

СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ ПЛАЗМЫ И НЕТЕПЛОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ

© 2023 г. И. Н. Шарыкин^{1,*}, И. В. Зимовец¹, А. Г. Косовичев²

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Технологический институт Нью-Джерси, Ньюарк, США

*E-mail: ivan.sharykin@physstech.edu

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Приводятся результаты статистического анализа различных параметров тепловой плазмы и нетепловых рентгеновских спектров гелиосейсмически активных (продуцирующих “солнцетрясения”) солнечных вспышек 24-го солнечного цикла до февраля 2014 г. Сравниваются две выборки вспышек: с гелиосейсмической активностью в виде солнцетрясений и без фотосферных возмущений. Также исследованы зависимости рассматриваемых параметров вспышек от энергии гелиосейсмических возмущений. Количественные параметры солнечных вспышек берутся из статистических работ серии “Global Energetics”, выполненных Маркусом Ашванденом в 2014–2019 гг. Рассматриваются термодинамические параметры плазмы, полученные из анализа рентгеновских спектров RHESSI и дифференциальной меры эмиссии (по ультрафиолетовым изображениям AIA), а также характеристики нетепловых рентгеновских спектров по RHESSI. Статистический анализ подтвердил, что гелиосейсмически активные солнечные вспышки характеризуются значительно большими потоками нетеплового рентгеновского излучения по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Найдена линейная взаимосвязь гелиосейсмической энергии с полным потоком нетеплового рентгеновского излучения, а также полной энергией ускоренных электронов. Показано, что степенной индекс нетеплового рентгеновского спектра не является тем параметром, по которому можно разделить две рассматриваемые группы вспышек. Анализ рентгеновских тепловых спектров показывает небольшое отличие вспышек с солнцетрясениями от вспышек без фотосферного отклика. Анализ дифференциальной меры эмиссии выявил тождественность двух выборок вспышек. Обсуждается найденная корреляция энергии солнцетрясений с параметрами тепловой плазмы. В целом полученные статистические результаты косвенно свидетельствуют в пользу теории генерации солнцетрясений пучками ускоренных электронов, инжектированных в плотные слои солнечной атмосферы.

Ключевые слова: солнечные вспышки, гелиосейсмические возмущения, рентгеновское излучение, ускоренные электроны, фотосфера, ультрафиолетовое излучения

DOI: 10.31857/S0004629923110099, EDN: FWNACW

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка, проявляющая себя во всех диапазонах электромагнитного спектра, является уникальной естественной лабораторией физики плазмы, предоставленной нам природой для всестороннего исследования. Современные как наблюдательные, так и теоретические исследования вспышек посвящены самым различным аспектам их энерговыделения: магнитное пересоединение, ускорение заряженных частиц, связь с корональными выбросами массы (КВМ) и др. Среди всего многообразия различных видов энерговыделения солнечных вспышек одним из наименее изученных является гелиосейсмическое

возмущение. Считается, что сильные фотосферные возмущения во время солнечных вспышек с оптическим свечением сопровождаются генерацией гелиосейсмических волн, известных как “солнцетрясения” (англ. sunquakes). Возможность такого явления первоначально обсуждалась в работе [1]. Затем было сделано теоретическое предсказание [2] на базе газодинамического численного моделирования. Впервые солнцетрясение было обнаружено [3] с помощью доплерограмм прибора MDI (Michelson Doppler Imager, [4]) на борту орбитальной гелиосферной обсерватории SOHO (Solar Orbital Heliospheric Observatory, [5]).

Обычно гелиосейсмические волны наблюдаются на доплерограммах (фотосферные карты скоростей по лучу зрения) в виде концентрических (обычно сильно анизотропных) волн, распространяющихся от начальных фотосферных вспышечных возмущений, наблюдаемых во время импульсной фазы в виде ярких и темных контрастных групп пикселей. С точки зрения физики, солнцетрясения представляют собой акустические волны, проходящие через солнечную конвективную зону и возвращающиеся обратно к фотосфере за счет рефракции (из-за преломления, вызванного возрастающей с глубиной температурой). Выходящие изнутри Солнца в фотосферу волновые фронты наблюдаются на доплерограммах в виде пакетов бегущих круговых волн с характерной пространственно-временной зависимостью. Гелиосейсмические возмущения обычно связаны с достаточно компактными возмущениями фотосферы и появлением оптического излучения вблизи акустических источников, реконструированных методом гелиосейсмической (или акустической) голографии [6–9].

Обзор наблюдательных свойств солнцетрясений, морфологии гелиосейсмических вспышек и теории их генерации можно найти в статьях [10, 11]. Мы кратко упомянем только основные гипотезы возникновения солнцетрясений. Наиболее обсуждаемым механизмом генерации первоначального фотосферного возмущения является инжекция ускоренных электронов в нижние слои солнечной атмосферы. Данная гипотеза предполагает, что солнцетрясение возникает в результате реакции на непосредственный быстрый нагрев фотосферы инжектируемыми ускоренными электронами [2], что подтверждается тесной временной и пространственной связью очагов солнцетрясений с источниками жесткого рентгеновского излучения [например, 12–14]. Недавнее гелиосейсмическое моделирование солнцетрясений, проведенное [15], показало, что, по крайней мере, половина изученных событий согласуется с гипотезой электронного пучка. Еще более мощным агентом инициации солнцетрясений могут быть ускоренные протоны [16]. Возможно, что эффект разогрева фотосферы ультрафиолетовым излучением вспышки также может вызвать возмущение давления, необходимое для генерации волн солнцетрясений [10]. Другая альтернативная гипотеза допускает, что импульс фотосферной плазме может передаваться за счет динамики градиента давления из-за эрупции магнитного жгута (например, [17, 18]) или за счет импульса силы Лоренца, который может быть стимулирован изменением магнитного поля в нижней части солнечной атмосферы [19–23]. В работах [24, 25] обсуждалось, что быстрая диссипация электрических токов в нижней атмосфере также может объяснить возникновение

солнцетрясений. Возможно, разные события могут быть вызваны разными механизмами, или же описанные механизмы могут действовать вместе и их вклад также может изменяться во время развития вспышки.

Несмотря на наличие ряда гипотез, опирающихся на наблюдательный материал и небольшое количество моделей, мы констатируем факт, что до конца природа солнцетрясений не понятна. Это связано с несколькими аспектами. Во-первых, детально разработанных теоретических моделей генерации солнцетрясений фактически нет. Во-вторых, наблюдательный материал по гелиосейсмически активным солнечным вспышкам относительно беден и иногда противоречив в сравнении с другими активно исследуемыми аспектами энерговыделения солнечных вспышек. В действительности все наблюдательные работы обычно посвящены фрагментарным исследованиям отдельных событий. Статистических исследований свойств солнечных вспышек, сопровождающихся солнцетрясениями, фактически не проводилось. Однако на сегодняшний день такое исследование возможно благодаря наличию нескольких каталогов гелиосейсмически активных солнечных вспышек. Более того, есть первые результаты статистических исследований, важные для понимания природы солнцетрясений.

Первые каталоги гелиосейсмически активных солнечных вспышек были представлены в [9] и [26] для 23-го и 24-го солнечных циклов (до февраля 2014 г.). В каталогах для этих циклов приведены 23 и 18 гелиосейсмических события соответственно, в первой работе рассматривались только вспышки с наблюдавшимся жестким рентгеновским излучением выше 50 кэВ (по каталогу RHESSI, Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, [27]). В работе [28] методом акустической голографии проанализировано 60 мощных вспышек (с рентгеновским классом GOES выше M5) в 24-м солнечном цикле для поиска солнцетрясений методом гелиосейсмической голографии (англ. Acoustic Holography [8]). В общей сложности 24 вспышки были признаны сейсмически активными. Однако в данной работе статистических исследований каких-либо параметров вспышек не проводилось.

Наиболее полный каталог гелиосейсмически активных солнечных вспышек 24-го цикла описан в работе [29] (далее на данный каталог мы будем ссылаться как на SQ24), где использовались данные наблюдений инструмента Helioseismic Magnetic Imager (HMI, [30]) на борту космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO, [31]). В рамках данного исследования были обнаружены 94 вспышки с надежно отождествленными солнцетрясениями и небольшая группа потенциально возможных кандидатов. Также бы-

ло проведено статистическое исследование данных наблюдений GOES полного потока мягкого рентгеновского излучения в канале 1–8 Å и показано, что мощность солнечных вспышек коррелирует с максимумом производной потока мягкого рентгеновского излучения, а не рентгеновским (GOES) классом вспышки. Данный факт косвенно указывает на то, что природа солнечных вспышек связана с наличием популяций ускоренных электронов во вспышечной области. Такой вывод был сделан на основании эффекта Нойперта [32, 33], утверждающего, что производная потока мягкого теплового рентгеновского излучения коррелирует с потоком жесткого рентгеновского излучения. Этот эффект является результатом нагрева хромосферы электронным пучком, а нетепловое рентгеновское излучение генерируется электронным пучком в результате кулоновских столкновений с ионами плазмы [34]. Пучок нагревает хромосферную плазму до корональных температур, вызывая ее испарение и увеличение потоков теплового мягкого рентгеновского излучения в короне, как следует из моделирования радиационной гидродинамики [35–38]. Однако реальная информация об ускоренных электронах не может быть получена только при использовании косвенных эффектов. Необходим анализ спектров жесткого рентгеновского излучения или микроволнового радиоизлучения.

На сегодняшний день известна единственная попытка статистического анализа рентгеновских спектров применительно к гелиосейсмически активным вспышкам [39]. В данной работе представлен сравнительный анализ нетепловой энергии двух выборок мощных (GOES класс в диапазоне M7.2–X6.9) вспышек: 12 вспышек с солнечными вспышками, 8 вспышек без фотосферных возмущений. В работе [39] утверждается, что гелиосейсмически активные вспышки характеризуются более высокими интегральными энергиями нетепловых электронов (нетепловая энергия) выше 300 кэВ, тогда как полная нетепловая энергия электронов с энергиями выше 50 кэВ в среднем практически не отличается в этих двух группах. Другими словами, вспышки с солнечными вспышками “жестче” по спектрам с преобладанием высокоэнергичных ускоренных электронов. Однако с нашей точки зрения статистика в данной работе достаточно бедна и сводится только к сравнению жесткости спектра ускоренных частиц без рассмотрения других параметров, получаемых из анализа рентгеновского излучения. Кроме того, сравнение гистограмм в данной работе не позволяет сделать четкий вывод о различии спектров в высоких энергиях.

Данная статья посвящена детальному статистическому исследованию гелиосейсмически активных солнечных вспышек из каталога SQ24. Основной целью является получение новой ин-

формации о свойствах вспышек с солнечными вспышками, необходимой для понимания физики данного явления. В частности, мы собираемся подкрепить новыми наблюдательными статистическими данными наиболее естественную (на наш субъективный взгляд) гипотезу о генерации солнечных вспышек ускоренными электронами. В рамках данной работы решаются две основные задачи:

1) статистическое исследование термодинамических параметров солнечных вспышек с солнечными вспышками на базе наблюдений рентгеновского излучения по данным RHESSI и на базе анализа дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ), полученных по данным наблюдений экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) инструментом Atmospheric Imaging Assembly (AIA, [40]) на борту SDO;

2) статистическое исследование параметров нетепловых рентгеновских спектров солнечных вспышек с солнечными вспышками на базе наблюдений рентгеновского излучения по данным RHESSI. Определение нетепловых энергий солнечных вспышек.

Стоит заметить, что первая задача не касается прямым образом основных гипотез генерации солнечных вспышек. Решение данной задачи необходимо, прежде всего, для формирования общего взгляда на морфологию и тепловой отклик вспышек с гелиосейсмической активностью. Термодинамические и нетепловые параметры будут браться из опубликованных каталогов других авторов (подробно в следующем разделе). Каждая из двух задач методологически расщепляется на:

1) сравнительный анализ вспышек с солнечными вспышками и без фотосферных возмущений (вспышки с фотосферными возмущениями не обязательно дают солнечные вспышки) по различным тепловым и нетепловым параметрам;

2) анализ корреляционных связей между различными исследуемыми параметрами вспышек и энергией гелиосейсмических волн, оцененных с помощью метода акустической голографии.

