

УДК 523.985

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОВСПЫШЕК В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. С. А. Богачёв*

*Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
Москва, Россия*

**e-mail: bogachev.sergey@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Мы используем данные телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на космическом аппарате Solar Dynamics Observatory (SDO) в канале 171 Å, чтобы исследовать пространственное распределение вспышек малой энергии (нановспышек). Мы исследовали два периода: 20.05.2019 с 12:00 UT до 13:00 UT и 10.05.2020 с 12:00 UT до 13:00 UT. Всего нами было найдено 87974 нановспышки со средним темпом формирования $6.0 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для солнечных широт от 0° до 50° темп формирования нановспышек является примерно равномерным со среднеквадратичным отклонением около 25%. Нами обнаружена асимметрия в темпе формирования нановспышек в южном и северном полушариях Солнца: темп формирования нановспышек в южном полушарии был на 34–42% больше, чем в северном. В этот период такая же асимметрия наблюдалась и для обычных вспышек. Мы также обнаружили слабую зависимость темпа формирования нановспышек от солнечного цикла: число нановспышек растет при более высокой активности Солнца.

DOI: 10.31857/S0016794023600230, EDN: OJWAJX

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки являются одним из основных проявлений солнечной активности. Хотя механизм вспышек все еще является дискуссионным, есть общее согласие, что источником их энергии является магнитное поле Солнца, точнее свободная (непотенциальная) компонента поля, связанная с токами. Исходя из таких представлений, места формирования вспышек должны примерно совпадать с областями более сильного магнитного поля и с группами солнечных пятен, что, действительно наблюдается (см. например, [Abdel-Sattar et al., 2018] для обычных вспышек и [Kirichenko and Bogachev, 2017] для микровспышек).

В пространственном распределении обычных вспышек можно обнаружить различные особенности, в том числе их неоднородное распределение вдоль солнечной широты (пояса активности). Известно, что напряженность и поток магнитного поля Солнца на низких широтах, как правило, выше, чем вблизи полюсов. Так, в работе [Howard, 1974] был проанализирован период с 1967 по 1973 гг. и показано, что 95% магнитного потока в обоих полушариях Солнца находится в диапазоне широт от 0° до 40° . Так как вспышки формируются в областях сильного поля, то в их распределении также наблюдается максимум приблизительно

но в этом же диапазоне (точное положение зависит от фазы солнечного цикла; см., например, [Pandey et al., 2015]).

Вопрос о наличии или отсутствии таких особенностей в распределениях более слабых событий энерговыделения (микровспышек и, так называемых, нановспышек) пока недостаточно изучен, что связано, в числе прочего, с трудностью регистрации таких событий. Ниже в табл. 1 перечислены некоторые работы, в рамках которых проводились статистические исследования большого числа нановспышек. В ходе этих работ был с достаточно высокой точностью измерен средний темп формирования нановспышек, а также их энергетическое распределение. В то же время вопросы пространственного распределения нановспышек практически не исследовались. Характерное число исследованных событий в данных работах составляло несколько тысяч.

Существенно большее число событий (более 100 тысяч) было изучено в работе [Ulyanov et al., 2019]. Исследованные ими фрагменты Солнца, однако, были небольшими, и не позволяли сделать вывод о пространственном распределении нановспышек и его зависимости от солнечной широты.

Таблица 1. Основные работы по исследованию солнечных нановспышек с 1998 по 2022 год

Работа	Прибор (канал)	Диапазон энергий, эрг	Число событий
Berghmans et al. [1998]	EIT (304, 195)	$10^{24}–10^{27}$	9187
Krucker and Benz [1998]	EIT (171/195)	$10^{25}–10^{27}$	11 150
Aschwanden et al. [2000]	TRACE (171/195)	$10^{24}–10^{26}$	281
Parnell and Jupp [2000]	TRACE (171, 195)	$10^{23}–10^{26}$	4497
Aschwanden and Parnell [2002]	TRACE (171, 195)	$10^{25}–10^{27}$	436
Ulyanov et al. [2019]	AIA (171)	$10^{23}–10^{26}$	107 075

Подробное исследование нановспышек было проведено Purkhart and Veronig [2022]. Авторы обработали 30 фрагментов Солнца размером $400'' \times 400''$ с 2011 по 2018 гг. и определили средний темп их формирования и энергетический спектр нановспышек на разных стадиях солнечного цикла. Ими было отмечено, что места формирования нановспышек коррелируют с областями более сильного магнитного поля. Однако выводы о наличии или отсутствии зависимости между темпом формирования нановспышек и солнечной широтой не делались.

Zavershinskii et al. [2022], предложили новый подход к детектированию нановспышек, который не позволяет измерять энергию нановспышек, но дает возможность оценить их полное число на выбранных участках солнечного диска. В качестве демонстрации возможностей метода ими был обработан достаточно большой фрагмент Солнца и, в числе прочего, было отмечено, что в пространственном распределении нановспышек не обнаружено выраженного максимума, связанного с поясом активности. В то же время вопрос, является ли данный результат случайным или характерным остался без ответа, так как иные периоды времени и иные участки Солнца не изучались.

