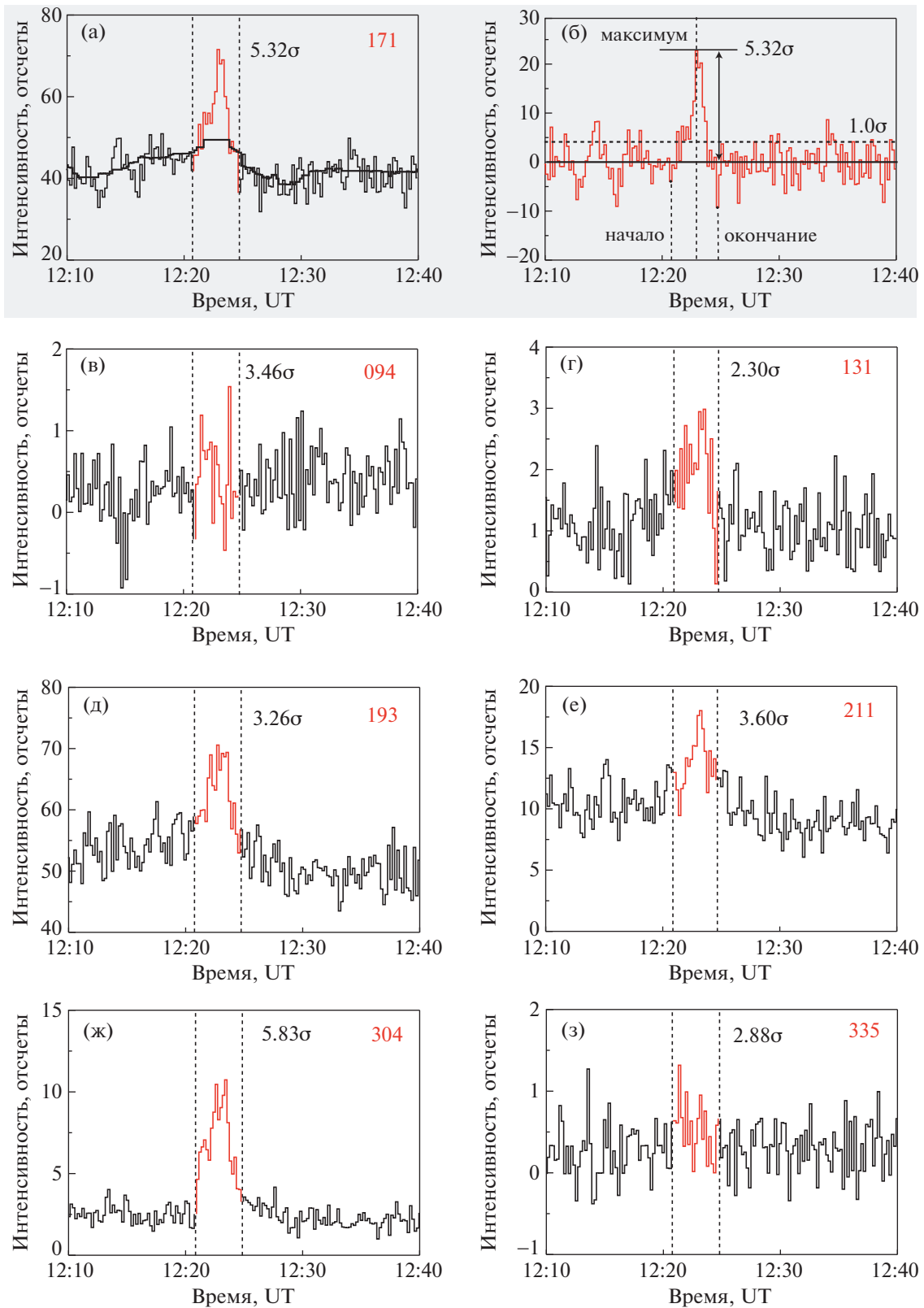


Рис. 3. Все панели, кроме В: поток излучения из пикселя $x = 212$; $y = 7$ в семи каналах SDO/AIA в течение времени наблюдений. Панель В: то же, что панель А, но после обработки данных (см. раздел 2). Пунктиром на всех рисунках отмечена продолжительность вспышки, измеренная по каналу 171 Å.