Статья состоит из пяти разделов, не считая Введения. В первом разделе кратко описан каталог SQ24, а также каталоги, из которых мы берем необходимые параметры в рамках двух рассматриваемых задач. Затем в следующем разделе рассматривается статистика параметров тепловой плазмы по данным рентгеновской спектроскопии RHESSI. В третьем, самом крупном разделе статьи, обсуждается статистика параметров нетеплового рентгеновского спектра по тем же данным RHESSI. Также здесь приводятся статистические данные по нетепловой энергии ускоренных частиц в рассматриваемых группах вспышек. В четвертом разделе описаны результаты статистического анализа параметров тепловой плазмы,

полученных из анализа дифференциальной меры эмиссии по данным AIA. В конце каждого из разделов 2–4 мы приводим списки основных результатов статистического анализа, чтобы разгрузить последний раздел, в котором мы обсуждаем главные выводы и результаты статьи.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И КАТАЛОГИ, ОТБОР ВСПЫШЕК ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Обсудим основные аспекты выполненной работы по поиску гелиосейсмических вспышек для каталога SQ24 [29]. Все отобранные солнечные вспышки за 24-й цикл анализировались на наличие гелиосейсмических волн по доплерограммам HMI/SDO следующими методами:

1) визуальный метод, основанный на создании фильмов, на которых показана временная последовательность разностных доплерограмм HMI, фильтрованных в диапазоне частот 5–7 мГц;

2) метод построения диаграмм время–расстояние с различным усреднением из точек, где наблюдались наиболее сильные фотосферные возмущения на доплерограммах;

3) восстановление карт источников гелиосейсмических волн методом акустической голографии [8].

Вспышка считалась гелиосейсмически активной, если один из этих трех методов давал положительный результат. Всего было проанализировано 507 солнечных вспышек M и X GOES класса за 24-й цикл с расстоянием от центра диска Солнца до 800 угл. сек. Кол-во солнечных вспышек с фотосферными возмущениями, видимыми на доплерограммах, и с оптическим свечением составляло 181. Кол-во солнечных вспышек с гелиосейсмическими возмущениями, которые были зарегистрированы, как минимум, одним из трех методов: 93 (плюс 19 кандидатов) в 35 активных областях. Таким образом, с учетом кандидатов, более половины событий с фотосферными возмущениями сопровождалась генерацией гелиосейсмических волн. В данной работе мы будем рассматривать только те гелиосейсмически активные вспышки (80 событий), в которых удалось зарегистрировать акустические источники методом акустической голографии. Для таких вспышек у нас есть оценки полной энергии солнцетрясения в частотном диапазоне 5–7 мГц. И поэтому для данных вспышек мы будем способны провести корреляционный анализ между энергией гелиосейсмического возмущения и различными параметрами в рамках решаемых двух задач (см. Введение).

На панели рис. 1а показана зависимость полной акустической энергии от GOES класса (максимальное значение потока рентгеновского излу-

чения в канале 1–8 Å). Панель b этого же рисунка демонстрирует зависимость максимального значения временной производной потока 1–8 Å от энергии гелиосейсмического возмущения. Все события, обозначенные на графиках красным и синим цветом (значение данных цветов обсудим немного ниже), являются реальными гелиосейсмически активными вспышками, тогда как черный цвет соответствует событиям-кандидатам в каталоге SQ24. Для наглядности на рисунках приводятся значения коэффициентов корреляции для разных групп вспышек (по Пирсону и ранговая корреляция), чтобы продемонстрировать более сильную связь производной с энергией солнцетрясения. При учете кандидатов в солнцетрясения, коэффициент корреляция становится ниже (0.4 и 0.57 для a и b). В данной статье далее мы не будем использовать кандидатов для расширения статистики и ограничимся только “надежными” событиями.

Далее мы обсудим используемые каталоги с параметрами солнечных вспышек. Прежде всего стоит отметить, что мы решили не проводить свой собственный глобальный анализ параметров солнечных вспышек в силу крайней сложности такой работы. Было решено использовать результаты других статистических исследований, в которых рассматривались солнечные вспышки без привязки к гелиосейсмическим эффектам. На сегодняшний день существуют уникальные каталоги с большим количеством параметров солнечных вспышек, определенных в рамках проекта “глобальная энергетика солнечных вспышек” (англ. Global Energetics of Solar Flares), изложенного в серии из 12 статей, опубликованных с 2014 по 2020 г. Маркусом Ашванденом (Markus Aschwanden). В данных работах рассматривались самые разные аспекты энерговыделения солнечных вспышек 24-го цикла солнечной активности в диапазоне дат 01.06.2010–31.01.2014: параметры тепловой плазмы, характеристики ускоренных электронов, динамика КВМ, магнитные энергии и др. Все таблицы из данных работ опубликованы в интернете на сайте VizieR On-line Data Catalog. В нашей работе мы будем касаться только двух статей, в которых описан анализ параметров тепловых и нетепловых рентгеновских спектров [41] (далее обозначаем как каталог GEVIII, см. <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/881/1>) и характеристики тепловой плазмы, полученные с помощью ДМЭ анализа [42] (далее обозначаем как каталог GEII, см. <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/802/53>).

Красным цветом на рис. 1 мы выделили те вспышки из каталога SQ24, для которых был проведен анализ рентгеновских спектров (всего 22 вспышки) в рамках работы [41], по которой составлен каталог GEVIII. Примечателен тот факт, что для данной ограниченной выборки коэффи-

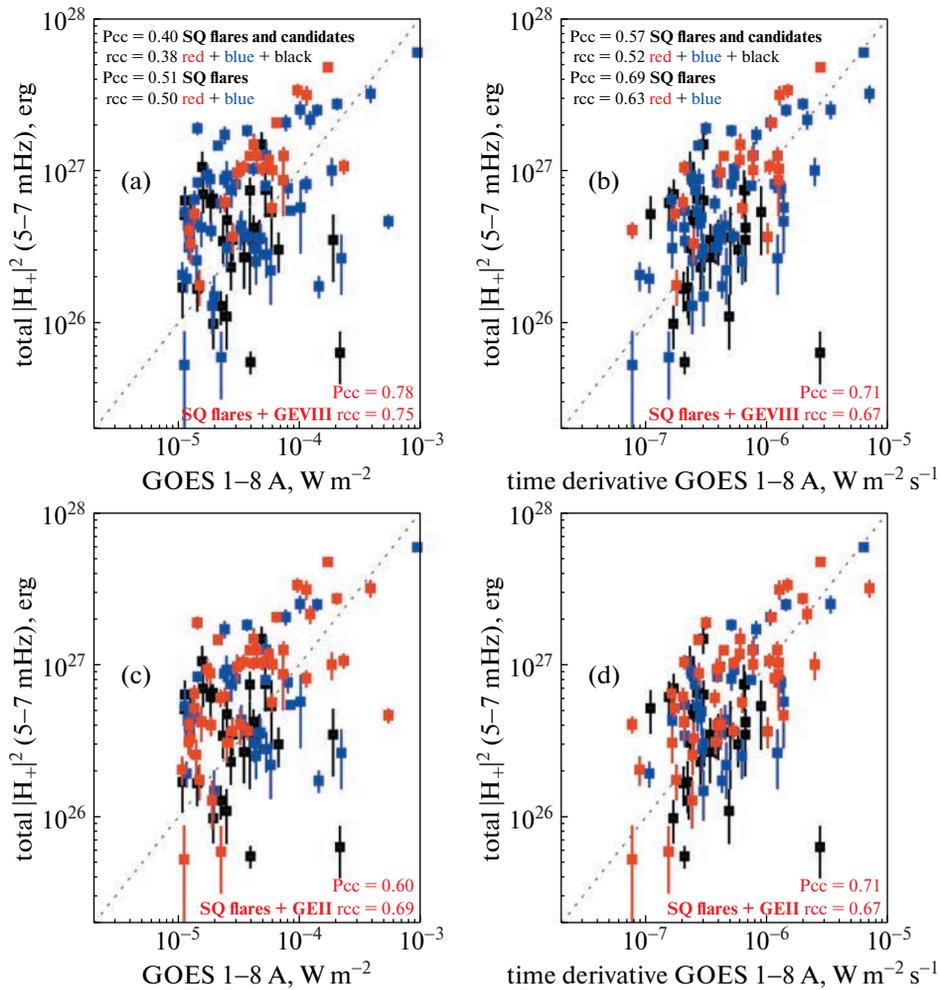


Рис. 1. Зависимости полной акустической мощности солнцетрясений из каталога SQ24 в диапазоне частот 5–7 мГц от GOES класса вспышки (а, с) и максимума производной по времени в канале GOES 1–8 Å (b, d). Вспышки с надежной регистрацией солнцетрясения, для которых был проанализирован рентгеновский спектр в GEVIII (обозначено как “SQ flares + GEVIII”), показаны красным на панелях а и b. Вспышки с солнцетрясениями, для которых анализировалась ДМЭ в рамках каталога GEII (обозначено как “SQ flares + GEVII”), показаны красным цветом на панелях с и d. Синий цвет обозначает события вне каталога GEVIII (а и b) и GEII (с и d). Черным цветом показаны вспышки – кандидаты в солнцетрясения из каталога SQ24. Пунктир соответствует биссектрисе. Коэффициенты корреляции Пирсона (Pcc) и ранговый (rcc) показаны непосредственно на панелях.

коэффициент корреляции равен 0.78 по Пирсону на рис. 1a (против 0.71 для панели 1b), где по оси абсцисс мы рассматриваем GOES класс. Данные значения не согласуются с результатами анализа всей выборки из SQ24: для всей совокупности синих и красных точек мы имеем коэффициент корреляции по Пирсону 0.51 (рис. 1a) и 0.69 (рис. 1b). Скорее всего, данное разногласие связано именно с малостью выборки. В рамках выборки с 22 событиями не удастся точно сказать, на сколько одна корреляция лучше другой. Сравнение 0.71 и 0.78 указывает на то, что обе корреляции достаточно хороши с учетом ошибки коэффициента корреляции (стандартное отклонение): ± 0.16 и ± 0.14 . Дальнейший статистический ана-

лиз параметров вспышек уточнит реальные взаимосвязи. В случае же рассмотрения вспышек, для которых проведен ДМЭ анализ (каталог GEII), мы имеем выборку из 46 событий. В этом случае сравнение корреляций для аналогичных зависимостей на рис. 1c, 1d не показывает существенных расхождений с результатами работы [29]: 0.6 ± 0.11 для GOES класса и 0.71 ± 0.12 для производной по времени.

В разделе, в котором будем рассматривать корреляционные зависимости энергии солнцетрясений от различных параметров, мы будем оценивать достоверность корреляции t-критерием с порогом доверительной вероятности 95 процентов. В случае удовлетворения критерию мы будем на-

зывать корреляцию удовлетворительной. Для порогов доверительной вероятности 99 и 99.9% корреляция будет называться соответственно хорошей и отличной. При сравнении нормированных распределений параметров двух групп вспышек (с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений) мы будем использовать U-критерий Манна–Уитни (сравнение медиан распределений, функция ‘rs_test.pro’ в IDL) и тест Колмогорова–Смирнова (процедура ‘kstwo.pro’ в IDL) с порогом вероятности 5%. Другими словами, различающиеся распределения будут обладать меньшими вероятностями совпадений распределений и их медиан. Причем важно также будет сравнивать абсолютные значения медиан. Критерии могут указать на различие в распределениях, но медианы будут отличаться очень слабо и явного физического смысла в разнице между распределениями не будет. С нашей субъективной точки зрения разница в медианах примерно в три раза дает минимальный порог, при котором мы будем говорить о разнице между распределениями в среднем. Если мы имеем число пять и даже порядок, то мы говорим о явном различии между распределениями в среднем. Само собой, при этом используемые критерии должны давать малые вероятности. Особенно важно при сравнении распределений выявить те параметры, по которым мы имеем наибольшую разницу.