В настоящей работе мы используем данный метод для исследования и сравнения распределения и темпа формирования солнечных нановспышек для двух периодов времени вблизи минимума солнечной активности 2019–2020 гг. Мы пытаемся ответить на вопрос, насколько стабильным является темп формирования и пространственное распределение нановспышек при их регистрации на разных солнечных широтах, а также в разные периоды времени. Мы также исследуем вопрос, существует или нет асимметрия в пространственном распределении и темпе формирования нановспышек между северным и южным полушариями Солнца. Как известно, такая асимметрия, особенно вблизи минимума солнечного цикла, часто наблюдается в распределениях обычных вспышек.

Основной целью нашей работы, таким образом, является изучение широтных распределений нановспышек и наличие или отсутствие в них выраженных максимумов. Структура работы следующая. В следующем разделе мы кратко перечисляем использованные данные наблюдений и излагаем метод обработки. В разделе 3 приведены полученные результаты. В последнем разделе мы представляем заключение и делаем выводы.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Основным источником экспериментальных данных о солнечных нановспышках являются изображения короны Солнца, получаемые космическими телескопами в вакуумной УФ-области спектра (см. например, обзор [Bogachev et al., 2020]). В настоящее время наиболее детальные данные такого рода предоставляют телескопы AIA, работающие на космическом аппарате SDO. Телескопы AIA получают изображения полного диска Солнца размером 4096×4096 пикселей с угловым разрешением $0.6''$ на пиксель и временным шагом между изображениями 12 с [Lemen et al., 2012]. Для регистрации нановспышек чаще всего используют спектральный канал 171 Å, излучение в котором формируется спектральной линией железа Fe_{IX} при температуре плазмы около 0.6 млн К, что находится в хорошем согласии с температурой плазмы в солнечных нановспышках.

Для целей настоящей работы мы выбрали и исследовали две серии изображений, полученных телескопом AIA в канале 171 Å 20 мая 2019 г. с 12:00 UT по 13:00 UT (продолжительность серии — 1 ч; число изображений — 300) и 10 мая 2020 г. 12:00 UT по 13:00 UT (такая же продолжительность и число изображений). Оба интервала времени относятся к периоду низкой солнечной активности (первая серия была зарегистрирована примерно за полгода до нижней точки солнечного цикла; вторая — примерно через полгода, после прохождения минимума). Характерный вид Солнца в выбранной спектральной линии, а также сопоставление выбранных времен наблюдения с фазой солнечного цикла представлены на рис. 1.