Таблица 3. Число НВ в разных спектральных диапазонах

Канал	094 Å	131 Å	171 Å	193 Å	211 Å	304 Å	335 Å
$\hat{N}_3$	490255	633678	550710	546919	569903	665981	478748
N_3	198677	342100	259132	255341	278325	374403	187170
$\hat{N}_5$	3105	12329	19668	16791	14504	25824	2940
N_5	3040	12264	19603	16726	14439	25759	2875
N_3/N_5	65.3	27.9	13.2	15.3	19.3	14.5	65.1
N_3/N_{171}	0.77	1.32	1.00	0.99	1.07	1.44	0.72
N_5/N_{171}	0.16	0.63	1.00	0.85	0.74	1.31	0.15

Примечание. $\hat{N}_3, \hat{N}_5$ — полные, а N_3, N_5 — скорректированные числа НВ для порогов 3σ и 5σ ; $N_3/N_{171}, N_5/N_{171}$ — отношения N_3 и N_5 к числу НВ в канале 171 Å для порогов 3σ и 5σ .

быть зарегистрировано 291 578 случайных уярчений выше порога 3σ и 65 уярчений выше порога 5σ . Принимая это во внимание, мы скорректировали число НВ, уменьшив его на вероятное число случайных уярчений. Для порога 3σ число случайных событий составляет от 40 до 60%, в зависимости от спектрального диапазона. Для порога 5σ случайные события составляют около и менее 1%.

Как можно заключить из литературы, каналы 171 Å и 193 Å наиболее часто используются для наблюдения спокойной короны Солнца и поиска солнечных нановспышек. Результаты в табл. 3, полученные для критерия 5σ , подтверждают эту идею. Канал 171 Å имеет наибольший темп формирования НВ среди спектральных диапазонов, относящихся к короне Солнца (все, кроме 304 Å). На втором месте находится канал 193 Å, темп формирования НВ в котором составляет 85% от канала 171 Å. На третьем месте канал 211 Å — 74%.

Согласно табл. 3, в каналах 094 и 335 Å для порога 3σ темп формирования НВ является неожиданно высоким — более 70% от канала 171 Å. Если увеличить порог до 5σ , темп резко уменьшается — до 15–16%. График в правом нижнем углу рис. 2 показывает, что общей особенностью каналов 094 и 335 Å является очень слабый сигнал — в среднем менее 1 отсчета на пиксель на 1 кадр. Мы полагаем, что при такой слабой интенсивности излучения среднеквадратичное отклонение σ не может быть корректно определено. По этой причине методы поиска НВ, основанные на анализе σ , дают некорректный результат. При переходе от 3σ к 5σ доля артефактов в каналах уменьшается, и результаты становятся более правдоподобными. Мы, однако, не вносили никаких изменений для слабых каналов, так как полагали важным сохранить единый способ обработки данных для всех спектральных диапазонов.

Необычным выглядит также высокий темп формирования НВ в канале 304 Å (140% от канала 171 Å). Интенсивное излучение в данном спек-

тральном диапазоне формируется при температуре порядка 50 тыс. К (см. табл. 2), которая соответствует не короне, а переходному слою между короной и хромосферой Солнца. По этой причине данный диапазон обычно не используют для поиска НВ, и большое число событий в нем выглядит неожиданным. Мы обсудим ниже причины данного противоречия.

Для определения темпа P (событий в секундах на см^2) и частоты F (событий в секундах) формирования НВ мы использовали формулы:

$$P = \frac{N}{S\Delta t}, \quad (2)$$

$$F = 4\pi R_s^2 P, \quad (3)$$

где N — число НВ, $\Delta t = 3600$ с — продолжительность наблюдений, $R_s = 6.96 \times 10^{10}$ см — радиус Солнца и S — площадь исследованного фрагмента Солнца, которую мы вычислили как:

$$S \approx 8.24 \times 10^5 \text{ пикс}^2 = 1.60 \times 10^{21} \text{ см}^2.$$

Результаты, частота и темп формирования НВ в различных диапазонах, показаны в табл. 4. Мы не обсуждаем отношения этих величин в разных каналах, так как они такие же, как соотношения между числом вспышек в табл. 3.

Темп формирования НВ для всех 7 спектральных диапазонов для порога 5σ показан также на рис. 4.

