
**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МЕРА ЭМИССИИ СОЛНЕЧНЫХ НАНОВСПЫШЕК,
ОПРЕДЕЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА SITES****DIFFERENTIAL EMISSION MEASURE OF SOLAR NANOFLARES
MEASURED WITH THE SITES ALGORITHM****С.А. Белов**

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева,
Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru
Самарский филиал Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН,
Самара, Россия

Л.С. Леденцов

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева,
Самара, Россия, leonid.ledentsov@gmail.com
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга,
Москва, Россия

Д.И. Завершинский

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева,
Самара, Россия, dimanzav@mail.ru
Самарский филиал Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН,
Самара, Россия

С.А. Богачёв

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева,
Самара, Россия, bogachev.sergey@gmail.com
Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия

S.A. Belov

Samara National Research University,
Samara, Russia, mr_beloff@mail.ru
Samara Branch of Lebedev Physical Institute RAS,
Samara, Russia

L.S. Ledentsov

Samara National Research University,
Samara, Russia, leonid.ledentsov@gmail.com
Sternberg Astronomical Institute,
Moscow, Russia

D.I. Zavershinskii

Samara National Research University,
Samara, Russia, dimanzav@mail.ru
Samara Branch of Lebedev Physical Institute RAS,
Samara, Russia

S.A. Bogachev

Samara National Research University,
Samara, Russia, bogachev.sergey@gmail.com
Space Research Institute,
Moscow, Russia

Аннотация. В работе представлены результаты исследования возможностей алгоритма SITES (Solar Iterative Temperature Emission Solver) [Morgan, Pickering, 2019] для восстановления дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) источника по его излучению в нескольких участках электромагнитного спектра в контексте наблюдения солнечных нановспышек прибором AIA/SDO. Метод SITES был реализован на языке программирования Python и впервые был применен для построения ДМЭ нановспышек. С этой целью мы проверили эффективность работы алгоритма на модельных одно- и двухпиковых ДМЭ при температурах, характерных для солнечных нановспышек. Результаты тестирования говорят о том, что алгоритм SITES может быть ограниченно применим для исследования ДМЭ нановспышек в однопиковом приближении. Алгоритм обладает сочетанием хорошей точности и высокой скорости счета в исследуемой области температур от 1 до 3 МК. Особенности ДМЭ нановспышек, восстановленных методом SITES, были изучены на основе найденной нами ранее выборки из 58855 событий, наблюдавшихся в 2019 г. с помощью AIA/SDO. Полученные результаты подтверждают, что характерная темпера-

Abstract. The paper presents the results of a study of capabilities of the SITES algorithm for reconstructing the differential emission measure (DEM) of a source from its radiation in several parts of the electromagnetic spectrum in the context of observing solar nanoflares with the AIA/SDO instrument. The SITES method was implemented in the Python programming language and was first used to construct the DEM of nanoflares. For this purpose, we tested the efficiency of the algorithm on model single- and double-peak DEM at characteristic temperatures of solar nanoflares. The test results indicate that the SITES algorithm can be of limited applicability for studying the DEM of nanoflares in the single-peak approximation. The algorithm has a combination of high accuracy and high counting rate in the studied temperature range from 1 to 3 MK. The features of DEM nanoflares reconstructed by the SITES method were examined using our previously found sample of 58855 events observed in 2019 with the AIA/SDO instrument. The results confirm that the characteristic plasma temperature in nanoflares is 1–2 MK. The reconstructed DEM of nanoflares generally have one maximum within this range, but the temperature distribution we obtained for all flares forms two clusters with

тура плазмы в нановспышках составляет 1–2 МК. Восстановленные ДМЭ нановспышек, как правило, имеют один максимум внутри этого диапазона, однако полученное нами для всех вспышек распределение по температуре формирует два кластера с максимумами при 1.2 и 1.7 МК. Мы интерпретируем это как возможное свидетельство существования двух типов солнечных нановспышек, но данный результат требует дополнительного подтверждения.

Ключевые слова: нановспышки, дифференциальная мера эмиссии (ДМЭ), спокойное Солнце.

maxima at 1.2 and 1.7 МК. We interpret this as possible evidence for the existence of two types of solar nanoflares, but this result requires further confirmation.

Keywords: nanoflares, differential emission measure (DEM), quiet Sun.

ВВЕДЕНИЕ

Нагрев солнечной короны до наблюдаемых температур $T > 1$ МК многие десятилетия остается нерешенной загадкой солнечной физики. В настоящее время существует несколько подходов, призванных объяснить механизм нагрева, среди которых можно выделить два основных: нагрев с помощью магнитогидродинамических волн и нагрев нановспышками. Первый подразумевает способность волн переносить энергию из нижних слоев солнечной атмосферы в корону, где она может нагревать окружающую плазму (см., например, [Van Doorselaere et al., 2020]). Второй подход объясняет нагрев солнечной короны как результат большого числа мелкомасштабных вспышечных событий с энергиями $\sim 10^{23}$ – 10^{27} эрг, названных Паркером нановспышками [Parker, 1988].

Для нагрева солнечной короны и поддержания ее температуры постоянной за счет энергии нановспышек необходимо, чтобы мощность их энерговыделения была порядка $6 \cdot 10^{27}$ эрг/с [Богачёв и др., 2020]. Таким образом, встает вопрос о достаточной частоте возникновения нановспышек. В работе [Hudson, 1991] было показано, что распределение частоты вспышечных событий по энергии в диапазоне 10^{27} – 10^{33} эрг хорошо описывается степенной зависимостью $N(E) = AE^{-\alpha}$, где A — некоторый нормировочный коэффициент; $\alpha \approx 1.8$ — наклон спектра. Эта зависимость может быть продлена в область более низких энергий. Для подобного степенного распределения нетрудно показать, что при $\alpha > 2$ интегральная энергия вспышек возрастает при движении к низким энергиям. Таким образом, точное знание величины показателя распределения α способно пролить свет на вклад нановспышечных событий в общий энергетический бюджет солнечной короны. В настоящий момент разные авторы дают оценки параметра α , находящиеся в диапазоне 1.3–2.8 (см. табл. 1). Подобный разброс, вероятнее всего, связан с расхождением методик определения как самих нановспышек, так и их энергетики.