Далее в тексте мы обсудим некоторые детали методов расчета параметров вспышек для каталогов GEII и GEVIII. Далее следующие три раздела будут посвящены конкретным задачам статистического анализа: анализ параметров тепловой плазмы по рентгеновским спектрам RHESSI, статистика параметров нетепловых спектров рентгеновского излучения по RHESSI, анализ параметров тепловой плазмы по анализу ДМЭ, полученных с помощью ультрафиолетовых изображений AIA.

3. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ПЛАЗМЫ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Сравнивая каталоги GEVIII и SQ24, мы находим 22 вспышки, в которых были исследованы рентгеновские спектры для энергий более 3 кэВ (границы анализа спектра плавающие) на длительности всего события. Стоит отметить, что мы используем таблицы из статьи [41], хотя ранее была опубликована статья [43], где также рассматривается анализ тепловой плазмы и нетепловой энергии ускоренных электронов по данным RHESSI. Наш выбор в пользу более позднего каталога продиктован тем фактом, что каталог на базе первой работы 2016 г. показывает параметры рентгеновских спектров только с позиции модели “теплой мишени” (“warm target”, [44]), в которой

низкоэнергетическая граница спектра ускоренных электронов определяется температурой плазмы и степенным индексом. Более поздний каталог GEVIII является расширенным каталогом версии 2016 г. с использованием различных моделей низкоэнергетической границы спектра ускоренных электронов. В этом разделе мы не будем говорить о проблеме низкоэнергетической границы (см. следующий раздел), поскольку здесь мы будем обсуждать только параметры теплового рентгеновского спектра: максимальной температуры, меры эмиссии и тепловой энергии плазмы. Данные параметры, а также оценки характерных линейных размеров вспышечной области и длительности вспышки доступны в сети Интернет только для каталога GEVIII.

На рис. 2 приводится сравнение нормированных распределений (гистограммы) различных параметров вспышек для двух выборок: 22 вспышки с гелиосейсмическим откликом (красный цвет) и 72 вспышки без фотосферных возмущений (черный цвет). Для сравнения мы также указываем значения медиан распределений и отношение двух медиан. Наибольшие отличия по медианам характерны для распределений максимальной меры эмиссии EM (рис. 2а), оценки плотности тепловой плазмы $n_{th} = \sqrt{EM/L^3}$ (рис. 2е) и максимальной тепловой энергии $E_{th} = 3k_B T \sqrt{EM/L^3}$ (рис. 2д), где L — характерный линейный масштаб вспышечной области. Также для этих распределений больше всего бросается в глаза их относительный сдвиг, как “в целом”, так и с точки зрения положения максимума распределения.

Для рассматриваемых двух выборок распределения линейных масштабов (рис. 2с), максимальных температур (рис. 2б) и характерных длительностей вспышек (рис. 2ф) практически одинаковы с точки зрения формы распределения, положения максимумов и медиан. Оценка характерного масштаба длины вспышечной области есть результат анализа карт ДМЭ (подробнее в работе [45]), в которых выделялись области выше некоторого фиксированного значения меры эмиссии. Длительности вспышек в GEVIII брались из GOES каталога как разница между временем конца события и его начала.

Стоит заострить особое внимание на идентичности распределений характерных длительностей вспышек. Дело в том, что этот факт противоречит выводам работы [29], в которой рассматривались временные характеристики вспышек с солнцетрясениями на базе данных GOES и было показано, что вспышки с солнцетрясениями в среднем короче по длительности по сравнению со вспышками без фотосферного отклика. Однако в работе [29] длительности импульсных фаз определялись по кривой производной потока мягкого рентге-

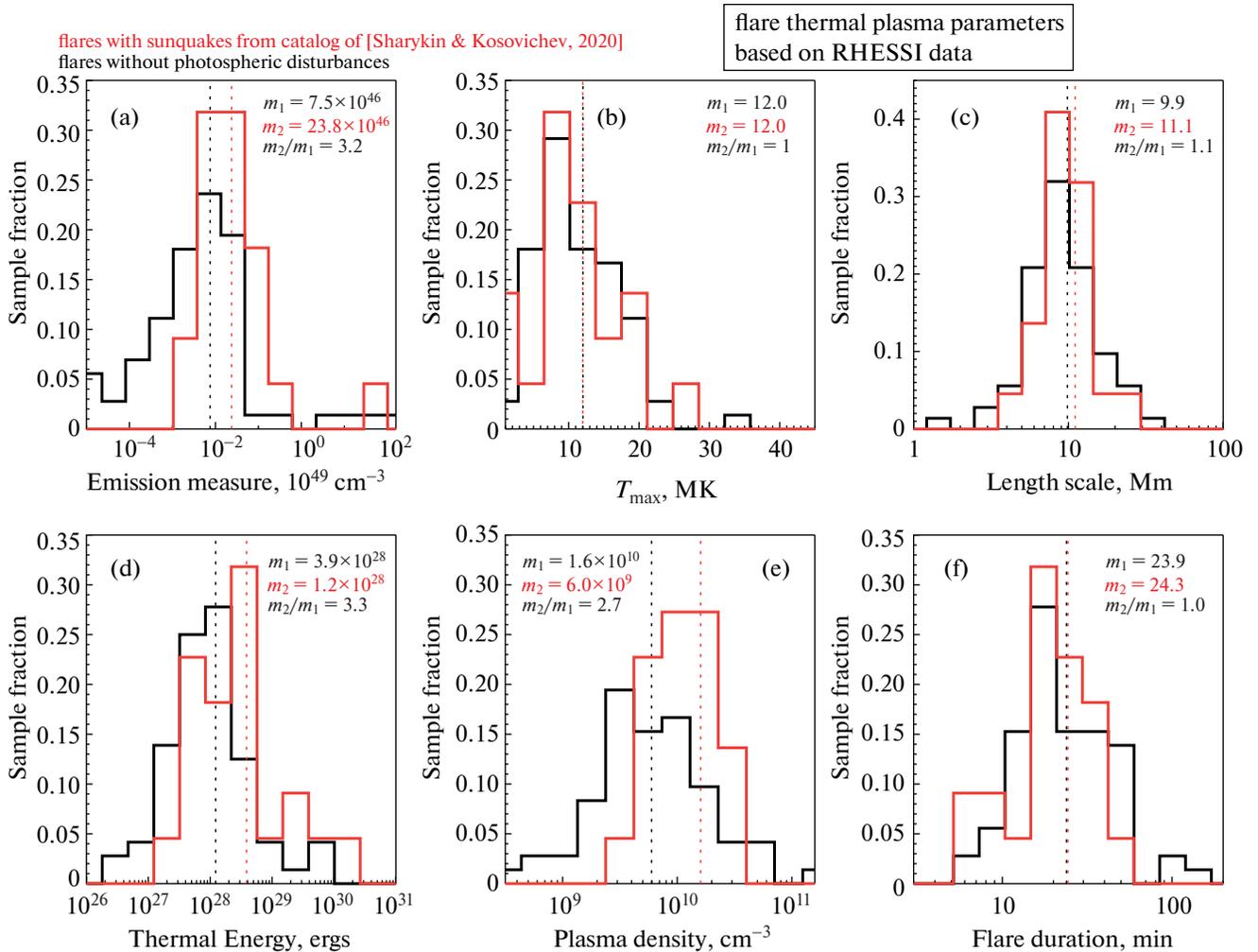


Рис. 2. Сравнение распределений (нормированные гистограммы) параметров тепловой плазмы (по данным RHESSI из GEV8): а) мера эмиссии, б) пиковая температура, в) характерный линейный масштаб, д) тепловая энергия, е) концентрация плазмы, ф) длительность вспышки по каталогу RHESSI. Гистограммы приводятся для группы вспышек с гелиосейсмическим откликом (красный) и без него (черный). Вертикальными линиями показаны медианные значения, которые также дублируются числами на панелях рисунка.

новского излучения в канале $1-8 \text{ \AA}$ (временной интервал, в течение которого производная потока выше 0.1 от ее максимума). Мы заметили, что при использовании времени старта по GOES данным длительности вспышек не так сильно (рис. 2f) различаются в двух выборках, так как алгоритм фиксирования начала вспышки часто срабатывает на малых потоках излучения в предвспышечной фазе. Тогда как условное окончание вспышки определяется по времени уменьшения потока в два раза по сравнению с максимумом (определяется достоверно из-за высоких значений потоков). Также совпадение распределения длительностей вспышек в данном исследовании может быть связано с эффектом селекции следующего рода. RHESSI наблюдает Солнце с периодическими интервалами, связанными с заходом в тень

Земли и иногда в южную магнитную аномалию (детекторы перенасыщаются за счет высоких потоков радиации). В среднем за один оборот имеется порядка 40–50 минут наблюдательного времени. Скорее всего, по этой причине вспышки отобрались с временами менее 60 мин (будучи более вероятными для полного наблюдения). Для более длительных вспышек вероятность измерить их полную длительность ниже. Мы считаем, что обсуждаемое противоречие является артефактом методики составления каталога GEV8 и особенностями наблюдений Солнца космическим аппаратом RHESSI и GOES. Таким образом, с нашей точки зрения результат о ярко выраженной импульсности гелиосейсмически активных вспышек не отменяется.

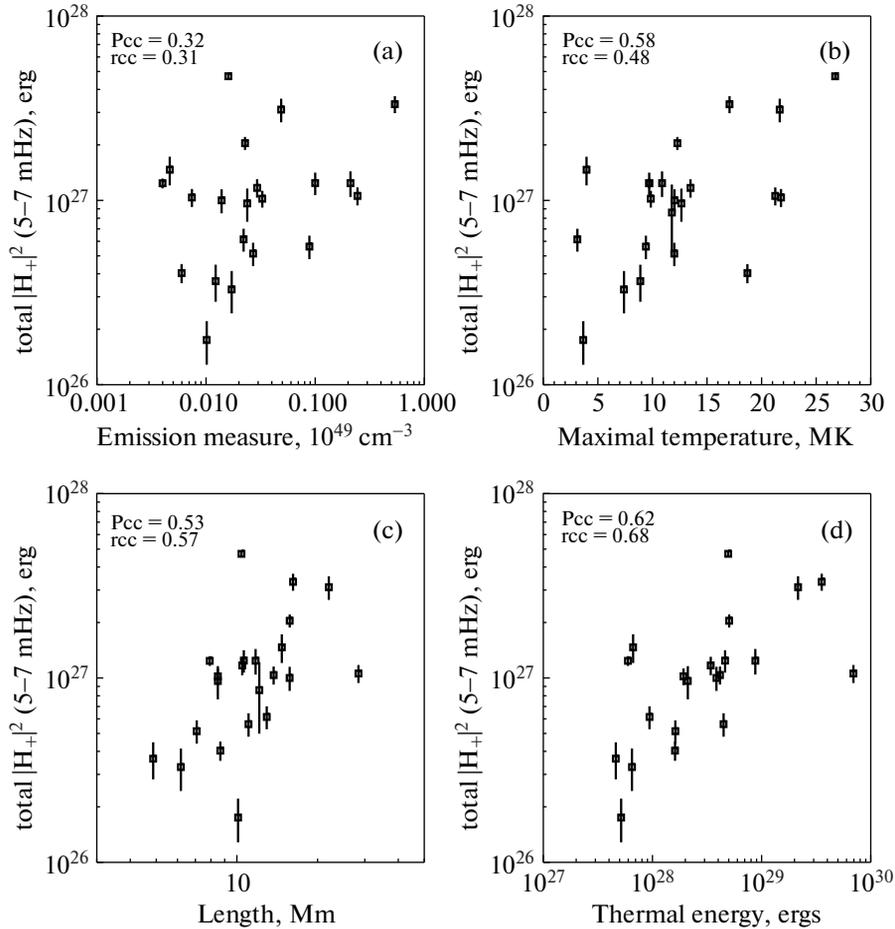


Рис. 3. Зависимости полной акустической мощности солнцетрясений для 22 вспышек в диапазоне частот 5–7 мГц от параметров тепловой плазмы (по данным RHESSI из GEVIII): а) мера эмиссии, б) пиковая температура, в) характерный линейный размер, д) тепловая энергия. Значения коэффициента корреляции Пирсона (P_{cc}) и ранговый (r_{cc}) указаны на панелях рисунка.