Согласно предыдущим исследованиям, солнечные НВ часто наблюдаются в нескольких спектральных диапазонах. Так, существует несколько работ, где НВ совместно наблюдались и исследовались в каналах 171 и 193 Å (напр., [6, 8]). Чтобы подтвердить или опровергнуть это, мы определили для каждого канала долю НВ, которая одновременно наблюдалась в каких-либо иных спектральных диапазонах. Мы считали, что НВ наблюдается в двух диапазонах, если выполняются три условия: (1) НВ произошли в одном

Таблица 4. Частоты и темп формирования НВ в разных спектральных диапазонах

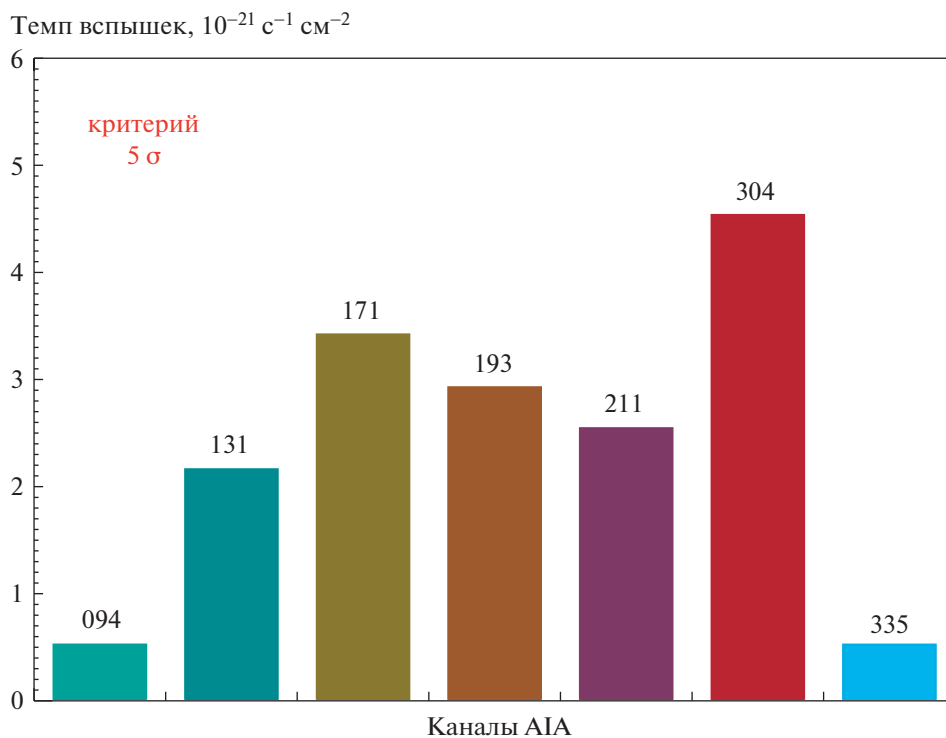
Канал	Частота, с^{-1}		Темп, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	
	F_3	F_5	P_3	P_5
094 Å	2101	32	3.5×10^{-20}	5.3×10^{-22}
131 Å	3618	129	5.9×10^{-20}	2.1×10^{-21}
171 Å	2741	207	4.5×10^{-20}	3.4×10^{-21}
193 Å	2701	176	4.4×10^{-20}	2.9×10^{-21}
211 Å	2944	152	4.8×10^{-20}	2.5×10^{-21}
304 Å	3960	272	6.5×10^{-20}	4.5×10^{-21}
355 Å	1979	30	3.3×10^{-20}	5.0×10^{-22}

Примечание. F_3 , F_5 — частоты формирования НВ для порогов 3σ и 5σ (вся поверхность Солнца); P_3 , P_5 — темпы формирования НВ для порогов 3σ и 5σ .

или соседних пикселях; (2) их временные интервалы пересекаются; (3) оба события превышают в максимуме порог 5σ . Результаты исследования приведены на рис. 5. Для каждого канала показана доля НВ, которая имеет соответствие в другом канале, удовлетворяющее перечисленным выше трем условиям. Так как одна НВ может иметь соответствия в нескольких диапазонах, то сумма по строкам и столбцам таблицы превышает 100%.