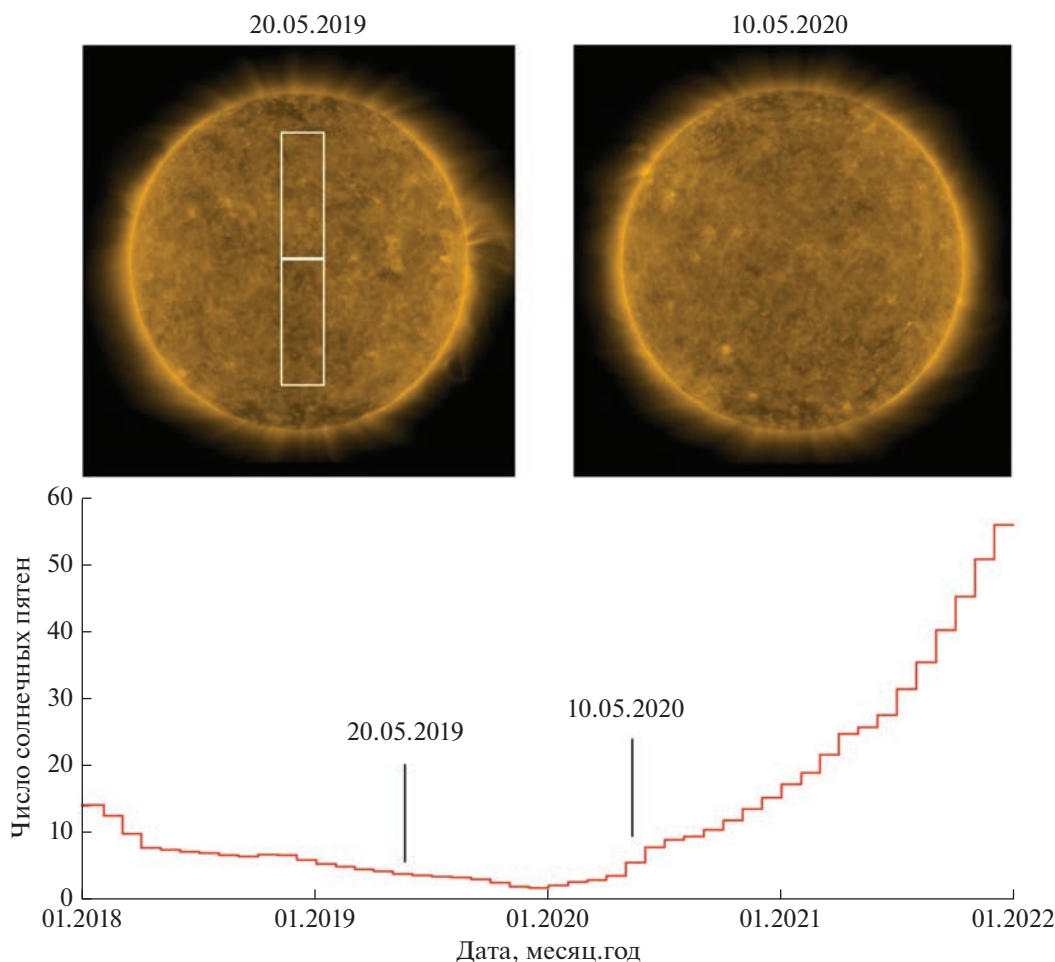


Рис. 1. Верхняя панель: слева — вид Солнца 20 мая 2019 г. (серия 1; канал AIA 171 Å); справа — то же для 10 мая 2020 г. (серия 2). Нижняя панель — сопоставление периодов наблюдения и фазы солнечного цикла. Белые прямоугольники на левом изображении Солнца — границы обработанных фрагментов.

Главным критерием при выборе периодов наблюдения было отсутствие на Солнце заметных центров активности, которые могли исказить результаты измерений.

Для исследования для каждой серии изображений было выбрано два фрагмента. Их границы показаны белыми линиями на верхней панели рис. 1. Каждый фрагмент представляет собой прямоугольную область шириной 400 и высотой 1200 пикселей. Размер фрагмента по высоте примерно соответствует диапазону широт от 0° до 50° . Фрагменты расположены симметрично относительно экватора Солнца.

Предварительная обработка изображений включала в себя их приведение к единому центру (устранение дрожания), а также удаление сигнала от заряженных частиц. Фактически, устранение дрожания не потребовалось, так как в изображениях AIA уровня 1.0, которые мы использовали, этот эффект был уже устранен, либо дрожание изначально отсутствовало. Для удаления следов

заряженных частиц, мы использовали метод, описанный в работе [Zavershinskii et al., 2022]. Согласно методу, к “плохим” относятся пиксели, в которых сигнал при переходе к следующему кадру увеличивается на величину более $(3-4)\sigma$, а на следующем кадре обратно уменьшается на величину более $(3-4)\sigma$. Метод основан на том, что заряженные частицы дают резкий всплеск только на одном кадре. Вероятность попадания двух частиц подряд в один и тот же пиксель детектора считается низкой. Некоторые авторы (например, [Purkhart and Veronig, 2022]) перед поиском нановсплесков устраняли также дифференциальное вращение Солнца. Мы однако, исходили из того, что смещение изображения за время порядка 0.5–1 мин (характерная продолжительность нановсплески) составляет примерно 0.1–0.2 пикселя. При таких малых смещениях устранение дифференциального вращения неоправданно искажает фотометрический сигнал без особого практического смысла.

Таблица 2. Сводная информация по исследованным фрагментам Солнца

Период	Фрагмент	Средняя интенсивность короны [отсчетов]	Порог DI	Число событий выше порога	Средний темп формирования нановспышек [$\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$]
20.05.2019 12:00–13:00 UT	N	210.48	3.92σ	16848	4.58×10^{-21}
	S	163.40	3.85σ	22586	6.13×10^{-21}
10.05.2020 12:00–13:00 UT	N	198.24	3.88σ	20015	5.43×10^{-21}
	S	178.69	3.79σ	28525	7.69×10^{-21}

Процедура поиска нановспышек, которую мы использовали, основана на преобразовании каждой серии изображений в куб данных $I_i(x, y)$, где i – номер изображения (меняется от 1 до 300), а x и y – координаты пикселя (x и y меняются от 1 до 512). Для каждой серии затем вычисляется разность по формуле

$$DI_i(x, y) = I_{i+1}(x, y) - I_i(x, y),$$

где i меняется от 1 до 299. Величина $DI_i(x, y)$ равна изменению сигнала в пикселе (x, y) при переходе от изображения с номером i к изображению с номером $i + 1$. Дальнейшая процедура поиска нановспышек проводится на основе массива DI .