В последних работах, посвященных исследованию нановспышек [Joulin et al., 2016; Purkhart, Veronig, 2022], для определения температуры событий и, следовательно, их тепловой энергии проводится восстановление из наблюдательных данных дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) плазмы $\xi(T)$:

$$\xi(T) = \frac{dM}{dT},$$

$$M = \int_0^\infty n_e^2(x) dx,$$

где M — полная мера эмиссии столба плазмы вдоль луча зрения x ; n_e — концентрация электронов. По полученной ДМЭ можно оценить температуру наблюдаемого объема плазмы T_{est} [Cheng et al., 2012; Vanninathan et al., 2015]:

$$T_{\text{est}} = \frac{\int_0^\infty T \xi(T) dt}{\int_0^\infty \xi(T) dt}.$$

Стоит отметить, что между наблюдаемой в определенном спектральном канале телескопа интенсивностью I и ДМЭ существует следующая связь:

$$I = \int_0^\infty R(T) \xi(T) dT,$$

где $R(T)$ — функция температурного отклика, исследуемого спектрального канала телескопа. Данная связь используется для реконструкции ДМЭ по набору наблюдаемых интенсивностей спектральных каналов телескопа. На текущий момент существует большой выбор различных методов и алгоритмов, позволяющих вычислить ДМЭ наблюдаемой плазмы (см., например, [Massa et al., 2023] для сравнения различных алгоритмов).

Из этого следует, что ДМЭ является важной характеристикой наблюдаемой плазмы, с помощью которой для исследуемого объема можно отыскать температурное распределение, усредненную температуру и связанную с ней тепловую энергию. Однако, несмотря на этот факт, вычислению ДМЭ нановспышек не уделяется отдельного внимания в современных исследованиях. Зачастую само вычисление ДМЭ носит промежуточный характер и используется для дальнейшего расчета термодинамических параметров плазмы. Лишь в некоторых работах приводится ДМЭ одиночных событий [Chitta et al., 2021]. В то же время, например для корональных дыр, существуют статистические исследования ДМЭ [Heinemann et al., 2021], целью которых служит определение некой типичной ДМЭ по большому набору наблюдаемых областей. Подобные статистические исследования, на наш взгляд, имеют большее преимущество по сравнению с исследованием характеристик одиночных событий, особенно с учетом того, что нановспышки происходят намного чаще обыкновенных вспышек. С другой стороны, небольшие размеры нановспышек по сравнению с обычными вспышками затрудняют

Таблица 1

Значения в порядке возрастания показателя степени энергетического распределения нановспышек α , полученные разными авторами

Параметр α	Наблюдаемые длины волн, Å	Источник
1.35 ± 0.20	195	Berghmans et al., 1998
1.65 ± 0.20	131, 171, 193, 211, 335	Joulin et al., 2016
1.79 ± 0.08	171, 195	Aschwanden et al., 2000
1.81 ± 0.10	195	Aschwanden, Parnel, 2002
1.86 ± 0.07	171	Aschwanden, Parnel, 2002
1.9 ± 0.1	304	Berghmans et al., 1998
2.28 ± 0.03	94, 131, 171, 193, 211, 335	Purkhart, Veronig, 2022
2.3 ± 0.1	171, 195	Benz, Krucker, 2002
2.54	171, 195	Krucker, Benz, 1998
2.81 ± 0.52	171	Ulyanov, 2019

точное определение ДМЭ и ее характера, поскольку нановспышки видны не во всех каналах, что приводит либо к добавлению шума, либо к потере информации на входе алгоритмов оценки ДМЭ. Большая частота нановспышек вносит ограничение на используемый алгоритм, поскольку методы оценки ДМЭ требуют большого объема вычислений. На исследование крупного ансамбля нановспышек может потребоваться много времени.

В работе рассматривается применение метода SITES для оценки ДМЭ нановспышек, проводится статистическое исследование ДМЭ нановспышек с целью установления особенностей данного распределения и получения представления о типичной ДМЭ одиночной нановспышки.

Работа построена следующим образом: в разделе 1 мы исследуем современные возможности регистрации нановспышек с помощью метода SITES; в разделе 2 применяем метод SITES к ранее найденному нами массиву нановспышек и вычисляем их ДМЭ; раздел 3 содержит результаты исследования и выводы.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА SITES

Рассматриваемый метод SITES [Morgan, Pickering, 2019] в отличие от популярного метода регуляризации [Hannah, Kontar, 2012] не восстанавливает ДМЭ как результат решения задачи минимизации регуляризованного функционала ошибки, а строит ДМЭ итерационно на основе начального приближения, заданного явно с помощью функций отклика используемого телескопа в различных каналах. При этом в процессе построения для каждого рассматриваемого температурного интервала учитывается относительный вклад каждого канала по сравнению со вкладами остальных каналов. SITES привлек наше внимание по нескольким причинам. В первую очередь, авторы метода заявляют о значительной вычислительной скорости данного алгоритма, что является критичным параметром при исследовании большого ансамбля нановспышек. Кроме того, данный алгоритм имеет ясную концепцию и достаточно прост в реализации. SITES реализован нами на языке Python и применяется для построения ДМЭ нановспышек впервые.

В нашем исследовании используются данные по интенсивности крайнего ультрафиолетового излучения, получаемые с помощью прибора Atmospheric Imaging Assembly (AIA), находящегося на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO) [Lemen et al., 2012]. AIA представляет собой массив из четырех телескопов, работающих в ВУФ, УФ и видимых диапазонах, позволяющий получать полные изображения диска Солнца размером 4096×4096 пкс с пространственным и временным разрешением $0.6''$ и 12 с соответственно.

При рассмотрении данных AIA для анализа нановспышек мы ограничились следующим набором ВУФ каналов: 131, 171, 193 и 211 Å. Этот выбор продиктован тем, что такое сочетание позволяет зафиксировать наибольшее число нановспышек без необходимости привлечения дополнительных спектральных диапазонов [Belov et al., 2023]. Кроме того, мы полагаем, что канал 304 Å несет информацию о более холодных и глубоких слоях солнечной атмосферы, а каналы 94 и 335 Å имеют высокий уровень шума, что может негативно сказаться на точности вычисления ДМЭ по указанным каналам.

Мы предполагаем, что из-за меньшей энергетики нановспышек по сравнению с обычными вспышками ДМЭ нановспышек имеет более простую зависимость от температуры. В частности, это различие может заключаться в том, что не наблюдается низко- и высокотемпературных горбов в ДМЭ нановспышек, что обусловлено соответственно отсутствием хромосферного отклика на слабое событие и относительно небольшой энергией ускоренных электронов. По этой причине для оценки качества работы алгоритма в качестве тестовых моделей истинной ДМЭ нановспышек мы использовали одно- и двух-температурные приближения, параметры которых указаны в табл. 2 и 3 соответственно совместно с параметрами используемого алгоритма.