На рис. 3 приводим анализ зависимостей параметров гелиосейсмически активных вспышек из каталога GEVIII от полной энергии солнцетрясения в частотном диапазоне 5–7 мГц. На рисунке указаны значения коэффициента корреляции по Пирсону (P_{cc}) и ранговый коэффициент корреляции (r_{cc}). Далее мы будем для краткости упоминать только корреляцию по Пирсону. Видно, что для тепловой энергии (рис. 3д) мы имеем корреляцию $P_{cc} = 0.62$ (лучшую из всех тепловых параметров) с энергией солнцетрясений, несмотря на отсутствие линейной взаимосвязи с мерой эмиссии ($P_{cc} = 0.32$). Данный факт, в частности, связан с тем, что корреляция гелиосейсмической энергии с температурой (рис. 3б) и характерным размером (рис. 3с) равна соответственно 0.58 и 0.53. Видно, что эти значения сильно отличаются от корреляции $P_{cc} = 0.78$ для GOES класса (рис. 1а–1б), что опять же указывает скорее на малое количество событий в выборке вспышек с солнцетря-

сениями. Данные зависимости мы проверим ниже на данных ДМЭ, для которых выборка примерно в два раза больше.

Подводя итоги данного раздела статьи, мы выделим и повторим полученные статистические результаты. Во-первых, сравнительный анализ параметров тепловой плазмы (по данным RHESSI) вспышек без фотосферных возмущений с теми же параметрами гелиосейсмически активных вспышек показывает:

- 1) наличие небольших различий в распределении параметров для двух выборок. Есть небольшие смещения распределений друг относительно друга, показывающие, что вспышки с солнцетрясениями в среднем чуть больше излучают за счет большей меры эмиссии (медианы 23.8×10^{46} и $7.5 \times 10^{46} \text{ см}^{-3}$), имеют чуть большую плотность плазмы (1.6×10^{10} и $6.0 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$), а также обладают большей максимальной тепловой энергией плазмы (3.9×10^{28} и 1.2×10^{28} эрг);

2) распределения температуры (медианы 12 МК для обоих распределений), характерных размеров вспышечной области (11.1 и 9.9 Мм) и длительности вспышек (24.3 и 23.9 мин) для данных двух выборок практически не отличаются друг от друга;

3) идентичность распределений по длительности, скорее всего, является особенностью метода регистрации вспышек GOES и условий наблюдений RHESSI. Данный факт не противоречит более точному анализу в статье [29], в которой было показано, что вспышки с солнцетрясениями более импульсные и менее длительные по сравнению со вспышками без фотосферного отклика.

Во-вторых, исследования взаимосвязей между мощностью гелиосейсмических возмущений и параметрами тепловой плазмы выявили следующие особенности:

1) чем мощнее гелиосейсмическая вспышка, тем она крупнее в размерах, горячее и обладает большей полной энергией тепловой плазмы. Для данных зависимостей коэффициенты корреляции находятся в диапазоне 0.53–0.62;

2) энергия солнцетрясений не имеет линейной взаимосвязи с мерой эмиссии плазмы ($P_{cc} = 0.32$).

4. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ НЕТЕПЛОГО РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА

В данном разделе мы будем обсуждать статистический анализ параметров нетеплового рентгеновского спектра, используя каталог GEV8. Количество вспышек без фотосферных возмущений и событий с гелиосейсмической активностью такое же, как и в предыдущем разделе, где рассматривались параметры тепловой плазмы. Сначала мы выполним сравнительный анализ двух выборок, а затем проведем корреляционный анализ между параметрами нетеплового рентгеновского спектра, нетепловой энергии ускоренных электронов и энергией солнцетрясений.

Для физики солнечных вспышек одной из центральных проблем при определении интегральных характеристик ускоренных электронов (поток, плотность, энергия) является определение значения низкоэнергетической границы в спектре, которая определяется физикой процесса ускорения. Часто ее фиксируют на некотором стандартном значении (например, 20 кэВ). Также иногда получается определить значение низкоэнергетической границы при аппроксимации спектра жесткого рентгеновского излучения в рамках алгоритма оптимизации подгонки модели к реальным данным. Некоторые аналитические модели позволяют оценить значение низкоэнергетической границы, основываясь на физических предположениях. В частности, в рамках модели

теплой мишени [44] низкоэнергетическая граница определяется температурой плазмы и степенным индексом спектра ускоренных электронов. Значение данной границы энергии может быть в несколько раз меньше типичного значения пересечения тепловой и степенной частей рентгеновского спектра (~20 кэВ). В работе [43] приводились низкоэнергетическая граница и величина полной нетепловой энергии ускоренных электронов только в рамках модели тепловой мишени. Нас же интересуют данные не только о нетепловой энергии, но и основные параметры нетеплового спектра: нормировочный множитель для энергии 50 кэВ, (определяющий плотность потока рентгеновского излучения на данной энергии), степенной индекс нетеплового рентгеновского спектра, низкоэнергетическая граница (пересечение тепловой и нетепловой части спектра). На основе данных параметров нетеплового рентгеновского спектра в данном разделе анализируются результаты статистического исследования.

Выбор параметров для статистического анализа продиктован следующими соображениями. Дело в том, что, опираясь на базовые параметры спектра фотонов, мы можем определить характеристики спектра ускоренных электронов, который также является степенным. Затем, применяя ту или иную физическую модель (в том числе и модель тепловой мишени), можно оценить полную энергию и поток ускоренных электронов. Мы будем использовать классическую модель “толстой мишени” [34], в которой низкоэнергетическая граница является одним из параметров. Заметим, что любое статистическое исследование предполагает построение зависимостей (гистограмм) числа событий от ряда параметров, которые следуют из наблюдений, либо получены в упрощающих предположениях (моделях). В нашем случае статистическое исследование распределения числа вспышек будем проводить, прежде всего, для параметров рентгеновского спектра, по которым можно косвенно судить о характеристиках ускоренных электронов, рассматривая модель “толстой мишени”. Для подобного рода статистических исследований применение более сложных моделей взаимодействия пучков ускоренных электронов в магнитоактивной плазме вспышечной петлей представляется преждевременным.

Сравнение распределений параметров нетеплового рентгеновского спектра для двух выборок вспышек показано на рис. 4. В отличие от распределений тепловых параметров (описанных в предыдущем разделе) здесь мы наблюдаем сильное разделение гистограмм. Наиболее ярким образом вспышки с солнцетрясениями отличаются от вспышек без фотосферных возмущений при сравнении распределений нормировочного коэффициента степенного спектра (панель 4а). Раз-

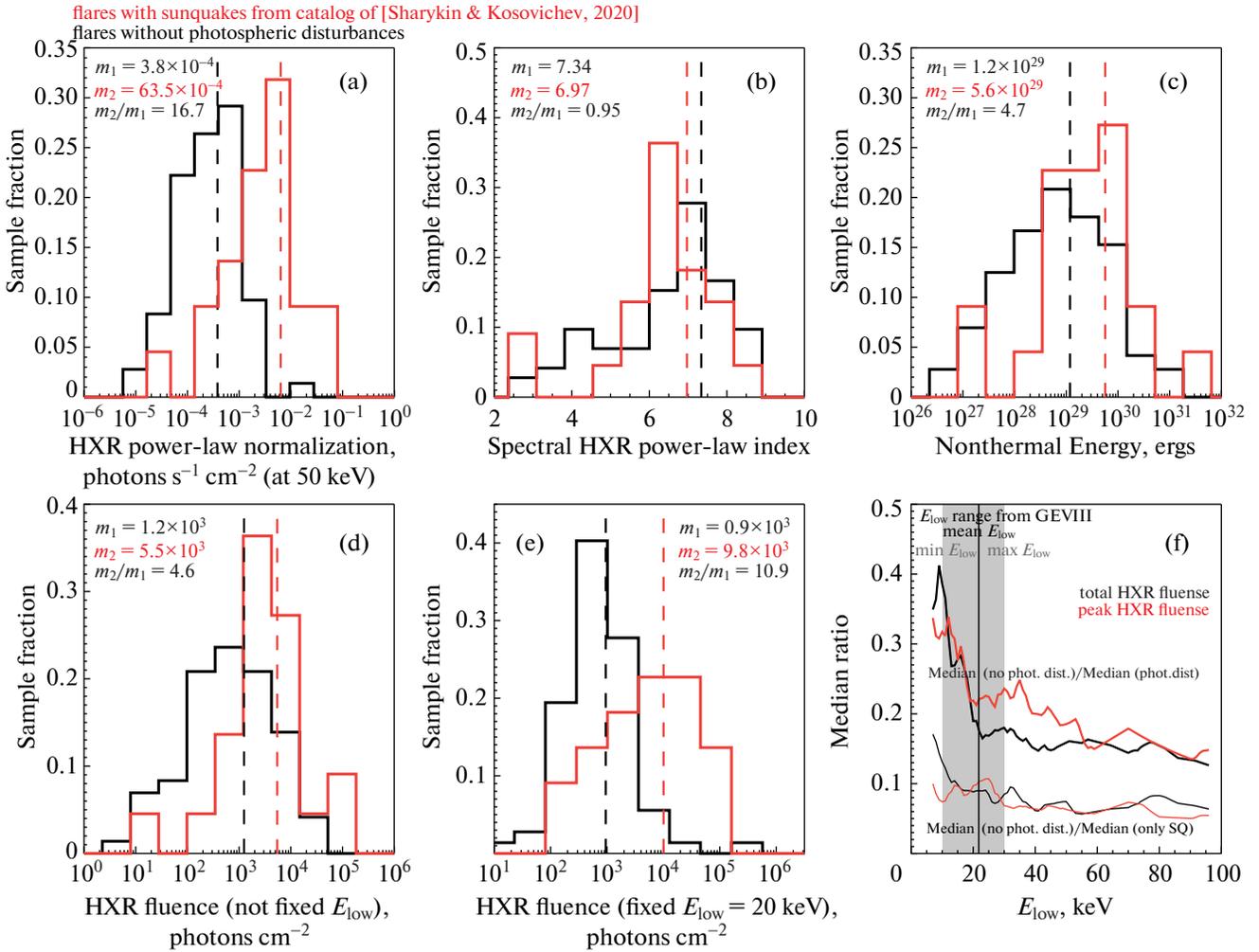


Рис. 4. Сравнение распределений параметров (нормированные гистограммы) степенного спектра нетеплового жесткого рентгеновского излучения (по данным RHESSI из GEVIII). Вертикальными штриховыми линиями показаны медианные значения, которые также дублируются числами на панелях рисунка. Гистограммы приводятся для группы вспышек с гелиосейсмическим откликом (красный) и без него (черный). На панели f показано поведение отношения медианных значений в зависимости от величины низкоэнергетической границы (выше которой интегрируется рентгеновский спектр) для двух распределений параметров нетеплового рентгеновского спектра: полный поток рентгеновского излучения за все время вспышки (черный) и в ее пике (красный). Отношения медиан считается для двух пар выборок вспышек: для вспышек с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений (тонкие нижние линии), для вспышек с фотосферными возмущениями и без них (толстые верхние линии). Вертикальная серая полоса показывает диапазон низкоэнергетических границ от минимального до максимального значения. Вертикальная черная линия соответствует среднему значению распределения низкоэнергетических границ.

личие в медианах достигает 16.7 раза в пользу выборки гелиосейсмически активных вспышек. Заметим, что данное различие определяется узкой полушириной распределений, которая составляет примерно порядок величины параметра. Данные распределения явно разделяются и практически не пересекаются из-за своей узости. Если сравнивать пики вероятности распределений, то различие чуть меньше и составляет примерно порядок.

Другой важный результат связан со сравнением распределений степенных индексов нетепловых рентгеновских спектров (рис. 4b). Анализ по-

казал, что гистограммы отличаются слабо друг от друга. В обоих распределениях медианное значение составляет примерно 7 : 7.3 для вспышек без фотосферных возмущений и 7.0 для вспышек с солнцетрясениями.