Zavershinskii et al., [2022] показали, что в спокойной короне Солнца в отсутствие вспышек и иных быстропротекающих процессов основной причиной изменения сигнала на изображениях SDO/AIA 171 Å является фотонный шум. Согласно работе [Boerner P. et al., 2012], увеличение сигнала в канале AIA 171 Å на один отсчет приблизительно соответствует регистрации одного фотона. Характерный уровень сигнала в спокойной короне в минимуме активности в канале AIA 171 Å составляет 100–300 отсчетов на пиксель (т.е. 100–300 фотонов). В результате, фотонный шум должен приводить к вариациям сигнала с дисперсией $\sigma \approx 10$ –17 отсчетов, что хорошо согласуется с фактически наблюдаемыми изменениями. Дополнительным аргументом в пользу роли фотонного шума является то, что распределение DI в диапазоне до приблизительно величины 3σ является гауссовым, а величина дисперсии соответствует теоретическому значению шума, определенному из технических характеристик телескопа.

Согласно многочисленным исследованиям, распределение солнечных нановспышек (в отличие от распределения фотонного шума) имеет не нормальное, а степенное распределение. Так как при больших амплитудах сигнала, степенное распределение уменьшается много медленнее, чем экспоненциальное распределение, то при больших DI должно происходить отклонение формы спектра от распределения гаусса. Особенно заметным расхождение должно становиться, начиная с $DI >$

$> (4\text{--}5) \sigma$, когда число событий шума начинает быстро стремиться к нулю.

На верхней панели рис. 2 показан пример экспериментального распределения величины DI , полученного нами для северного фрагмента серии от 20.05.2019 г. (см. левый рис. 1 на верхней панели рис. 1). Аналогичная процедура обработки проводилась для всех фрагментов.

Хорошо видно, что в области малых значений DI экспериментальный спектр почти точно совпадает с распределением фотонного шума, однако при больших значениях DI наблюдаются существенные расхождения. Чтобы точнее определить, при каком значении DI расхождение становится существенным, мы исследовали отношение между фактически найденным числом событий и их ожидаемым числом для экспоненциального распределения (нижняя панель рис. 2). Исследование показывает, что до уровня $DI \approx 3 \sigma$, искомое отношение довольно близко к единице, а, начиная с 3σ , начинает быстро расти. В качестве порога, выше которого мы считаем возможным пренебрегать вкладом шума, мы для всех серий выбрали отношение $R = 3$, при котором вклад шума составляет не более 25%. События выше этого порога мы относим к нановспышкам. Число найденных таким способом событий, а также некоторая дополнительная информация (например, средняя интенсивность излучения короны на выбранных участках и средний темп формирования нановспышек), приведены в табл. 2.

Чтобы визуально показать, как выглядят найденные таким способом события, мы привели пример одного из них на рис. 3. Для данной нановспышки $DI = 5.86 \sigma$. На нижней панели показаны соответствующие фрагменты изображения AIA. Нановспышка имела размер от одного до нескольких пикселей и продолжительность около 36 с (наблюдалась на трех последовательных кадрах). На реальную физическую природу события указывает движение источника излучения (особенно хорошо заметно на кадрах 2 и 3). Так как фотонный шум формируется независимо в каждом пикселе, то такая согласованность по време-