На рис. 1 показано сравнение средней температуры, полученной по восстановленной ДМЭ с помощью SITES (см. параметры в табл. 2) со средней температурой, определяемой модельной однотемпературной ДМЭ. Как видно из тепловой карты на верхней панели рис. 1, метод позволяет определить с точностью менее 10 % среднюю температуру для одно-пиковой гауссовой ДМЭ с T_{MAX} в окрестности 1 МК

Таблица 2

Параметры алгоритма		Параметры теста	
Минимальная температура	0.2 МК	Форма тестовой ДМЭ	$A \exp\left(-\left(\frac{T-T_{MAX}}{\sigma}\right)^2\right)$
Максимальная температура	5 МК	Амплитуда A	$1.4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-5} \text{ К}^{-1}$
Число бинов	31	Положение максимума T_{MAX}	0.5–4.0 МК
Точность	5%	Шаг варьирования T_{MAX}	0.01 МК
Максимальное количество итераций	300	Ширина профиля σ	0.1–1.0 МК
Используемые каналы	131, 171, 193, 211 Å	Шаг варьирования σ	0.01 МК

Таблица 3

Параметры тестовой задачи для двойной гауссовой кривой	
Форма тестовой ДМЭ	$A \left[\exp\left(-\left(\frac{T-T_{cold}}{\sigma}\right)^2\right) + \exp\left(-\left(\frac{T-T_{hot}}{\sigma}\right)^2\right) \right]$
Амплитуда A	$1.4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-5} \text{ К}^{-1}$
Положение холодного максимума T_{cold}	0.5–2.0 МК
Шаг варьирования T_{cold}	0.01 МК
Положение горячего максимума T_{hot}	$(0.5+\sigma)$ –4.0 МК
Шаг варьирования T_{hot}	0.01 МК
Ширина профиля σ	0.25, 0.5, 0.75, 1.0 МК

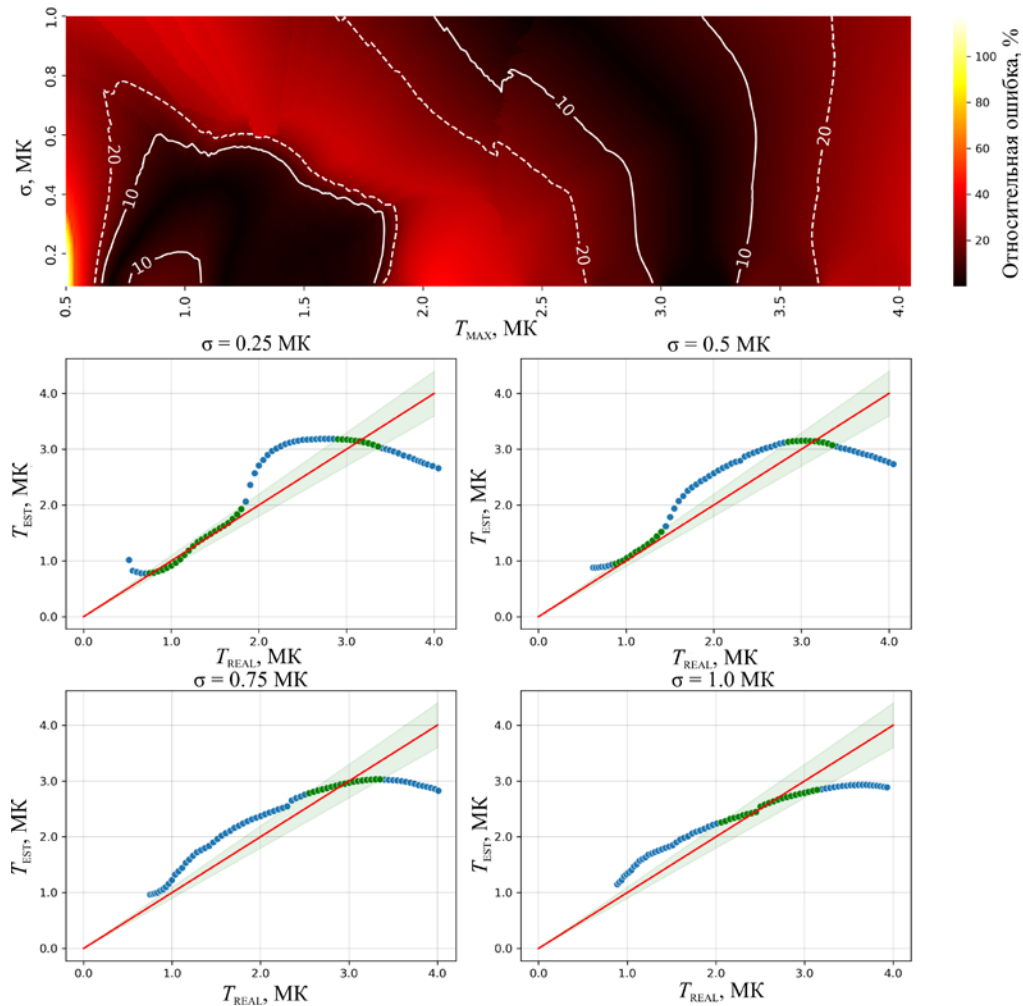


Рис. 1. Оценка средней температуры плазмы для тестовой гауссовой ДМЭ. Верхняя панель: относительная ошибка определения средней температуры для различных параметров тестовой ДМЭ. Темные участки соответствуют малым значениям ошибки, красный и желтый цвета — областям с большими ошибками. Нижние панели: зависимость оцененной средней температуры от средней температуры тестовой ДМЭ; зеленым показана область с погрешностью менее 10 %