Результаты показывают высокую взаимную корреляцию четырех каналов: 171, 193, 211 и 131 Å. Для каналов 094 и 355 Å только около 20% событий имеют соответствие хотя бы в одном ином спектральном диапазоне. Большинство событий, около 80%, являются одиночными. Так как мы не можем вообразить НВ, которая наблюдалась бы только в высокотемпературных спектральных диапазонах (например, 094 Å) без низкотемпературного соответствия (например, в 171 Å), мы полагаем, что даже при пороге 5σ большинство событий в каналах 094 и 355 Å являются артефактами. Для корректного определения числа НВ в этих диапазонах требуется существенное изменение метода обработки данных.

Темп НВ, измеренный в каналах 171 Å ($3.4 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$) и 193 Å ($2.9 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$), находится в общем согласии с результатами других авторов для этих диапазонов (см., напр., табл. 1). Точное совпадение результатов, вероятно, невозможно из-за проведения измерений разными приборами с разным динамическим диапазоном, разным отношением сигнала к шуму, а также разным временным разрешением. Кроме того, существуют не до конца понятные вариации частоты НВ на разных стадиях цикла [12] и даже разница между северным и южным полушариями Солнца [16]. Зависимость темпа НВ от солнечной широ-

**Рис. 4.** Измеренный темп солнечных НВ в семи каналах AIA/SDO (порог 5σ).

	094	131	171	193	211	304	335
094	—	7.7%	8.2%	8.2%	7.7%	7.9%	3.9%
131	3.5%	—	42.4%	38.4%	36.1%	27.6%	5.6%
171	3.1%	44.4%	—	52.1%	44.7%	35.2%	4.7%
193	3.4%	43.1%	57.3%	—	55.0%	38.6%	5.1%
211	3.5%	40.7%	50.3%	55.6%	—	35.8%	6.4%
304	1.6%	15.7%	22.9%	23.2%	21.0%	—	2.4%
335	3.8%	10.9%	11.3%	11.2%	11.6%	11.0%	—
нет	79.9%	47.7%	31.9%	27.6%	31.5%	63.5%	78.2%

	Более 50%		Более 40%
	Более 30%		Менее 10%

Рис. 5. Доля НВ в канале AIA (левый столбец), имеющих соответствие в другом канале AIA (верхняя строка) с амплитудой не менее 5σ . Цветовое выделение ячеек соответствует разным значениям (см. пояснение на рисунке).

ты при этом отсутствует или является очень слабой [17]. Потери энергии короной имеют темп $\sim 10^5 - 5 \times 10^6$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для того чтобы компенсировать эти потери, необходимо, чтобы средняя энергия, выделившаяся в обнаруженных нановспышках, например, в канале 171 Å, была в диапазоне $10^{26} - 10^{27}$ эрг.

Мы считаем важным отметить необычные результаты для канала 304 Å. Около 40% найденных здесь событий имеют соответствия в корональных спектральных диапазонах: 171, 193, 211 и 131 Å. Но более 60% уярчений не имеют соответствий, т.е. наблюдаются только в переходной области Солнца без роста излучения в короне. Мы полагаем, что мы наблюдаем здесь сумму двух типов событий: хромосферных (например, бомб Эллермана), которые составляют наибольшую часть найденных уярчений, и корональных событий, т.е. излучения низкотемпературной компоненты НВ. Значительный вклад хромосферных событий может объяснить высокий темп НВ в канале 304 Å в табл. 3 и на рис. 4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы использовали данные SDO/AIA, чтобы сравнить частоту и темп формирования солнечных нановспышек в 7 спектральных диапазонах, относящихся к короне (094, 131, 171, 193, 211, 335 Å) и переходному слою (304 Å) Солнца. Для поиска НВ мы использовали метод, основанный

на сравнении амплитуды излучения с заданным порогом (в нашей работе — 3σ и 5σ). Ранее похожая идея использовалась во многих работах (см., напр., список в табл. 1). Конкретная реализация нашего метода, как мы полагаем, наиболее близка к работе [10].

Наиболее высокая частота НВ для порога 5σ обнаружена в каналах 171 Å (207 с^{-1} на всей поверхности Солнца; 100%), 193 Å (85%), 211 Å (74%) и 131 Å (63%). Для каналов 094 и 335 Å, метод, вероятно, дает некорректные результаты из-за низкого сигнала. Мы можем заключить, что частота НВ в этих каналах не превышает 15–16% от канала 171 Å, но, вероятно, еще ниже, чем это значение.