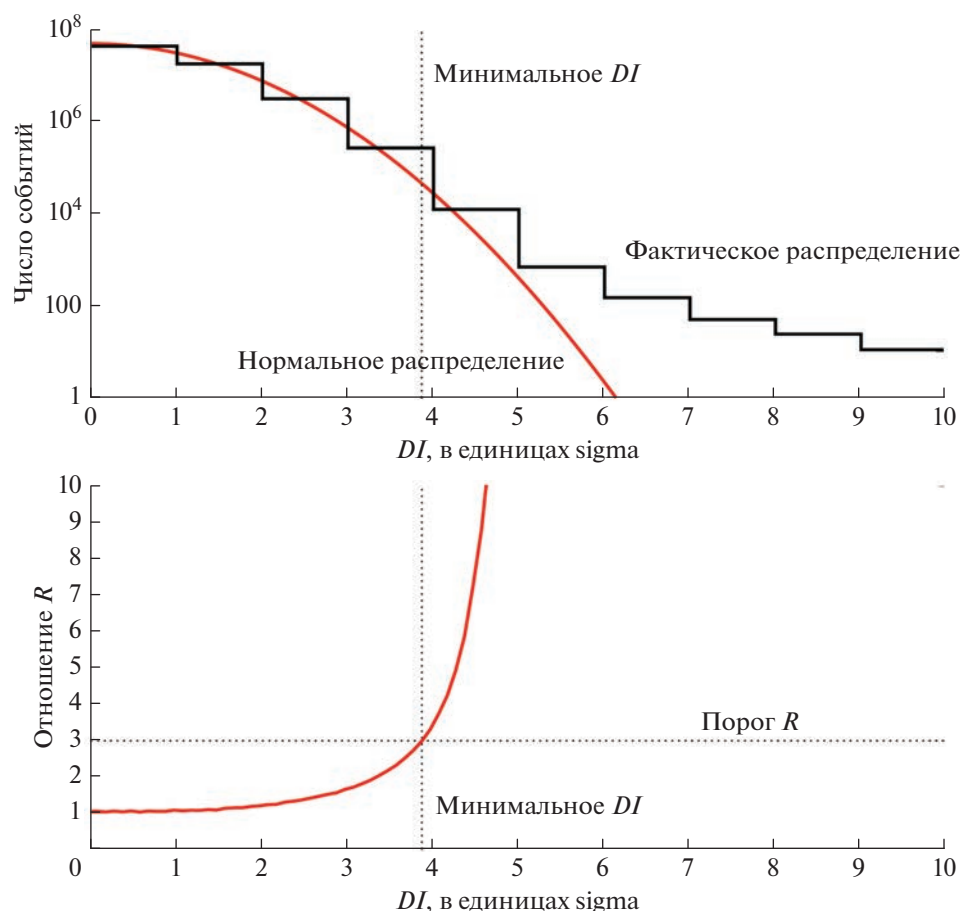


Рис. 2. Верхняя панель: экспериментальное (фактическое) распределение величины DI и нормальное распределение, соответствующее фотонному шуму. Нижняя панель: отношение фактически найденного числа событий к ожидаемому числу событий шума. Пунктирная линия на обоих изображениях — граница, выше которой число нановспышек доминирует над шумом (составляет не менее 75%).

ни случайных всплесков в разных пикселях является практически невероятной.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом работы являются пространственные распределения нановспышек, показанные на рис. 4 для серии от 20 мая 2019 г. и на рис. 5 для серии от 10 мая 2020 г. Для каждого периода времени отдельно исследовано распределение в северном полушарии (фрагмент N) и в южном полушарии (фрагмент S). Границы изученных фрагментов показаны на нижней панели рис. 5 (изображение повернуто на 90° против часовой стрелки).

Так как размер обработанных фрагментов приблизительно соответствует диапазону по широте от 0 до 50° , то при расчете темпа формирования нановспышек требуется учитывать эффекты проекции. При удалении от экватора площадь поверхности Солнца, соответствующая одному пикселю, увеличивается — в результате темп фор-

мирования нановспышек в пересчете на один пиксель растет. Если мы направим ось x от экватора к полюсу, то увеличение темпа формирования вспышек F в зависимости от смещения от экватора x будет описываться формулой

$$F(x) = F_0 \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2}}.$$

Здесь R — радиус Солнца в пикселях (для исследованных изображений AIA составлял 1590 пикселей), x — смещение от экватора в пикселях (от 0 до 1200), а F_0 — темп формирования в точке $x = 0$. Полученная нами экспериментальная зависимость корректировалась соответствующим образом (умножалась на величину $F_0/F(x)$).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы провели поиск и исследование солнечных нановспышек для двух периодов наблюдения вблизи минимума солнечной активности 2019–2020 гг. Продолжительность на-

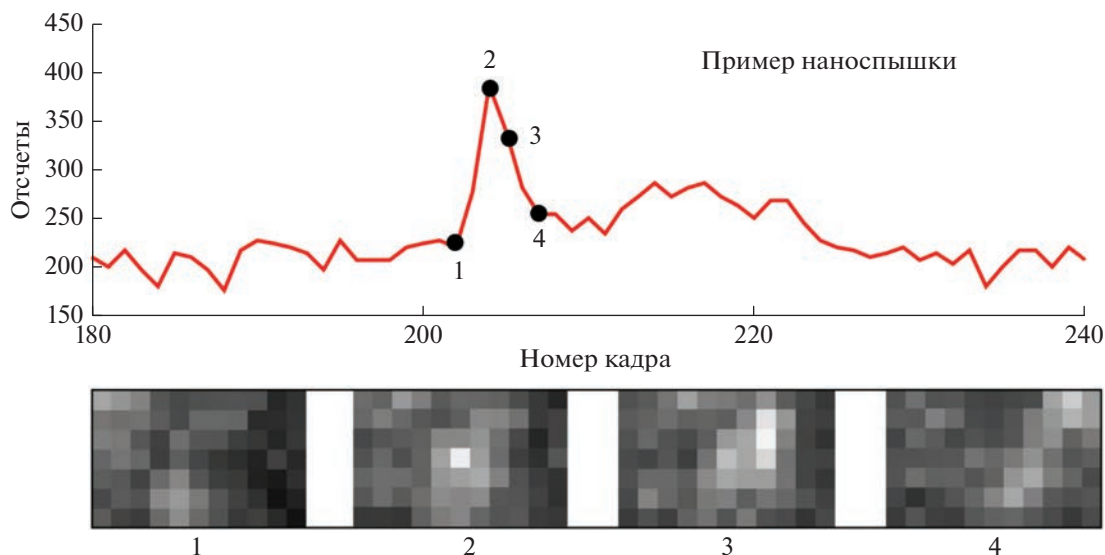


Рис. 3. Пример нановспышки, найденной изложенным в работе методом. Верхняя панель — временной профиль излучения. Нижняя панель — изображения. Соответствие между изображением и моментом времени показано цифрами от 1 до 4.