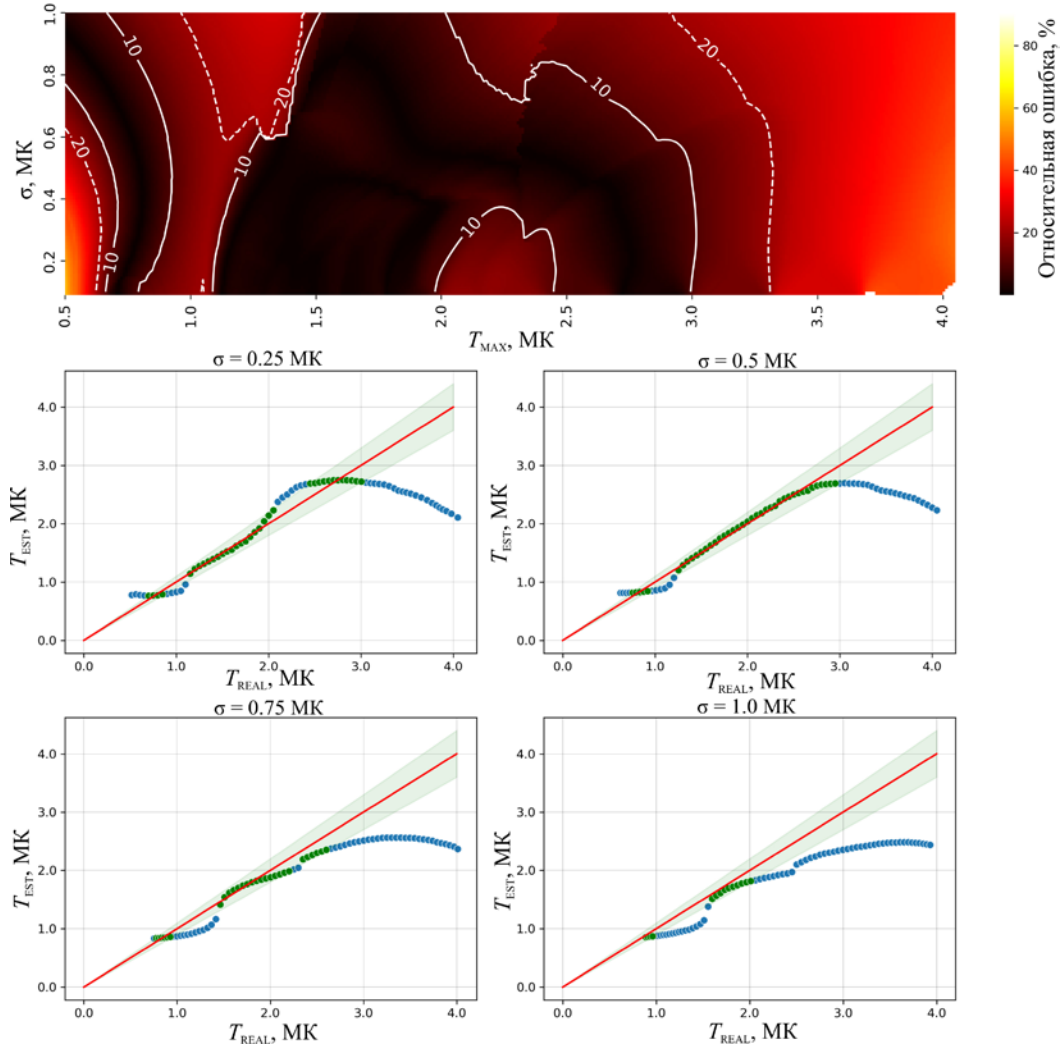


Рис. 2. Оценка положения максимума ДМЭ для тестовой гауссовой ДМЭ. Обозначения те же, что на рис. 1

и σ в диапазоне 0.1–0.5 МК, а также для T_{MAX} в окрестности 3.25 МК и σ во всем рассматриваемом диапазоне.

На рис. 2 показаны относительные ошибки в определении температурного максимума ДМЭ. В данном случае положение максимума ДМЭ определяется достаточно точно на интервале T_{MAX} 1–3 МК практически для всего исследуемого диапазона ширин тестовой ДМЭ. Этот вывод подтверждается также нижними панелями, на которых показана зависимость оценки максимума ДМЭ от положения максимума тестовой ДМЭ.

Тем не менее, профиль ДМЭ реальных нановспышек может иметь более сложную форму, чем функция Гаусса. Для того чтобы оценить, насколько хорошо используемый алгоритм способен восстановить более сложную форму распределения, мы провели ряд тестов для двухтемпературной ДМЭ, представляющей собой сумму двух гауссовых функций. Параметры алгоритма оставались прежними. В табл. 3 показаны параметры тестовой ДМЭ.

На рис. 3 и 4 показана корреляция Пирсона между тестовым и восстановленным профилями ДМЭ и метрики $sMAPE$, используемой для оценки соответствия между двумя кривыми и рассчитываемой по формуле

$$sMAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{|\widehat{DEM}_i - DEM_i|}{\widehat{DEM}_i + DEM_i} 100 \%,$$

где \widehat{DEM} — восстановленная ДМЭ; DEM — тестовая ДМЭ. Видно, что, несмотря на высокую корреляцию восстановленного и тестового профилей в широком диапазоне положений пиков T_{cold} и T_{hot} , ошибка при восстановлении, оцениваемая с помощью $sMAPE$, достаточно велика, чтобы можно было говорить об удовлетворительном восстановлении профиля ДМЭ при данных параметрах алгоритма и тестовой задачи. На рис. 5 показано сравнение тестового и восстановленного температурных профилей ДМЭ для некоторых избранных параметров. Можно заключить, что алгоритму удается распознавать высокотемпературный пик при условии, что он находится примерно на 2.5 МК, что совпадает с областью, в которой канал 211 Å дает наибольший вклад в оценку ДМЭ. При больших температурах отклики каналов ослабевают, что препятствует обнаружению более горячих пиков. Если же горячий пик < 2.0 МК, то, по всей видимости, из-за подавляющего влияния канала 171 Å второй пик не удается идентифицировать. Таким образом, для рассматриваемого набора каналов и выбранного температурного диапа-