С точки зрения нетепловых энергий (рис. 4c) распределения различаются по медианам примерно в пять раз. Значения нетепловых энергий считались в рамках модели “толстой мишени”. Для расчета полной нетепловой энергии мы интегрировали спектр ускоренных электронов выше значения энергии (низкоэнергетическая граница), соответствующей пересечению степенной

части рентгеновского спектра с ее тепловой частью. В статье мы не сравниваем распределения самих низкоэнергетических границ из-за особенностей компоновки рисунка. Мы лишь укажем на то, что данные распределения очень похожи друг на друга, а также покажем среднее, минимальное и максимальное значения низкоэнергетических границ на панели 4f серой полосой и черной линией (среднее значение). Заметим, что здесь различие между медианами гистограмм не так значительно (примерно в 5 раз) по сравнению со случаем распределений в зависимости от нормировочного коэффициента. Также гистограммы имеют более широкую форму, что, скорее всего, связано с большей неопределенностью низкоэнергетической границы (далее E_{low}). Далее в тексте мы представим параметрический анализ с учетом разных значений низкоэнергетической границы, выше которой мы интегрируем спектр рентгеновских фотонов. Если рассматривать потоки ускоренных электронов [электроны c^{-1}] (примерно равны частному нетепловой энергии и низкоэнергетической границы), то мы получим распределения, похожие на распределения нетепловых энергий на панели с.

На рис. 4d, 4e мы сравниваем распределения рассчитанного интегрального потока жесткого рентгеновского излучения выше низкоэнергетической границы, определенной по пересечению теплового и нетеплового компонента рентгеновского спектра (панель 4d) и для фиксированного значения нижней энергии 20 кэВ (панель 4e) для времени всей вспышки. Полагая реальный динамический спектр нетепловых рентгеновских фотонов степенным от энергии и времени $I(E, t) = A_{50}(t)(E/50)^{-\gamma(t)}$, где A_{50} – нормировочный коэффициент рентгеновского спектра на энергии 50 кэВ, а γ – степенной индекс рентгеновского спектра, получим оценку полного потока на базе имеющихся величин каталога GEVIII следующим образом:

$$I_{tot} = \int_{t_{start}}^{t_{fin}} \int_{E_{low}(t)}^{\infty} I(E, t) dE dt \sim \sim A_{50} \left(\frac{E_{low}}{50 \text{ кэВ}} \right)^{-\gamma} \frac{E_{low}}{\gamma - 1} \tau_{flare}. \quad (1)$$

Здесь мы сделали переход через знак “ \sim ” от реальных значений, изменяющихся во времени параметров нетеплового рентгеновского спектра, к фиксированным значениям из каталога GEVIII, которые никак не отображают динамику спектра. Величина τ_{flare} соответствует характерной длительности вспышки, которая переоценивает время импульсной фазы с жестким рентгеновским излучением. Фактически представленное выражение является оценкой сверху полного потока

фотонов [фотоны cm^{-2}]. Если отбросить интегрирование по времени, то получим оценку максимума за время вспышки потока рентгеновских фотонов [фотоны $c^{-1} cm^{-2}$].

Сравнение гистограмм на панелях d и e рис. 4 показывает смещенные друг относительно друга распределения по интегральному потоку ЖР излучения для двух рассматриваемых классов вспышек. Особенно ярко группа вспышек с солнцетрясениями отличается от вспышек без фотосферных возмущений на панели 4e, где мы рассматриваем фиксированное значение низкоэнергетической границы, равной 20 кэВ (примерно среднее значение по распределению всех вспышек из GEVIII). Здесь медианы отличаются на порядок, а максимумы распределений еще больше, тогда как для нефиксированной низкоэнергетической границы, взятой из каталога, медианы отличаются примерно в пять раз. Вообще говоря, различие медиан рассматриваемых распределений указывает на значительные отличия (между двумя выборками) для всех интегральных характеристик ускоренных электронов, поскольку в формулы для определения данных характеристик (см., [34]) входит интегральный поток фотонов. Заметим также, что различие распределений по потокам нетепловых фотонов и нормировочному коэффициенту больше (различие в медианах составляет порядок), чем в случае тепловых параметров (медианы максимум отличаются в три раза), рассмотренных в предыдущем разделе. Это указывает на принципиальное значение ускоренных частиц для гелиосейсмической активности вспышек и дает веский дополнительный аргумент в пользу модели генерации солнцетрясений пучками ускоренных частиц, инжектируемых в плотные слои солнечной атмосферы.

На последней панели рис. 4 показаны результаты параметрического анализа отношения медиан распределений полного потока фотонов (черный цвет) для всей вспышки и максимального за время вспышки потока (красный цвет) в зависимости от величины низкоэнергетической границы (на оси абсцисс от 7 до 90 кэВ). Причем мы рассматриваем две разные пары распределений, для того чтобы подчеркнуть различие между вспышками с фотосферным возмущением и без фотосферного отклика. Первая пара соответствует тому, что мы рассматривали на всех предыдущих панелях рис. 4 и на всех гистограммах рис. 2: сравнение вспышек без фотосферных возмущений и гелиосейсмически активных вспышек, т.е. те события, которые дали солнцетрясение (тонкие нижние линии). Вторая пара распределений сравнивает вспышки с и без фотосферных возмущений (толстые верхние линии). Напомним, что не все вспышки с фотосферными возмущениями, зарегистрированными на доплерограммах или

на картах континуума НМІ, характеризуются наличием гелиосейсмических волн. Таким образом, мы дополнительно рассматриваем более общий случай вспышек с фотосферной активностью, которые включают в себя подмножество гелиосейсмически активных вспышек (41 вспышка в выборке).

Рисунок 4f показывает, что для самых разных значений низкоэнергетической границы мы имеем значительную разницу в распределениях вспышек с солнцетрясениями и вспышек без фотосферных возмущений. Данное различие составляет около порядка на протяжении всего рассматриваемого диапазона значений низкоэнергетических границ. В случае второй пары распределений (вспышки с и без фотосферных возмущений) эта разница составляет примерно пять раз (для энергий выше примерно 20 кэВ) в пользу вспышек с фотосферными возмущениями. Для более низких энергий разница начинает уменьшаться. В итоге мы видим, что фотосферные возмущения в общем случае (в том числе и без солнцетрясений) и солнцетрясения, в частности, (и в большей степени) явно связаны с повышенными потоками ускоренных электронов по сравнению со вспышками без каких-либо фотосферных проявлений.

Рисунок 5 показывает результаты анализа зависимостей гелиосейсмической мощности от параметров нетеплового рентгеновского спектра, которые мы обсуждали выше в случае гистограмм на рис. 4. Для нормировочного коэффициента для энергии 50 кэВ и длительности вспышки мы имеем соответственно корреляцию с коэффициентами: 0.56 и 0.51 (рис. 4а и 4с). В случае степенного индекса корреляции нет ($P_{cc} = 0.18$).

На рис. 5d–5f приведены зависимости полной акустической мощности солнцетрясений для 22 вспышек в диапазоне частот 5–7 мГц от параметров нетеплового рентгеновского спектра — интегрального потока рентгеновского излучения для длительности всей вспышки, максимального потока и полной нетепловой энергии ускоренных электронов за все время вспышки в рамках модели толстой мишени. Черным цветом мы обозначаем случай нефиксированной низкоэнергетической границы спектра ускоренных электронов, которую мы брали из каталога GEVIII. Наибольшее значение коэффициента корреляции составляет 0.61 для полного потока рентгеновского излучения за все время вспышки (рис. 5d). Менее всего коррелирует нетепловая энергия ускоренных электронов с энергией солнцетрясений ($P_{cc} = 0.51$). Результаты расчета для фиксированной низкоэнергетической границы 20 кэВ обозначена красным цветом. Заметим, что в этом случае коэффициент корреляции становится выше: на панелях 5d и 5e коэффициент корреляции прини-

мает значение 0.68 (доверительная вероятность более чем 99.9%), а для нетепловой энергии на панели 5f увеличивается до 0.55.

Сравнение гистограмм и результаты корреляционного анализа для случая плавающего значения энергии нормировочного множителя показывают результаты, подобные приведенным на рис. 4f и рис. 5g–5i. Если анализ проводить для более высоких энергий (как для нормировки, так и для низкоэнергетической границы), например, до 300 кэВ (как в [Wu2023]), то мы получим слабую корреляцию между интегральным потоком нетепловых рентгеновских фотонов и энергией солнцетрясений, что, скорее всего, следует из неопределенности вида энергетического спектра в области выше 100 кэВ — спектр может отличаться по наклону и иметь, например, излом. Поэтому мы рассматриваем нижние границы энергии и нормировки спектра до энергии 100 кэВ и продолжаем спектр модельно с одной степенью.

Анализ зависимости коэффициента корреляции от величины фиксированной низкоэнергетической границы для графиков типа 5d–5f показан на панелях 5g–5i. Диапазон варьирования низкоэнергетической границы аналогичен случаю на рис. 4f и составляет 7–90 кэВ. На графиках приведены зависимости, как для рангового коэффициента корреляции, так и для коэффициента Пирсона (более гладкая кривая). Серой полосой показаны границы от минимального до максимального значения низкоэнергетической границы из выборки по каталогу GEVIII. Вертикальной линией показано среднее значение низкоэнергетической границы по данной выборке. Заметим, что для полного потока (рис. 5g) и максимального значения потока (рис. 5h) рентгеновского излучения коэффициент корреляции достигает пика в области 20 кэВ для случая коэффициента Пирсона и в области 15 кэВ для рангового коэффициента корреляции. Для более высоких энергий взаимосвязь между рассматриваемыми характеристиками и энергией солнцетрясений начинает ухудшаться. Данный факт указывает на возможную слабую взаимосвязь солнцетрясений с высокоэнергичной частью спектра ускоренных электронов. Для нетепловой энергии ускоренных электронов (рис. 5i) пик коэффициента корреляции по Пирсону (имеет очень пологую форму) в районе 30 кэВ и для рангового коэффициента корреляции максимум достигается при низкоэнергетической границе около 25 кэВ. При этом корреляция в целом хуже по сравнению с корреляцией, показанной на графиках рис. 5g и 5h.

В качестве итогов просуммируем полученные выше статистические результаты. Во-первых, сравнительный анализ параметров нетеплового спектра рентгеновского излучения (по данным