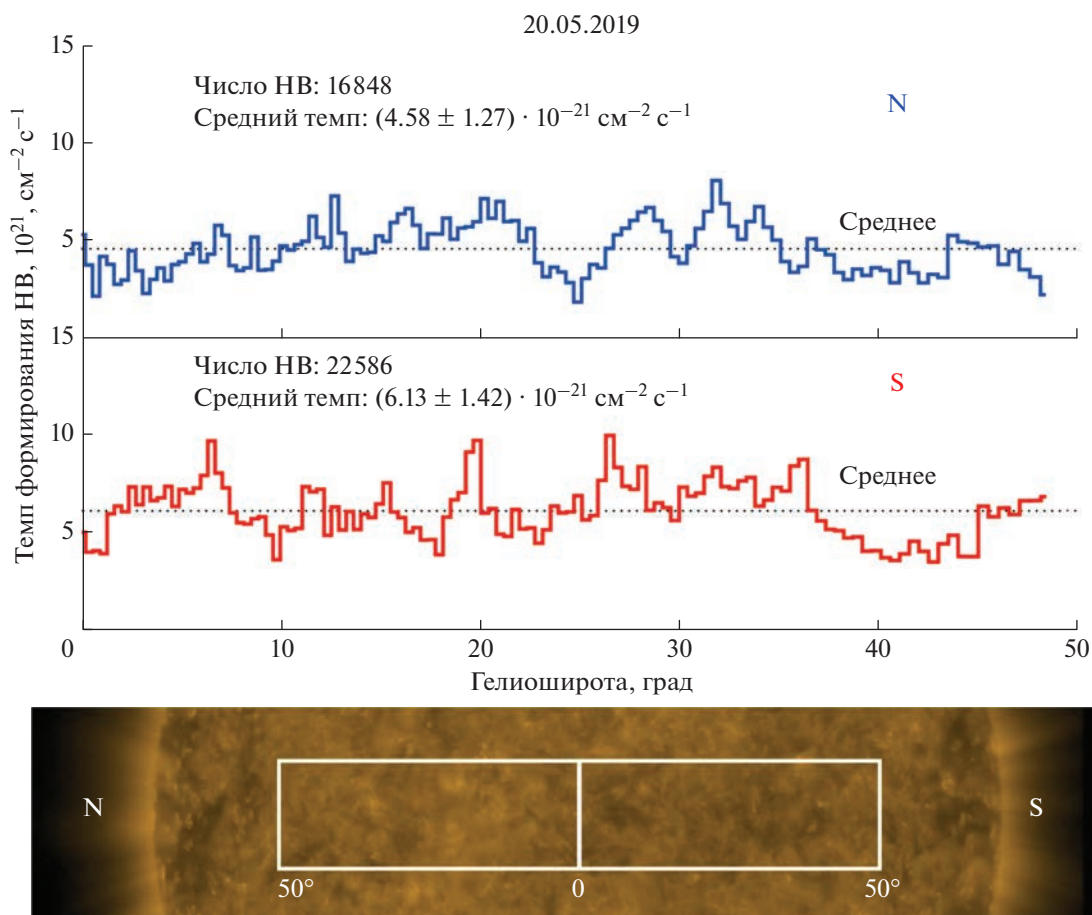


Рис. 4. Темп формирования нановспышек в зависимости от солнечной широты в диапазоне от 0° до 50° для 20 мая 2019 года с 12:00 UT по 13:00 UT. Верхний график — распределение для северного полушария. Нижний график — то же для южного полушария. Нижняя панель — границы обработанных фрагментов (изображение повернуто на 90° против часовой стрелки).