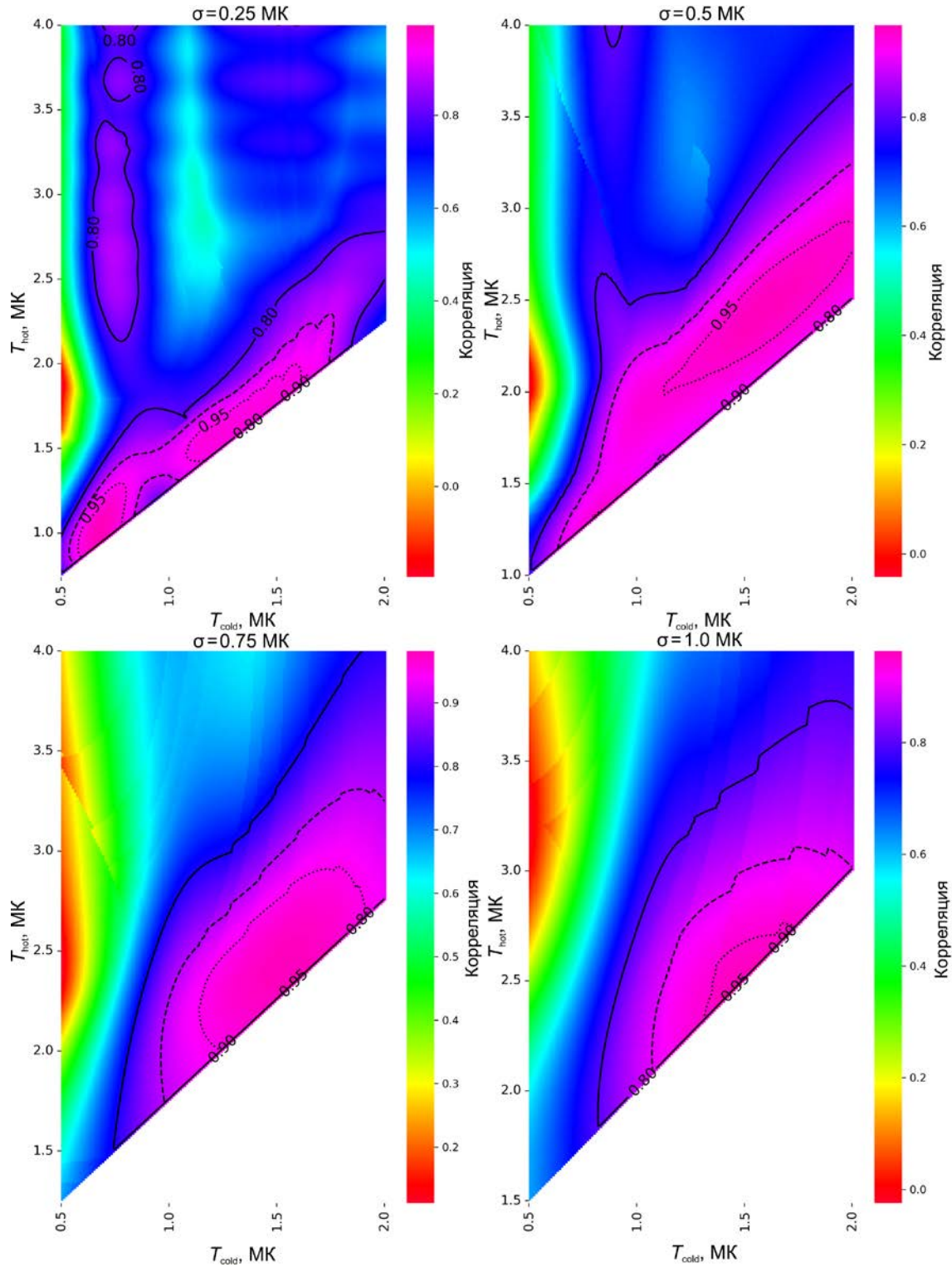


Рис. 3. Корреляция между тестовой двойной гауссовой ДМЭ и оцененной ДМЭ для различных параметров тестовой ДМЭ

зона не представляется возможным достоверно обнаружить двухпиковую структуру ДМЭ для реальных нановспышек, если таковая имеется. Следует отметить, что сам алгоритм способен с достаточной точностью восстанавливать двухпиковую структуру ДМЭ с более горячими пиками, чем были рассмотрены здесь [Morgan, Pickering, 2019]. По итогам данной части исследования можно сделать предварительный теоретический вывод о возможности применения метода SITES для восстановления ДМЭ слабых вспышек,

включая нановспышки. В следующем разделе мы проверяем данное предположение на конкретных событиях.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА SITES

Из проведенного тестирования можно заключить, что использование SITES для оценки ДМЭ нановспышек по каналам 131, 171, 193, 211 Å является однопиковым приближением к реальной ДМЭ нано-

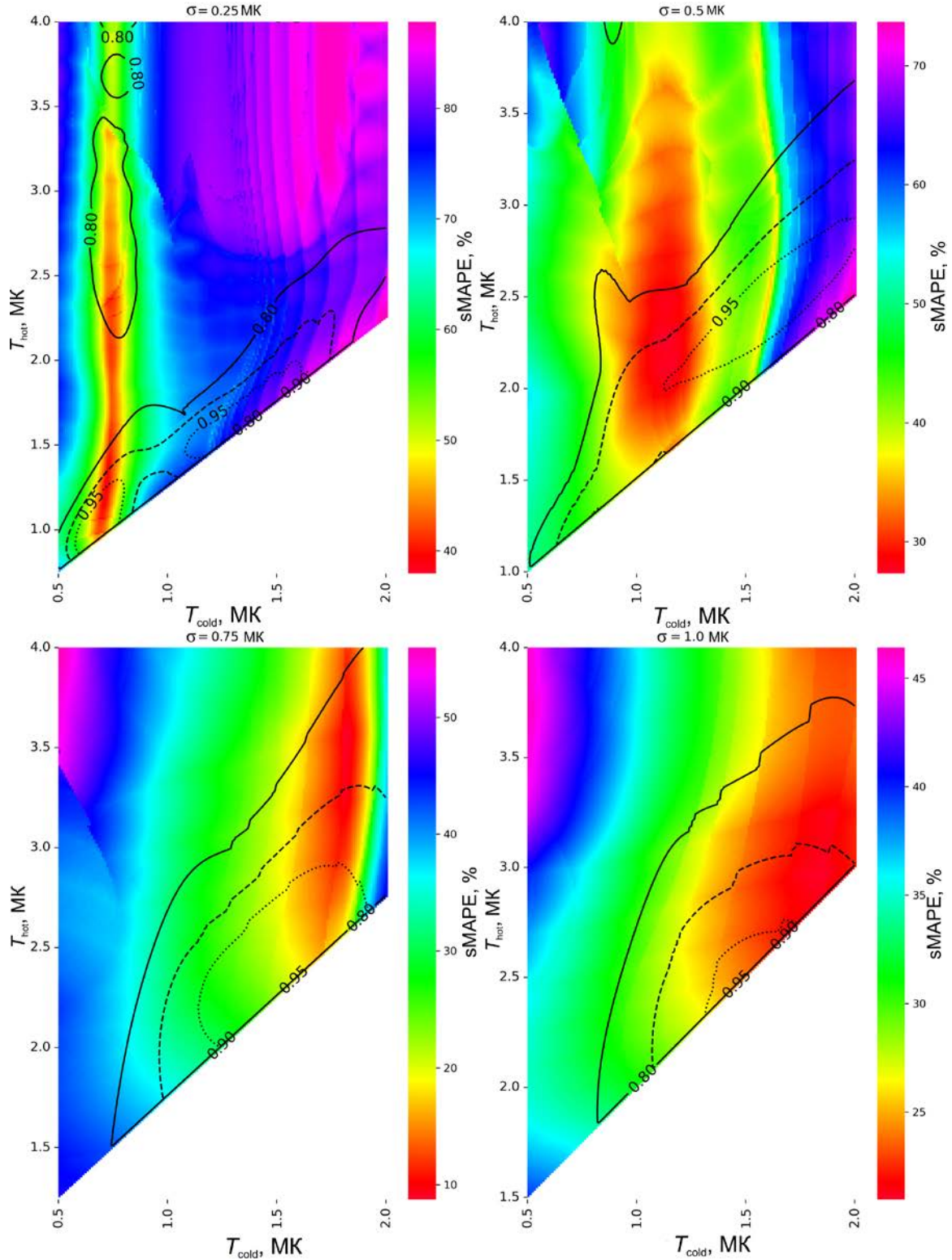


Рис. 4. Метрика $sMAPE$ между тестовой двойной гауссовой ДМЭ и оцененной ДМЭ для различных параметров тестовой ДМЭ. Контурными линиями показан коэффициент корреляции

вспышек. Чтобы оценить данное распределение, мы использовали 58855 найденных нами в работе [Belov et al., 2023] событий независимо в каждом из рассматриваемых каналов для временного промежутка 12:00–13:00 UT 20 мая 2019 г. в двух прямоугольных областях размерами 600×1200 пкс, находящихся в северном и южном полушариях Солнца. Для каждого из найденных событий с по-

мощью SITES были посчитаны ДМЭ в пике и начале событий, а затем отброшены нановспышки, точность определения ДМЭ которых составляла $>5\%$, что привело к потере $\sim 16\%$ данных.