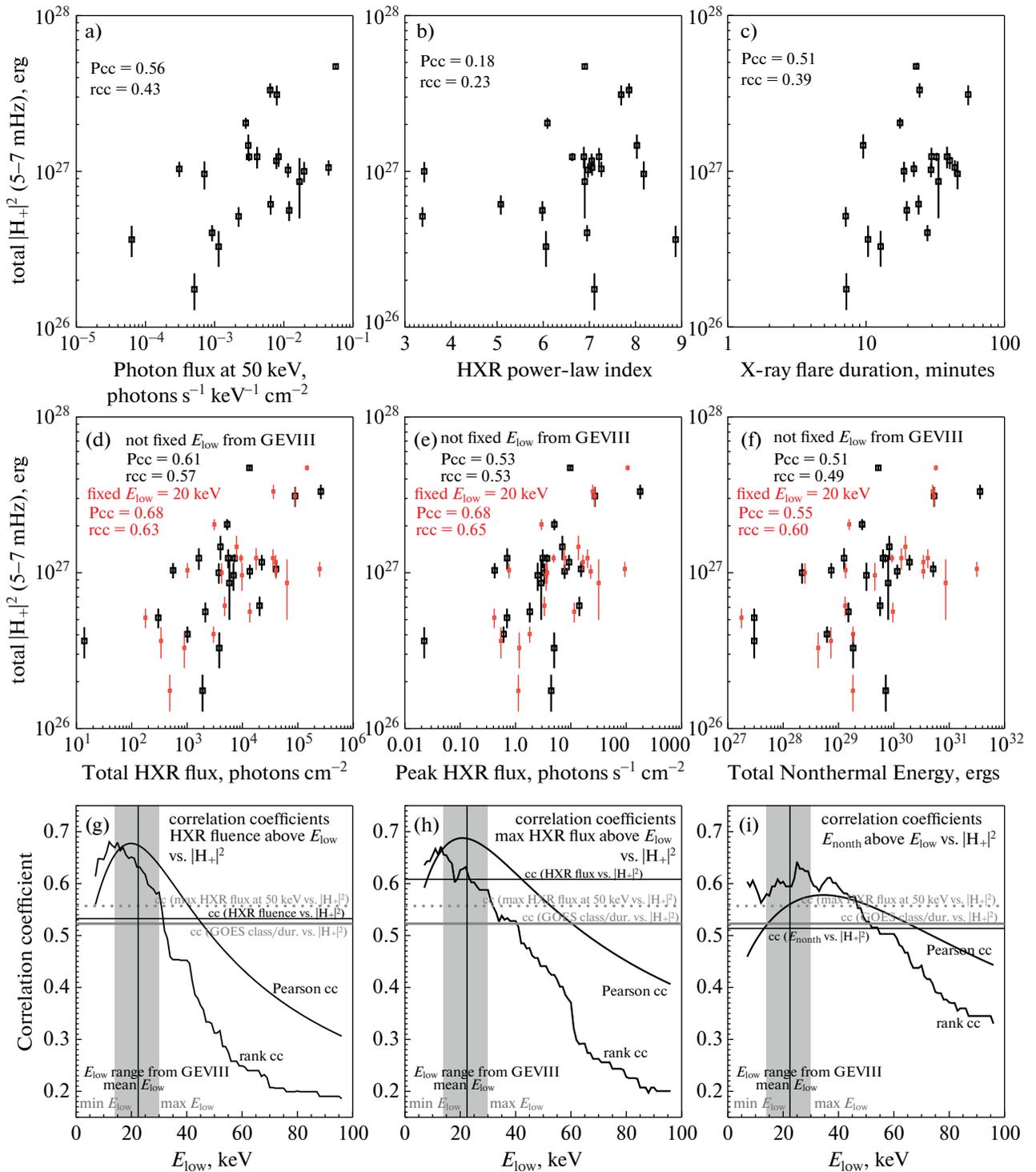


Рис. 5. Зависимости полной акустической мощности солнцетрясений для 22 вспышек в диапазоне частот 5–7 мГц от параметров нетеплового рентгеновского спектра (по данным RHESSI из GEVIII). На панелях d–f показаны черным цветом зависимости в случае интегрирования спектра выше низкоэнергетической границы, взятой из GEVIII (значение данной границы не фиксировано). Красным цветом обозначается случай использования фиксированного значения низкоэнергетической границы, равной 20 кэВ для всех событий. Значения коэффициента корреляции Пирсона (Pcc) и ранговый (rcc) указаны на панелях рисунка. На панелях g–i рассматривается зависимость коэффициента корреляции (рангового и Пирсона) от значения низкоэнергетической границы, выше которой мы интегрируем спектр. Анализ проводится для параметров рентгеновского спектра, аналогичных d–f. Горизонтальные линии соответствуют значениям коэффициентов корреляции для разных параметров, указанных текстом на рисунке. Вертикальная серая полоса показывает диапазон низкоэнергетических границ от минимального до максимального значения. Вертикальная черная линия соответствует среднему значению распределения низкоэнергетических границ из GEVIII.

RHESSI) вспышек без фотосферных возмущений с теми же параметрами гелиосейсмически активных вспышек показывает:

1) данные выборки больше всего различаются в распределении нормировочного коэффициента степенного нетеплового рентгеновского спектра для энергии 50 кэВ. Отношение медиан двух распределений составляет почти 17 в пользу вспышек с солнцетрясениями;

2) при сравнении распределений полных (за все время вспышки) и максимальных потоков нетеплового рентгеновского излучения мы также обнаружили значительное смещение распределений относительно друг друга. Отношение медиан распределений становится еще больше (примерно порядок величины) при рассмотрении фиксированных значений низкоэнергетической границы, выше которой мы интегрируем спектр. Анализ зависимости отношения медиан от выбора величины низкоэнергетической границы показал, что для самых разных значений разница медиан слабо меняется и составляет примерно порядок;

3) для распределений нетепловой энергии ускоренных электронов в рамках модели “толстой мишени” также установлено различие в распределениях. Отношение медиан составляет примерно 5 раз;

4) анализ распределений степенных индексов нетеплового рентгеновского спектра показал слабое различие между данными выборками.

Во-вторых, анализ корреляций между мощностью гелиосейсмических возмущений и параметрами нетепловых рентгеновских спектров выявил следующие особенности:

1) обнаружено полное отсутствие корреляции энергии гелиосейсмических возмущений от степенного индекса нетеплового рентгеновского спектра;

2) обнаружена корреляция ($P_{cc} = 0.61$) между гелиосейсмической энергией и полным потоком нетеплового рентгеновского излучения для всей вспышки в случае нефиксированного значения низкоэнергетической границы (взятой из каталога GEVIII). Для фиксированной низкоэнергетической границы $E_{low} = 20$ кэВ максимальное значение коэффициента корреляции составляет 0.68;

3) коэффициент корреляция между гелиосейсмической энергией и полной нетепловой энергией ускоренных электронов за все время вспышки составляет 0.58, если рассматривать фиксированное $E_{low} = 30$ кэВ. Для нефиксированных значений E_{low} $P_{cc} = 0.51$.

Вообще говоря, все результаты можно свести к одному выводу — гелиосейсмически активные солнечные вспышки являются событиями, более насыщенными ускоренными электронами по

сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Этот вывод является дополнительным веским аргументом в пользу основной гипотезы о причинах солнцетрясений, связанной с проникновением нетепловых электронов в нижние слои солнечной атмосферы.

5. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ АНАЛИЗА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕРЫ ЭМИССИИ

В предыдущих двух разделах мы рассмотрели статистику солнечных вспышек на базе наблюдений рентгеновского излучения космической обсерваторией RHESSI. В частности, мы исследовали особенности солнечных вспышек с гелиосейсмическим откликом с точки зрения термодинамических параметров горячей плазмы — максимальных значений меры эмиссии, температуры и тепловой энергии. Полученная статистика указывает на наличие корреляции энергии солнцетрясения с максимальной тепловой энергией ($P_{cc} = 0.62$) и температурой ($P_{cc} = 0.58$) нагреваемой плазмы. При этом оказалось, что корреляция с мерой эмиссии не высокая ($P_{cc} = 0.32$). В данном разделе мы приведем результаты статистического анализа термодинамических параметров вспышек для расширенных выборок на базе наблюдений экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения по данным AIA/SDO, которые позволяют нам дополнить полученные результаты по распределениям термодинамических параметров вспышек по данным RHESSI. Статистический анализ также разделяется на две части: 1) сравнительный анализ распределений параметров вспышек с солнцетрясениями и вспышек без солнцетрясений; 2) корреляционный анализ взаимосвязей термодинамических параметров вспышечной плазмы с энергией солнцетрясений, рассчитанной методом акустической голографии.

Далее мы приведем относительно краткое описание ультрафиолетового космического телескопа AIA и методики анализа нагрева плазмы с помощью метода “прямой подгонки” (англ., forward-fitting) ДМЭ [45], которая легла в основу каталога GEII [42]. Несмотря на подробное описание в оригинальной статье, мы должны указать основные особенности метода, чтобы глубже понять различие с рентгеновской спектроскопией в рамках данной статьи.

Телескоп AIA [40] на борту SDO [31] проводит пространственно разрешенные наблюдения ЭУФ излучения в широком диапазоне длин волн в семи каналах: 94 (Fe XVIII, 7.2 МК), 131 (Fe VIII и XXI, 0.5 МК), 171 (Fe IX, 0.8 МК), 193 (Fe XII и XXIV, 1.5 МК), 211 (Fe XIV, 1.9 МК), 304 (He II, 0.08 МК) и 335 Å (Fe XVI, 2.5 МК). Данный набор каналов позволяет исследовать температурную

структуру короны в широком диапазоне от 0.06 до 20 МК. Используя ЭУФ карты вспышечных областей [42], был составлен каталог GEI термодинамических параметров M и X вспышек, определенных с помощью анализа ДМЭ вспышечной плазмы. Данный подход предполагает определение функции $DEM(T) = n_e^2 dz/dT$ [$\text{см}^{-5} \text{К}^{-1}$] распределения плазмы по лучу зрения (координата z) в зависимости от температуры T . Заметим, что анализ данных RHESSI (для каталога GEVIII) выполнялся в рамках однотемпературного приближения: рентгеновский спектр (примерно до 20 кэВ) аппроксимировался модельным спектром тормозного теплового излучения изотермической плазмы. Описание в рамках ДМЭ является более полным. Поэтому кроме проверки предыдущих результатов по RHESSI мы получим более расширенные статистические данные.

При определении меры эмиссии и температуры плазмы во вспышечной области авторы GEI пользовались следующей методикой. На входе имелся набор данных размерности (X, Y, λ, t) , состоящий из временной последовательности ЭУФ изображений: две координаты изображения, длина волны канала AIA (всего 6 за вычетом 304 Å, соответствующего хромосфере и переходной зоне), время (со скважностью 12 с). Для каждого пикселя ЭУФ карты в любой момент времени производился подбор ДМЭ в виде гауссианы с тремя варьируемыми параметрами (пик, температура центра гауссианы и ширина) так, чтобы максимально приблизиться к значениям интенсивности во всех 6 каналах. Затем выделялся контур (определяющий размер вспышечной области) по некоторому эмпирически подобранному значению максимума гауссианы. Следующим шагом было суммирование всех гауссиан внутри выбранного контура. Таким образом, мы получали пространственно интегрированную ДМЭ всей вспышечной области как функцию времени. Затем, интегрируя по температуре, получаем временную зависимость полной меры эмиссии, максимальное значение которой указывается в каталоге GEI.

Температура в каталоге GEI приводится в двух вариантах. Первое значение T_p соответствует максимальному значению температуры пика пространственно интегрированной ДМЭ за все время вспышки. Второе значение T_w является максимумом среднего значения температуры, усредненной по ДМЭ. Фактически T_w является центром масс ДМЭ и считается следующим образом:

$$T_w(t) = \frac{\int T DEM(T, t) dT}{\int DEM(T, t) dT} = \frac{\sum_k T_k DEM(T_k, t) \Delta T_k}{EM(t)}.$$

В данной формуле также показан переход от непрерывного представления к дискретному. В работе [42] для определения ДМЭ рассматривался диапазон температур пиков отдельных компонентов гауссиан 0.5–30 МК (36 дискретных значений, эквидистантных в логарифмической шкале), при этом пространственно интегрированная ДМЭ определялась в расширенном диапазоне температур $\lg T_k = 5-8$ для того, чтобы учесть вклад “хвостов” гауссиан для самых холодных и горячих компонентов ДМЭ. ДМЭ анализ показал, что значения $T_w = 6-40$ МК систематически выше, чем значения $T_p = 0.5-25$ МК, что означает больший вклад в полную меру эмиссии плазмы с более низкими температурами. В дискретном виде расчет полной тепловой энергии плазмы во вспышечной области выполняется по ДМЭ следующим образом (подробнее см. Приложение в [42]):

$$E_{th}(t) = 3k_B L^{3/2} \sum_k T_k (DEM(T_k, t) \Delta T_k)^{1/2}.$$

Для нашего статистического исследования мы будем использовать следующую информацию из каталога GEI: максимальная мера эмиссии, характерный масштаб длины L , T_w , T_p , полная тепловая энергия плазмы, плотность плазмы как $\sqrt{EM/L^3}$.

На рис. 6 показано сравнение распределений параметров тепловой плазмы для выборки вспышек с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений. Самое главное, что следует из данного рисунка – это фактически полная тождественность выборок: практически одинаковые значения медиан, пиков и ширин гистограмм (в отличие от данных RHESSI на рис. 2). Таким образом, при рассмотрении ДМЭ отличие распределений, замеченное ранее по данным RHESSI, пропадает. Необходимо попытаться понять, есть ли физика в данном различии. Скорее всего, это связано с построением ДМЭ, в которой учитывается вклад плазмы с очень широким спектром температур.