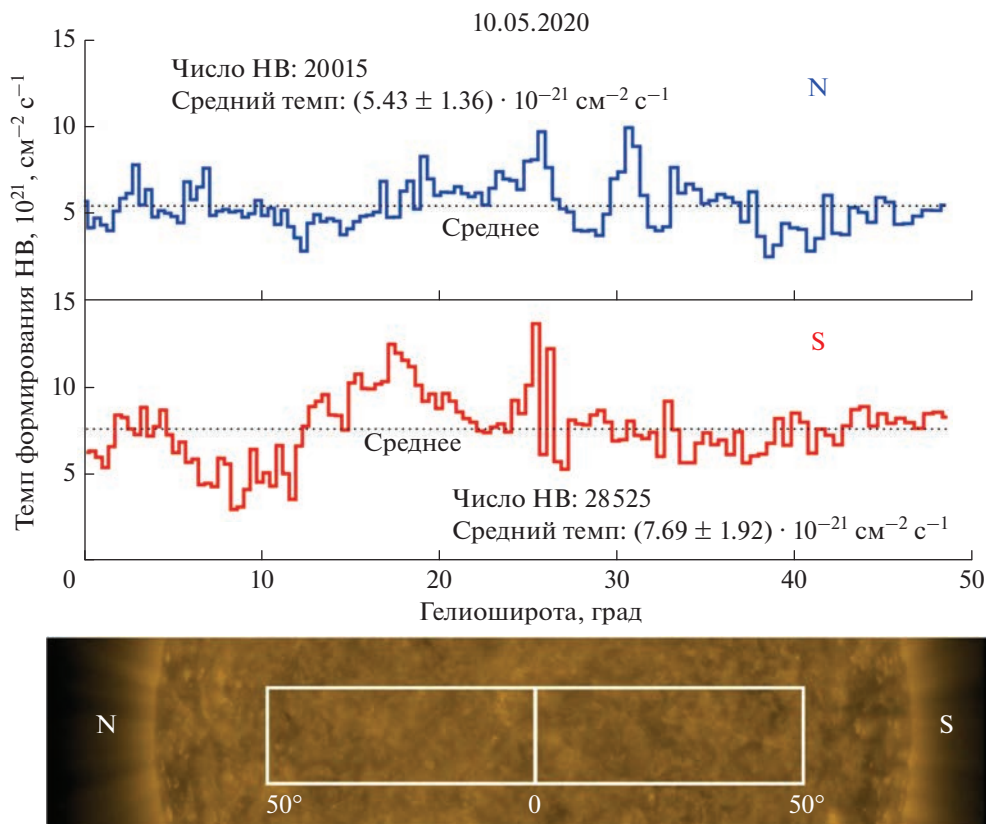


Рис. 5. То же, что и рис. 4, но для 10 мая 2020 года с 12:00 UT по 13:00 UT.

блюдения для каждого периода составила 1 ч. Размеры исследованных фрагментов: 400×1200 пикселей, что соответствует примерно $240'' \times 720''$. Всего нами было обнаружено 87974 нановспышки. Средний темп их формирования составил $6.0 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что, в целом, соответствует результатам других авторов. Так Krucker and Benz [1998] зарегистрировали 11150 событий в поле зрения $7'' \times 7''$ за интервал времени 42 мин, что соответствует темпу формирования $P \approx 4.76 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Ulyanov et al. [2019] нашли 107075 нановспышек в ходе четырех сеансов наблюдений с общей продолжительностью около 3 ч. Средний темп формирования нановспышек с учетом размера поля зрения, составил $P \approx 6.14 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Мы использовали в работе метод поиска нановспышек, предложенный в работе [Zavershinskii et al., 2022], при применении которого существенным является порог, выше которого можно пренебречь фотонным шумом. Zavershinskii et al. [2022] оценили этот порог примерно как 4σ . В данной работе мы определили его более точно: $(3.79-3.92) \sigma$ со средним значением 3.86σ .

Наиболее значимым результатом работы мы считаем исследование широтного распределения солнечных нановспышек. Согласно нашим ре-

зультатам, в диапазоне широт от 0° до 50° темп формирования нановспышек является приблизительно равномерным (без выраженного центрального максимума). Соответствующий результат был подтвержден для всех 4 фрагментов. Среднеквадратичное отклонение распределения относительно его среднего значения составило $1.50 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, т.е. 25% от среднего темпа формирования нановспышек.

Мы хотели бы дополнительно отметить следующие выявленные особенности. В обоих исследованных периодах (в мае 2019 и мае 2020 гг.) темп формирования нановспышек в южном полушарии превышал темп формирования в северном полушарии примерно на 30–40%: для мая 2019 г. $6.13 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (S) против $4.58 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (N) – разница 34%; для мая 2020 г. $7.69 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (S) против $5.43 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (N) – разница 42%. Отметим, что такая же асимметрия в темпе формирования вспышек в северном и южном полушарии наблюдалась в этот период и для обычных вспышек. На рис. 6 показано распределение по солнечной широте вспышек класса “B” и выше в 2019–2020 гг. Число вспышек в южном полушарии было примерно на 31% больше, чем в северном. Такое совпадение (в том чис-