Для пиков рассматриваемых нановспышек по оцененному ДМЭ мы рассчитали средние температуры событий и построили их распределение по температуре (рис. 6). Данное распределение хорошо аппрок-

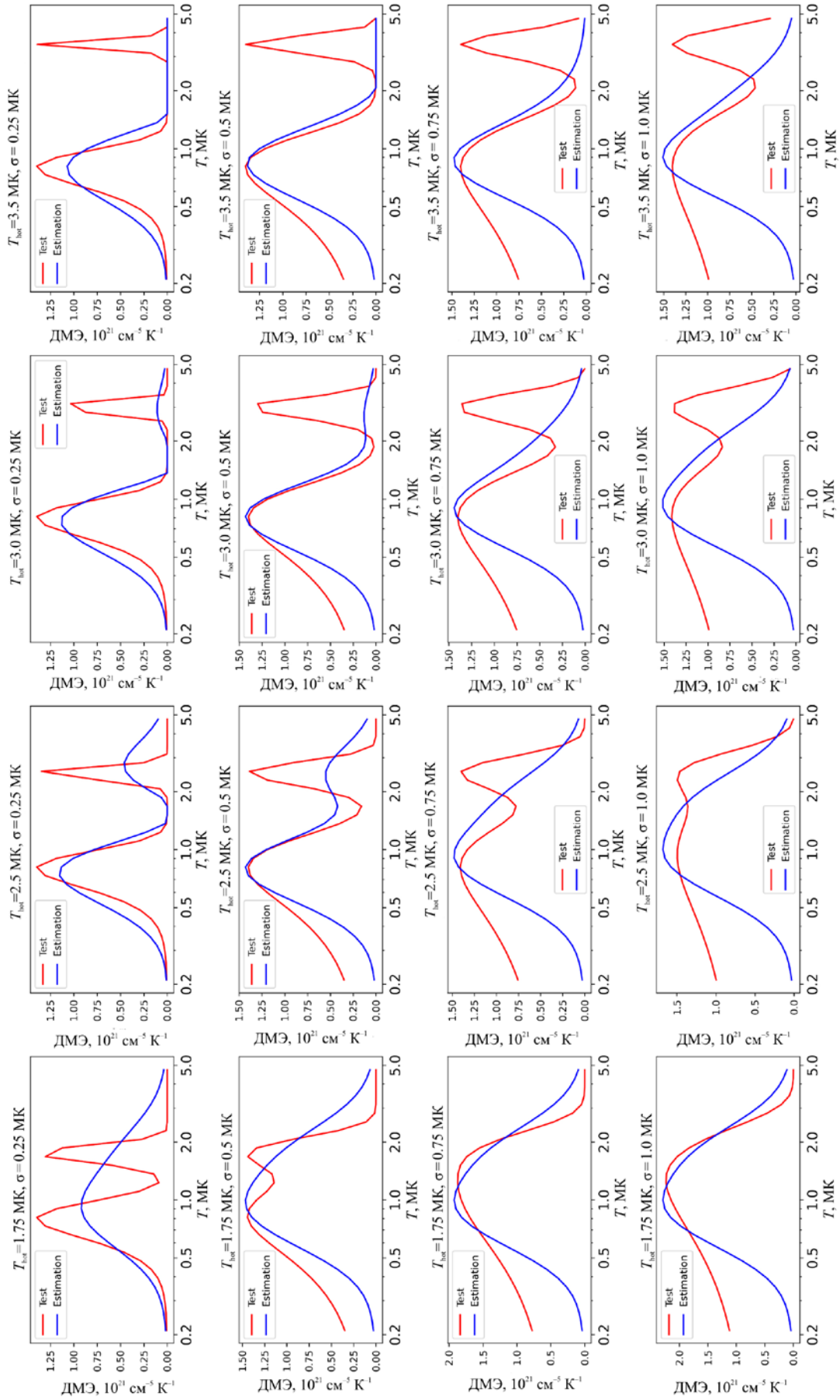


Рис. 5. Профили оцененной ДМЭ для тестовой двойной гауссовой ДМЭ. Красная линия — тестовая кривая, синяя линия — кривая, восстановленная методом SITES

Таблица 4

Параметры кривой для аппроксимации распределения нановспышек по пиковой температуре

Аппроксимирующая кривая	$A_1 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{T-T_1}{\sigma_1}\right)^2\right) + A_2 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{T-T_2}{\sigma_2}\right)^2\right)$
Амплитуда A_1	2353.014
Амплитуда A_2	718.014
Максимум T_1	1.173 МК
Максимум T_2	1.668 МК
Полуширина σ_1	0.126 МК
Полуширина σ_2	0.187 МК

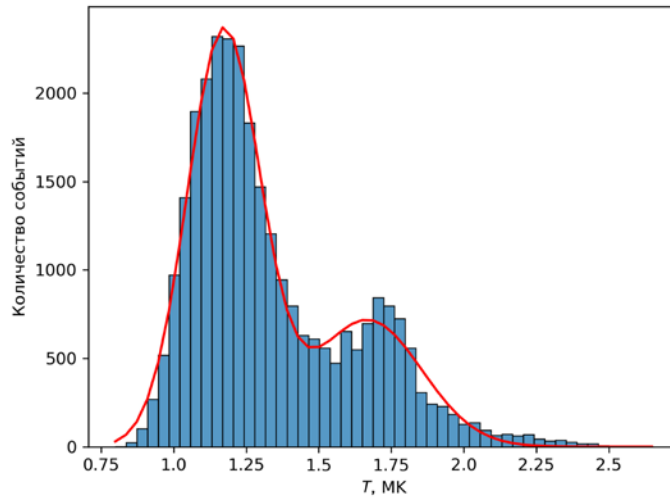


Рис. 6. Распределение нановспышек по пиковой температуре и его аппроксимация двойной гауссовой кривой