Мы обнаружили значительное число уярчений в канале 304 Å, большинство из которых, более 60%, однако, локализованы в переходном слое и не имеют соответствия в короне. Тем не менее низкотемпературная компонента в линии 304 Å обнаруживается в 30–40% корональных НВ, наблюдающихся в линиях 171, 193 и 211 Å. Отсюда мы полагаем, что линия 304 Å должна учитываться при многотемпературном анализе НВ, но не может использоваться для поиска нановспышек.

Мы рассчитываем, что полученные результаты могут быть полезны при выборе оптимальных спектральных диапазонов для исследования НВ, а также для интерпретации результатов наблюдений НВ в различных каналах SDO/AIA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 22-22-00879).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *S. A. Bogachev, A. S. Ulyanov, A. S. Kirichenko, I. P. Loboda, and A. A. Reva*, *Physics Uspekhi* **63**, 783 (2020).
2. *L. Golub, A. S. Krieger, J. K. Silk, A. F. Timothy, and G. S. Vaiana*, *Astrophys. J.* **189**, L93 (1974).
3. *S. Krucker, A. O. Benz, L. W. Acton, and T. S. Bastian*, *Astrophys. J.* **488**, 499 (1997).
4. *J. P. Delaboudiniere, G. E. Artzner, J. Brunaud, A. H. Gabriel, et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
5. *B. N. Handy, L. W. Acton, C. C. Kankelborg, C. J. Wolfson, et al.*, *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).
6. *S. Krucker and A. O. Benz*, *Astrophys. J.* **501**, L213 (1998).
7. *D. Berghmans, F. Clette and D. Moses*, *Astron. and Astrophys.* **336**, 1039 (1998).
8. *M. J. Aschwanden, R. W. Nightingale, T. D. Tarbell, and C. J. Wolfson*, *Astrophys. J.* **535**, 1027 (2000).
9. *C. E. Parnell and P. E. Jupp*, *Astrophys. J.* **529**, 554 (2000).
10. *A. S. Ulyanov, S. A. Bogachev, A. A. Reva, A. S. Kirichenko, and I. P. Loboda*, *Astron. Letters* **45**, 248 (2019).
11. *J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, et al.*, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
12. *S. Purkhart and A. M. Veronig*, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A149 (2022).
13. *V. Joulain, E. Buchlin, J. Solomon, and C. Guennou*, *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A148 (2016).
14. *W. T. Barnes, M. C. M. Cheung, M. G. Bobra, P. Boerner, et al.*, *J. Open Source Software* **5**(55), 2801 (2020).
15. *W. T. Barnes, M. G. Bobra, S. D. Christe, N. Freij, et al.*, *Astrophys. J.* **890**(1), id. 68 (2020).
16. *S. A. Bogachev*, *Geomagnetism and Aeronomy* **64**, 441 (2023).
17. *D. I. Zavershinskii, S. A. Bogachev, S. A. Belov, and L. S. Ledentsov*, *Astron. Letters* **48**, 550 (2022).

RATE OF SOLAR NANOFLARES IN DIFFERENT SPECTRAL RANGES

S. A. Belov^{a,b}, D. I. Zavershinskii^{a,b}, S. A. Bogachev^{a,c}, and L. S. Ledentsov^{a,d}

^a*Samara National Research University, Samara, Russia*

^b*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

The frequency and rate of solar nanoflares (NF) were measured in 6 coronal spectral ranges (094, 131, 171, 193, 211, 335 Å) and one, related to the transition layer (304 Å). We used SDO/AIA data obtained at solar minimum in May 2019. We analyzed the same region of the Sun, covering 360'' × 720'' field-of-view, in all channels over the same time interval of 1 hour. In all the spectral bands, to search for NF we applied the same algorithm based on the amplitude analysis of fast brightenings in AIA images. The frequency and rate of NF, as can be expected, vary significantly in different wavelengths. For threshold 5σ, the highest NF frequency, 207 c⁻¹, was measured in 171 Å. The next spectral ranges are 193 Å (85% of 171 channel), 211 Å (74%), and 131 Å (63%). We have not been able to reliably measure the frequency in channels 094 Å, and 335 Å, but found that it is less than 15% of the frequency in channel 171 Å. In the 304 Å channel, we found a large number of brightenings that do not match any coronal events. However, about 40% of NF in corona have a counterpart in the 304 Å line with an amplitude higher than 5σ.

Keywords: solar corona, solar activity, nanoflares