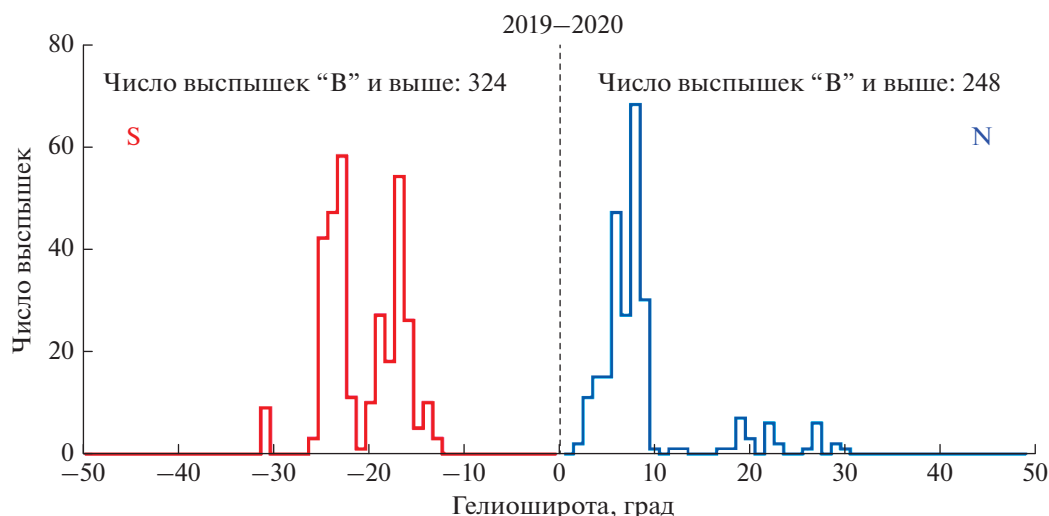


Рис. 6. Распределение по широте числа обычных вспышек (класс “В” и выше) в 2019–2020 гг.

ле количественное) в результатах для нановспышек и обычных вспышек, возможно, свидетельствует, что асимметрия в активности Солнца в северном и южном полушарии, носит универсальный характер и проявляется (в тех случаях, когда она есть) во вспышках всех энергий. Данный вывод, впрочем, носит предварительный характер и требует дополнительного исследования. Мы также отмечаем (пока просто как интересный факт), что темп формирования нановспышек, зарегистрированный в 2020 г. в условиях более высокой солнечной активности в обоих полушариях Солнца оказался выше, чем темп формирования нановспышек, зарегистрированный в 2019 г. при более низкой активности Солнца.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10157).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abdel-Sattar W., Mawad R., Moussas X. Study of solar flares' latitudinal distribution during the solar period 2002–2017: GOES and RHESSI data comparison // *Adv. Space Res.* V. 62. № 9. P. 2701–2707. 2018.
- Aschwanden M.J., Tarbell T.D., Nightingale R.W., Schrijver C.J., Kankelborg C.C., Martens H.P. Time variability of the “Quiet” sun observed with TRACE. II. Physical parameters, temperature evolution, and energetics of extreme-ultraviolet nanoflares // *Astrophys. J.* V. 535. № 2. P. 1047–1065. 2000.
- Aschwanden M.J., Parnell C.E. Nanoflare statistics from first principles: fractal geometry and temperature synthesis // *Astrophys. J.* V. 572. № 2. P. 1048–1071. 2002.
- Berghmans D., Clette F., Moses D. Quiet Sun EUV transient brightenings and turbulence. A panoramic view by EIT on board SOHO // *Astronomy and Astrophysics.* V. 336. P. 1039–1055. 1998.
- Boerner P., Edwards C., Lemen J. et al. Initial calibration of the atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) // *Sol. Phys.* V. 275. P. 41–66. 2012.
- Bogachev S.A., Ulyanov A.S., Kirichenko A.S., Loboda I.P., Reva A.A. Microflares and nanoflares in the solar corona // *Physics-Uspekhi.* V. 63. № 8. P. 783. 2020.
- Howard R. Studies of Solar Magnetic Fields. II: The Magnetic Fluxes // *Sol. Phys.* V. 38. P. 59–67. 1974.
- Krucker S., Benz A.O. Energy Distribution of Heating Processes in the Quiet Solar Corona // *Astrophys. J.* V. 501. P. 213–216. 1998.
- Kirichenko A.S., Bogachev S.A. The relation between magnetic fields and X-ray emission for solar microflares and active regions // *Sol. Phys.* V. 292. № 9. P. 120. 2017.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Sol. Phys.* V. 275. P. 17–40. 2012.
- Pandey K.K., Yellaiah G., Hiremath K.M. Latitudinal distribution of soft X-ray flares and disparity in butterfly diagram // *Astrophysics and Space Science.* V. 356. P. 215–224. 2015.
- Parnell C.E., Jupp P.E. Statistical analysis of the energy distribution of nanoflares in the quiet Sun // *Astrophys. J.* V. 529. № 1. P. 554–569. 2000.
- Purkhart S., Veronig A. M. Nanoflare distributions over solar cycle 24 based on SDO/AIA differential emission measure observations // *Astronomy & Astrophysics.* V. 661. P. A149. 2022.
- Ulyanov A.S., Bogachev S.A., Reva A.A., Kirichenko A.S., Loboda I.P. The energy distribution of nanoflares at the minimum and rising phase of solar cycle 24 // *Astronomy Letters.* V. 45. № 4. P. 248–257. 2019.
- Zavershinskii D.I., Bogachev S.A., Belov S.A., Ledentsov L.S. Method for searching nanoflares and their spatial distribution in the solar corona // *Astronomy letters.* V. 48. P. 550–560. 2022.