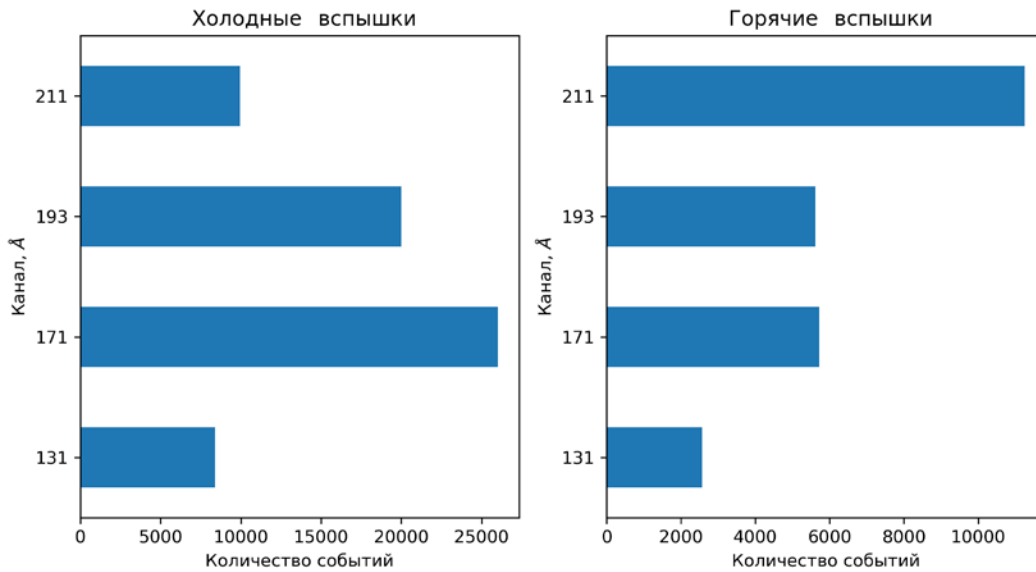


Рис. 7. Распределение холодных и горячих нановспышек по исследуемым каналам

симируется суммой двух гауссовых кривых с параметрами, данными в табл. 4.

На основе полученного распределения по пиковой температуре нановспышки можно разделить на кластеры холодных и горячих нановспышек с границей в 1.48 МК (соответствует минимуму между горбами). На рис. 7 показано количество холодных и горячих вспышек, видимых в каждом из исследуемых каналов. Из построенной диаграммы нетрудно заметить, что канал 211 Å доминирует для горячих вспышек

в то время, как для холодных доминирующая роль принадлежит каналу 171 Å.

Для ДМЭ холодных и горячих нановспышек были рассчитаны уровни 10, 20, 50, 80 и 90 %, а также средние значения (рис. 8). Как и следовало ожидать, полученные ДМЭ имеют однопиковую структуру, при этом для горячих вспышек ДМЭ имеет более пологий профиль, вытянутый примерно до 3 МК. В это же время профиль ДМЭ для холодных вспышек резко обрывается при ~2.5 МК. При сравнении

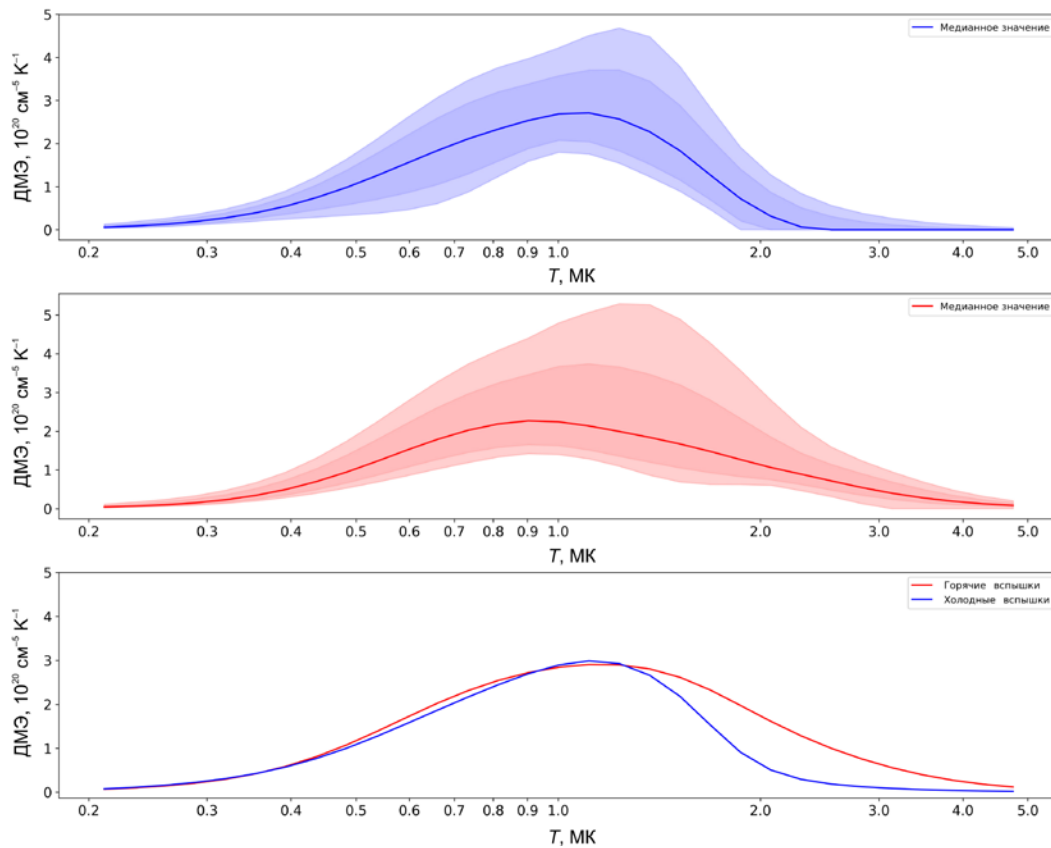


Рис. 8. ДМЭ, рассчитанные для всей совокупности нановспышек. Верхняя панель: медианная ДМЭ (синяя кривая), уровни 10 и 90 % (светлая область), 20 и 80 % (темная область) для холодных вспышек. Средняя панель: медианная ДМЭ (красная кривая), уровни 10 и 90 % (светлая область), 20 и 80 % (темная область) для горячих вспышек. Нижняя панель: средние значения ДМЭ для холодных (синяя кривая) и горячих (красная кривая) вспышек

средних значений ДМЭ отчетливо видно, что ДМЭ горячих нановспышек значительно превышает ДМЭ холодных в диапазоне 2–4 МК.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели работу алгоритма SITES для определения ДМЭ нановспышек по данным каналов 131, 171, 193 и 211 Å в диапазоне температур 0.2–5.0 МК. Было обнаружено, что алгоритм работает преимущественно в однопиковом режиме и достаточно хорошо восстанавливает среднюю температуру и положения максимума гауссовой ДМЭ. Алгоритм может восстановить двухпиковую структуру ДМЭ в том случае, если горячий пик будет расположен в области 2.5 МК. Как следствие, по результатам работы SITES сложно судить о настоящей форме ДМЭ нановспышек, по крайней мере, при его использовании в данном режиме.