Корреляции параметров тепловой плазмы по ДМЭ и значений полной энергии гелиосейсмических вспышечных возмущений показаны на рис. 7. В отличие от данных RHESSI мы имеем более явную зависимость энергии солнцетрясений от меры эмиссии (рис. 7а) с коэффициентом корреляции 0.56 (примерно вдвое лучше по сравнению с рис. 3а). С температурами ситуация обратная: корреляция хуже и для T_w ($P_{cc} = 0.43$ против 0.58 на рис. 3б), и для T_p ($P_{cc} = 0.36$). Коэффициенты корреляции для максимальной тепловой энергии вспышечной плазмы и характерного масштаба длины примерно одинаковые (0.55 и 0.51). Любопытно, что для плотности плазмы, определенной по ДМЭ, есть слабая антикорреля-

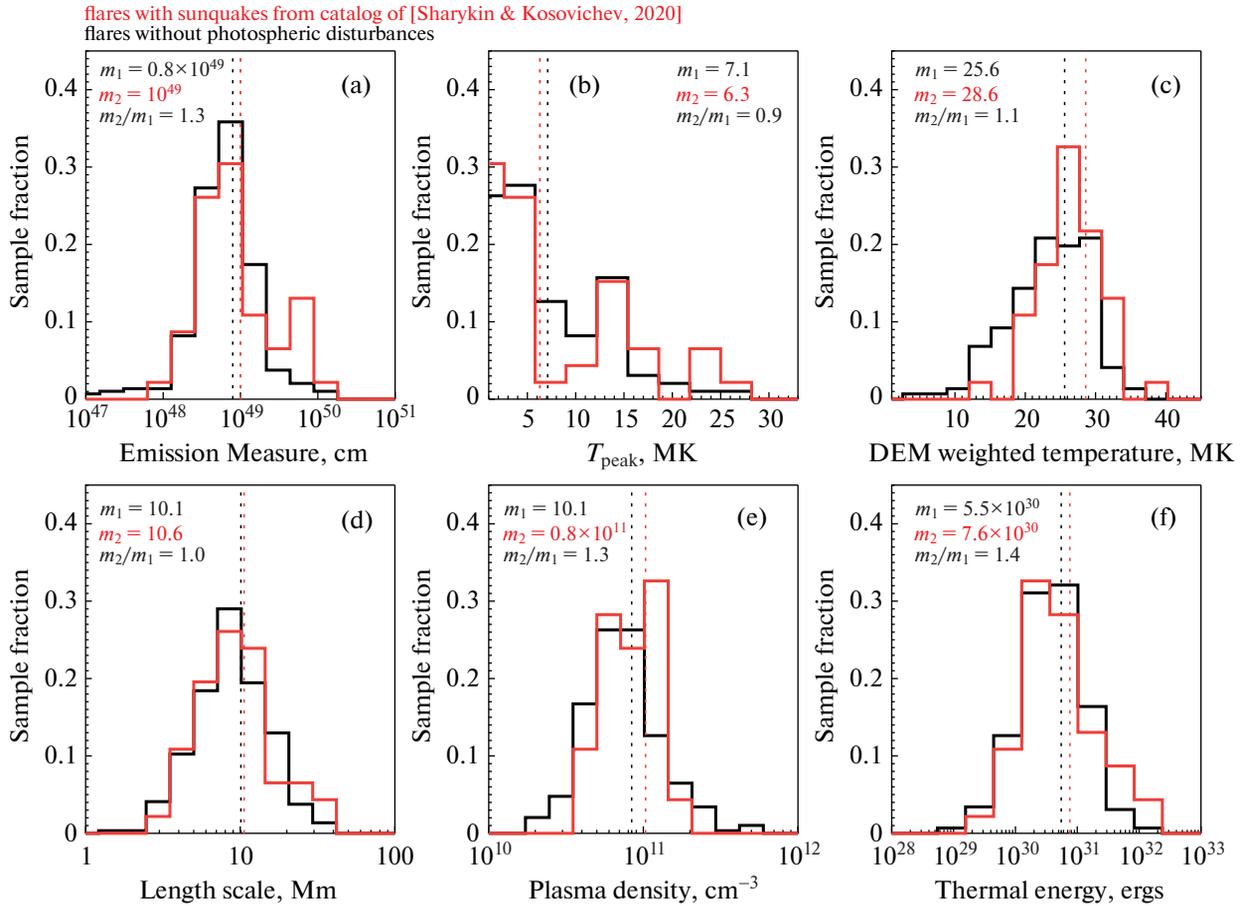


Рис. 6. Сравнение распределений параметров (нормированные гистограммы) тепловой плазмы (по данным AIA из GEII): а) мера эмиссии, б) пиковая температура по ДМЭ, с) температура, полученная усреднением по ДМЭ, d) характерный линейный масштаб, е) характерная концентрация плазмы, f) тепловая энергия. Гистограммы приводятся для группы вспышек с гелиосейсмическим откликом (красный) и без него (черный). Вертикальными точечными линиями показаны медианные значения, которые также дублируются числами m_1 и m_2 на панелях рисунка.

ция с коэффициентом $P_{\text{cc}} = -0.33$. Это значит, что чем вспышка больше себя проявляет в гелиосейсмической активности, тем она с большей вероятностью характеризуется меньшей концентрацией плазмы. Однако различие в концентрациях очень небольшая (10^{11} и $0.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и корреляция слишком мала ($P_{\text{cc}} = -0.33$), чтобы быть уверенным в данной зависимости. Также стоит отметить, что полученные одинаковые корреляции для обоих типов (по RHESSI и по ДМЭ) максимальных тепловых энергий являются результатами корреляции гелиосейсмической энергии с максимальной вспышечной температурой по данным RHESSI в случае рис. 3d и корреляцией с мерой эмиссии, определенной по ДМЭ (на рис. 7f).

Также, учитывая относительную узость распределений вспышек по концентрациям плазмы, а также корреляцию энергии солнцетрясений с характерным масштабом длины ($P_{\text{cc}} = 0.51$

на рис. 7d), мы думаем, что корреляция с мерой эмиссии (рис. 7a) больше связана с объемом вспышечной области, так как $EM = n^2 L^3$. Другими словами, большие солнцетрясения связаны с вовлечением во вспышечный процесс большего количества магнитных петель. То есть мы имеем однозначный “геометрический эффект большой вспышки”. При этом вспышки с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений никак не различаются по геометрическим размерам в рамках методологии оценки длин в каталоге GEII (напомним, что длины в GEVII взяты из второго каталога GEII).

В качестве итогов данного раздела укажем следующие результаты статистического анализа вспышек по ДМЭ ЭУФ излучения:

1) вспышки с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений тождественны по своим распределениям термодинамических параметров вспышечной области в рамках ДМЭ анализа;

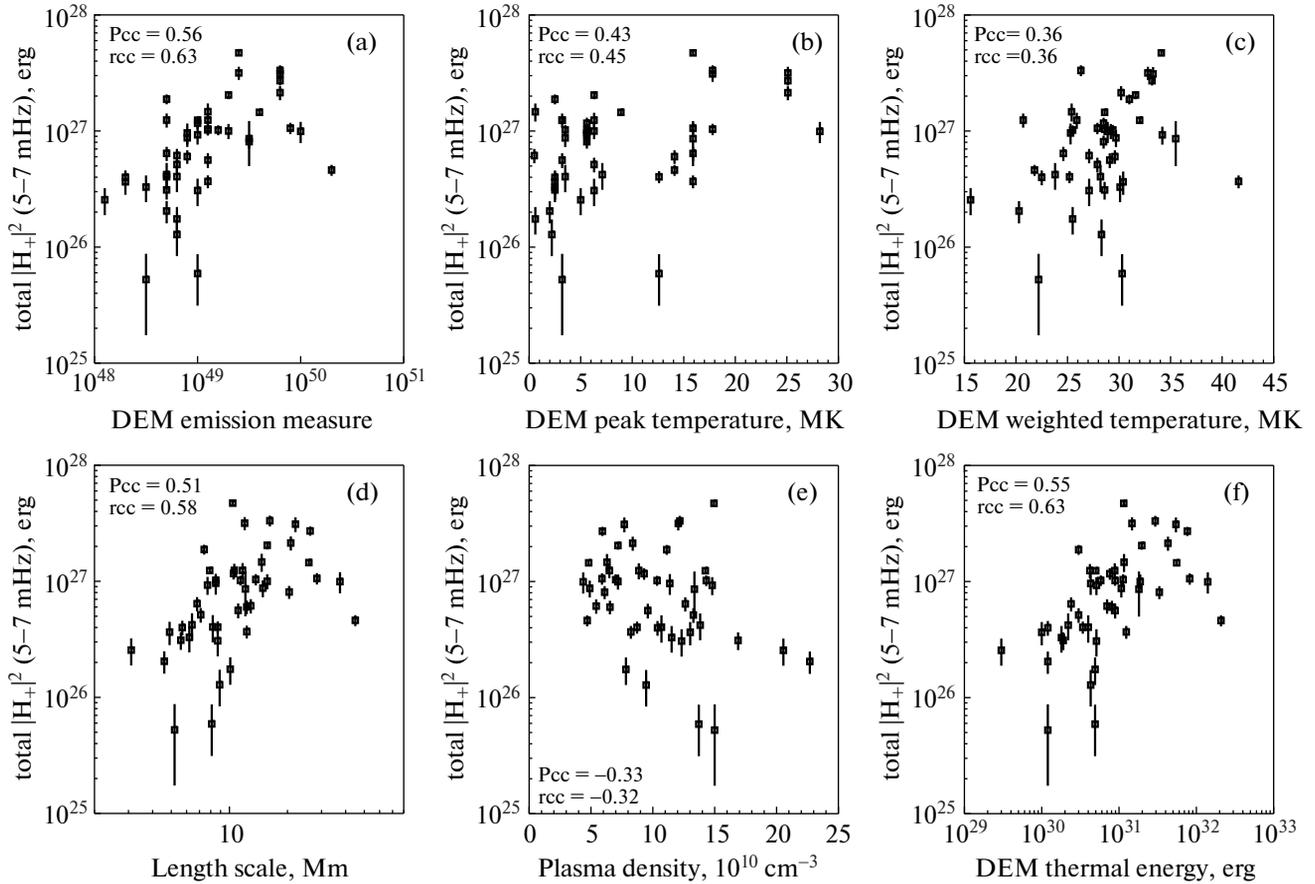


Рис. 7. Зависимости полной акустической мощности солнцетрясений для 22 вспышек в диапазоне частот 5–7 мГц от параметров тепловой плазмы (по данным AIA из GEI): а) мера эмиссии, б) пиковая температура по ДМЭ, с) температура, полученная усреднением по ДМЭ, d) характерный линейный масштаб, е) характерная концентрация плазмы, f) тепловая энергия. Значения коэффициента корреляции Пирсона (Pcc) и ранговый (rcc) указаны на панелях рисунка.

2) обнаружена корреляция ($P_{cc} = 0.56$) между энергией гелиосейсмических возмущений и мерой эмиссии (что отличается от результатов анализа данных RHESSI);

3) не найдено корреляции между энергией гелиосейсмических возмущений и температурой, оцененной из ДМЭ двумя разными способами (также противоречит результатам анализа данных RHESSI);

4) мы получили аналогичную (как и для данных RHESSI) корреляцию между гелиосейсмической энергией и максимальной тепловой энергией вспышечной плазмы, полученную в рамках ДМЭ анализа. Однако данная корреляция больше связана с зависимостью энергии солнцетрясения от меры эмиссии и характерного размера вспышечной области. Тогда как для данных RHESSI мы имеем линейную зависимость от температуры и также от длины;

5) получена антикорреляция (единственная во всей работе) между энергией солнцетрясений и концентрацией плазмы. Однако данный резуль-

тат обладает малой достоверностью и в будущем его необходимо проверять на больших выборках или с применением более надежного метода определения геометрических размеров вспышечных областей.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате сравнения гелиосейсмически активных солнечных вспышек и вспышек без фотосферных возмущений мы обнаружили:

1) значительное различие в потоках нетеплового рентгеновского излучения. В среднем поток двух выборок различаются как минимум на порядок. Максимальное отношение (почти в 17 раз в пользу вспышек с солнцетрясениями) медиан распределений найдено для нормировочного коэффициента степенного нетеплового рентгеновского спектра для энергии 50 кэВ;

2) мы не нашли различий между двумя выборками вспышек с точки зрения распределений степенного индекса нетеплового рентгеновского

спектра (т.е. жесткости спектра ускоренных электронов). Более важным параметром является интегральный поток жесткого рентгеновского излучения;

3) есть небольшое различие в двух рассматриваемых распределениях (смещение) термодинамических параметров, определенных по рентгеновским спектрам RHESSI. Вспышки с солнцетрясениями обладают чуть большей максимальной тепловой энергией, мерой эмиссии и концентрацией горячей плазмы (медианы распределений отличаются примерно в три раза);

4) сравнение распределений характерных размеров вспышечной области показало идентичность двух выборок вспышек в рамках методики выделения геометрического места вспышки по картам ДМЭ;

5) показано, что с точки зрения ДМЭ анализа термодинамические параметры двух выборок вспышек практически не различаются.