С помощью SITES мы оценили ДМЭ в пике нановспышек, видимых в каналах 131, 171, 193 и 211 Å. Было обнаружено, что распределение найденных нановспышек по пиковой температуре имеет форму двойной гауссовой кривой и позволяет разделить исследуемый ансамбль на холодные и горячие нановспышки с границей 1.48 МК. Для найденных температурных кластеров мы рассчитали уровни 10, 20, 50, 80 и 90 %, а также средние значения ДМЭ. Как и следовало ожидать, сглаженные профили ДМЭ

имеют однопиковую структуру, при этом ДМЭ горячих вспышек превышает ДМЭ холодных в диапазоне 2–4 МК.

Насколько нам известно, ранее в литературе (см. ссылки в табл. 1) не приводилось характерного профиля ДМЭ нановспышек. По этой причине мы не можем провести прямого сравнения наших результатов с результатами других авторов, однако найденные пиковые температуры средних ДМЭ для холодных и горячих нановспышек (нижняя панель на рис. 8) лежат в диапазоне 1–2 МК, что согласуется с качественными выводами других авторов и областями температурной чувствительности использованных ультрафиолетовых каналов АІА.

Дальнейшие расчеты полной тепловой энергии нановспышек, а также показателя наклона спектра выходит за рамки данной работы. Он требует введения ряда предположений, неоднозначно трактуемых в литературе. К ним относится вопрос о коэффициенте заполнения горячей плазмой объема, наблюдаемого в каждом пикселе, а также вопрос о методе кластеризации многопиксельных уярчений в одно нановспышечное событие. Оба этих вопроса существенно влияют на результат определения энергии нановспышек и требуют отдельного подробного исследования в будущем.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект 22-22-00879). Реализация

метода SITES для расчета ДМЭ проводилась в ходе работ по проекту FSSS-2023-0009, поддержанному Министерством высшего образования и науки в рамках государственного задания вузам и научным организациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богачёв С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С. и др. Микровспышки и нановспышки в короне Солнца. *Успехи физических наук*. 2020. Т. 190, №. 8. С. 838–858. DOI: [10.3367/UFNr.2019.06.038769](https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038769).
- Aschwanden M.J., Parnell C.E. Nanoflare statistics from first principles: fractal geometry and temperature synthesis. *Astrophys. J.* 2002. Vol. 572, no. 2. P. 1048. DOI: [10.1086/340385](https://doi.org/10.1086/340385).
- Aschwanden M.J., Tarbell T.D., Nightingale R.W., Wolfson C.J. 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, no. 2. P. 1047. DOI: [10.1086/308867](https://doi.org/10.1086/308867).
- Belov S.A., Bogachev S.A., Ledentsov L.S., Zavershinskii D.I. Solar nanoflares in different spectral ranges. *Astron. Astrophys.* 2024. Vol. 684. P. A60. DOI: [10.1051/0004-6361/202348199](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348199).
- Benz A.O., Krucker S. Energy distribution of microevents in the quiet solar corona. *Astrophys. J.* 2002. Vol. 568, no. 1. P. 413. DOI: [10.1086/338807](https://doi.org/10.1086/338807).
- Berghmans D., Clette F., Moses D. Quiet Sun EUV transient brightenings and turbulence. A panoramic view by EIT on board SOHO. *Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 336. P. 1039–1055.
- Cheng Zhang J., Saar S.H., Ding M.D. Differential emission measure analysis of multiple structural components of coronal mass ejections in the inner corona. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 761, no. 1. P. 62. DOI: [10.1088/0004-637X/761/1/62](https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/62).
- Chitta L.P., Peter H., Young P.R. Extreme-ultraviolet bursts and nanoflares in the quiet-Sun transition region and corona. *Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 647. P. A159. DOI: [10.1051/0004-6361/202039969](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039969).
- Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data. *Astron. Astrophys.* 2012. Vol. 539. P. A146. DOI: [10.1051/0004-6361/201117576](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576).
- Heinemann S.G., Saqri, J., Veronig A.M., et al. Statistical approach on differential emission measure of coronal holes using the CATCH catalog. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, no. 18. P. 1–17. DOI: [10.1007/s11207-020-01759-0](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01759-0).
- Hudson H.S. Solar flares, microflares, nanoflares, and coronal heating. *Solar Phys.* 1991. Vol. 133. P. 357–369. DOI: [10.1007/BF00149894](https://doi.org/10.1007/BF00149894).
- Joulin V., Buchlin E., Solomon J., Guennou C. Energetic characterisation and statistics of solar coronal brightenings. *Astron. Astrophys.* 2016. Vol. 591. P. A148. DOI: [10.1051/0004-6361/201526254](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526254).
- Krucker S., Benz A.O. Energy distribution of heating processes in the quiet solar corona. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 501, no. 2. P. L213. DOI: [10.1086/311474](https://doi.org/10.1086/311474).
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Massa P., Gordon Emslie A., Hannah I.G., Kontar E.P. Robust construction of differential emission measure profiles using a regularized maximum likelihood method. *Astron. Astrophys.* 2023. Vol. 672. DOI: [10.1051/0004-6361/202345883](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202345883).
- Morgan H., Pickering J. Sites: Solar iterative temperature emission solver for differential emission measure inversion of EUV observations. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294, no. 135. P. 135. DOI: [10.1007/s11207-019-1525-4](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1525-4).
- Parker E.N. Nanoflares and the solar X-ray corona. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 330. P. 474–479. DOI: [10.1086/166485](https://doi.org/10.1086/166485).
- Purkhart S., Veronig A.M. Nanoflare distributions over solar cycle 24 based on SDO/AIA differential emission measure observations. *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 661. P. A149. DOI: [10.1051/0004-6361/202243234](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243234).
- Ulyanov A.S., Bogachev S.A., Reva A.A., et al. The energy distribution of nanoflares at the minimum and rising phase of solar cycle 24. *Astron. Lett.* 2019. Vol. 45, no. 4. P. 248–257. DOI: [10.1134/S1063773719040078](https://doi.org/10.1134/S1063773719040078).
- Van Doorselaere T., Srivastava A.K., Antolin P., et al. Coronal heating by MHD waves. *Space Sci. Rev.* 2020. Vol. 216, no. 140. P. 1–40. DOI: [10.1007/s11214-020-00770-y](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00770-y).
- Vanninathan K., Veronig A.M., Dissauer K., et al. Coronal response to an EUV wave from DEM analysis. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 812, no. 2. P. 173. DOI: [10.1088/0004-637X/812/2/173](https://doi.org/10.1088/0004-637X/812/2/173).

Как цитировать эту статью:

Белов С.А., Леденцов Л.С., Завершинский Д.И., Богачёв С.А. Дифференциальная мера эмиссии солнечных нановспышек, определенная с помощью алгоритма SITES. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 4–14. DOI: [10.12737/szf-102202401](https://doi.org/10.12737/szf-102202401).