Анализ зависимостей гелиосейсмической энергии от различных параметров вспышек, полученных в рамках работ [41, 42], показал следующие основные результаты:

1) наиболее сильная корреляция (по Пирсону 0.68) получена для зависимости гелиосейсмической энергии от полного потока нетепловых рентгеновских фотонов в рамках предположения о фиксированной низкоэнергетической границе 20 кэВ;

2) интересным результатом является найденная корреляция (0.58) энергии солнцетрясений с температурой плазмы по RHESSI, при слабой корреляции с мерой эмиссии ($P_{cc} = 0.32$);

3) наблюдается явная зависимость энергии солнцетрясений от характерных размеров вспышечной области. Благодаря данному эффекту мы также наблюдаем связь ($P_{cc} = 0.56$) между гелиосейсмической энергией и интегральной мерой эмиссии, полученной из ДМЭ анализа;

4) анализ ДМЭ не позволил найти хорошую корреляцию между энергией солнцетрясений и температурой плазмы ($P_{cc} = 0.36$ и 0.43 для температур T_p и T_w), что противоречит данным RHESSI.

7. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим полученные результаты относительно двух важных аспектов: физики солнцетрясений и методике статистического анализа. Прежде всего, заметим, что с точки зрения статистического анализа, потенциал каталога SQ24 далеко не исчерпан. При рассмотрении пересечения с каталогами GEII и GEVIII мы нашли соответственно только 22 и 42 события до февраля 2014 г. При рассмотрении других вспышек после этой

даты мы могли бы расширить каталог, как для ДМЭ анализа, так и для анализа рентгеновского излучения. Однако германиевые полупроводниковые детекторы RHESSI подверглись серьезной деградации, начиная с 2015 г. Поэтому необходима очень большая и аккуратная дополнительная работа для интерпретации рентгеновского спектра вспышек, начиная с 2015 г. (чего не было сделано в рамках серии работ “Global Energetics”). Заметим, что в рамках первоначального статистического анализа нам достаточно данных без пространственного разрешения. В связи с этим, с нашей точки зрения, следующим шагом был бы анализ рентгеновского излучения большого числа событий с помощью инструмента KONUS [46] на борту КА Wind. Данный инструмент отличается наибольшим временем наблюдений по сравнению с другими рентгеновскими спектрометрами, отсутствием затмений и относительно стабильным фоном. Анализ расширенных выборок позволит еще лучше сравнить вспышки с разной степенью фотосферной активности и получить уточненные корреляционные взаимосвязи между энергией солнцетрясений и параметрами рентгеновского нетеплового спектра, косвенно свидетельствующего об ускоренных электронах.

В данной работе мы использовали информацию о характерных линейных размерах вспышечной области. Причем анализ распределений характерных длин показал отсутствие различий между вспышками с солнцетрясениями и вспышками без фотосферных возмущений. Однако мы заметили, что есть корреляция энергии солнцетрясений с характерным размером вспышечной области. Другими словами, мы показали, что быстрые и импульсные вспышки с гелиосейсмическим откликом [29] не обладают свойством компактности областей энерговыделения с точки зрения методики оценки характерных размеров, описанной в [42]. Тем не менее вопрос геометрической структуры вспышечной области в рамках исследований гелиосейсмически активных солнечных вспышек не снимается с повестки и, более того, является крайне важным. В действительности, данная работа показала лишь то, что во всех вспышках условное количество магнитных петель (и их размеры), вовлекаемых во вспышечное энерговыделение, примерно одно и то же. При этом мы не рассматриваем более тонкую пространственную структуру вспышечной области.

С точки зрения гипотезы о генерации гелиосейсмических волн ускоренными электронами, одним из важнейших параметров является площадь их высыпания в нижние слои солнечной атмосферы. При разных значениях площади плотность потока энергии высыпавшихся ускоренных электронов будет также различной и, следовательно, фотосферный отклик будет отли-

чаться. На базе каталога GEVIII мы произвели оценки плотности потока энергии ускоренных электронов и нашли разницу в медианах распределений (вспышки с солнцетрясениями и вспышки без фотосферных возмущений) примерно в пять раз (так же, как и на рис. 4с). Также используемые критерии показали достоверную разницу распределений, несмотря на приблизительность оценки времени импульсной фазы, площади вспышечной области и величины низкоэнергетической границы. Также от уточненных геометрических размеров зависит оценка плотности тепловой плазмы. Уточнение статистики с точки зрения геометрических параметров в дальнейшем позволит значительно улучшить понимание гелиосейсмически активных солнечных вспышек. Кроме этого важно рассматривать множественность компактных областей высыпания ускоренных частиц, а также динамику числа и размеров тех областей, в которые инжектируются ускоренные электроны (возможно, что последовательные инжекции могут усилить гелиосейсмическую волну).

Одним из важных результатов анализа ДМЭ является тождественность выборок солнечных вспышек с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений с точки зрения термодинамических параметров. При этом для данных RHESSEI мы обнаружили различие в медианах этих распределений. Скорее всего, это связано с построением ДМЭ, в которой учитывается плазма в очень широком спектре температур (от ~ 0.1 до ~ 20 МК). Заметим, что, несмотря на высокие значения $T_w = 6\text{--}40$ МК с медианой ~ 26 МК, превосходящие значения максимальной температуры по RHESSEI в диапазоне $T_{\max} = 0.5\text{--}25$ МК и медианой ~ 12 МК, нельзя сравнивать данные температуры прямым образом. Дело в том, что T_w характеризует распределение ДМЭ в целом, тогда как температура по RHESSEI определяется из однопериодной аппроксимации рентгеновского спектра в очень коротких волнах с энергиями (примерно $5\text{--}20$ кэВ), которые на самом деле недоступны AIA. Также AIA обладает слабой чувствительностью к излучению плазмы с температурой выше 20 МК, тогда как RHESSEI надежно измеряет рентгеновское излучение плазмы до очень высоких температур. В работе [47] показано, что в среднем отношение температур вспышечной плазмы (для 149 вспышек M и X) по данным RHESSEI и AIA составляет 1.9 ± 0.1 . Можно сказать, что в плане диагностики очень горячей плазмы следует больше доверять данным RHESSEI. В связи с этими рассуждениями есть соблазн считать плазму, по данным измерений рентгеновского излучения RHESSEI, более “прямо” связанной с областью вспышечного энерговыделения, в которой происходит магнитное пе-

ресоединение. Тогда как плазма, наблюдаемая в ЭУФ диапазоне, определяется в большей степени эффектом хромосферного испарения и потому только косвенно связана с областью пересоединения в короне. Другими словами, в полный поток рентгеновского излучения имеется большой вклад от горячей плазмы, непосредственно нагревающей внутри (или в окрестности) пересоединяющегося токового слоя (вероятными ударными волнами, турбулентностью, диссипацией электрического тока и т.д.). Данный вопрос следует более подробно исследовать в дальнейшем. Здесь мы только высказываем гипотезу, почему анализ данных AIA и RHESSEI может приводить к различным результатам.

Также заметим, что в рамках анализа тепловых рентгеновских спектров по данным RHESSEI обнаружено, что плотность плазмы вспышек с солнцетрясениями несколько больше (медианы отличаются примерно в три раза), чем для вспышек без фотосферных возмущений, а также есть корреляция ($P_{cc} = 0.58$) энергии солнцетрясений с максимальной температурой плазмы. Это, возможно, косвенно свидетельствует в пользу того, что в гелиосейсмически активных солнечных вспышках больше горячих электронов в хвосте Максвелловского распределения, которые более эффективно могут ускоряться. Однако это утверждение достаточно спекулятивно, поскольку плотность плазмы определяется специфическим образом, а деталей физики ускорения мы не знаем. В каталоге GEVIII характерный линейный размер определяется, как и в GEII, на базе анализа ДМЭ карт (см. подробнее выше). Вообще говоря, учитывая естественный ход ДМЭ, характеризующийся тем, что в области высоких температур (примерно более 10 МК) плазмы меньше, мы вправе ожидать меньшие объемы плазмы, испускающей тормозное рентгеновское излучение. Однако RHESSEI не позволяет получать изображения с широким динамическим диапазоном и высоким (сравнимым с AIA) пространственным разрешением, и потому мы не можем оценить реальные размеры самой горячей части вспышечной области. Следовательно, оценки плотности плазмы по RHESSEI достаточно спорны. Из-за этого мы также не приводили график корреляции гелиосейсмической энергии с плотностью плазмы по RHESSEI (однако анализ показал, что корреляции фактически нет). Таким образом, мы снова приходим к важности более точного определения геометрических размеров вспышечных областей, необходимого для лучшего понимания особенностей энерговыделения гелиосейсмически активных вспышек.

Теперь перейдем к обсуждению важнейшего результата данной статьи. Вообще говоря, проведенный статистический анализ указывает на то, что наличие повышенных потоков нетеплового

рентгеновского излучения является яркой особенностью гелиосейсмически активных солнечных вспышек. Это косвенно свидетельствует в пользу больших потоков ускоренных электронов по сравнению со вспышками без фотосферного отклика. Также мы получили явную корреляцию (наилучшую среди других исследованных параметров) гелиосейсмической энергии с потоками рентгеновского излучения. Что нам мешает на основании данных результатов сказать о доказанности гипотезы генерации гелиосейсмических возмущений высыпавшимися электронами в нижние слои солнечной атмосферы?

Во-первых, с точки зрения физики, повышенные полные (пространственно интегрированные) потоки нетеплового рентгеновского излучения и, следовательно, повышенные потоки ускоренных электронов могут быть вторичным (сопутствующим) явлением по отношению к какому-то другому более важному параметру вспышечного энерговыделения. Ускорение заряженных частиц, скорее всего, является результатом воздействия на популяции электронов либо крупномасштабных, либо мелкомасштабных электрических полей, генерируемых за счет магнитного пересоединения и различных неустойчивостей пересоединяющегося токового слоя (в самых разных геометриях магнитного поля). Интенсивное магнитное пересоединение может сопровождаться другими значимыми процессами, которые могут воздействовать на нижние слои солнечной атмосферы. Например, эруптивный процесс и динамика магнитного поля на уровне фотосферы могут коррелировать с темпом магнитного пересоединения. Сама эрупция может быть причиной магнитного пересоединения во время импульсной фазы солнечной вспышки, стимулирующая быстрые изменения магнитного поля в нижних слоях солнечной атмосферы [48–50]. В результате скачка магнитного поля может возникнуть импульсная сила Лоренца, теоретически способная генерировать фотосферные возмущения (см. Введение). Также параллельно с ускорением электронов могут ускоряться ионы в самом широком диапазоне энергий. Причем ионы могут быть более предпочтительным агентом (в силу большей массы по сравнению с электронами) возбуждения солнцетрясений [16]. Соответственно, повышенные потоки ускоренных электронов могут косвенно свидетельствовать в пользу ускоренных ионов, само наличие которых и их характеристики крайне сложно надежно устанавливать из имеющихся наблюдательных данных. В будущих исследованиях влияние ускоренных МэВ-ных протонов на возмущение фотосферы может быть оценено по регистрации гамма-излучения. Однако пока не существует систематических наблюдений спектров гамма-излучения даже в режиме наблюдений “Солнце как звезда”.

Во-вторых, большую неопределенность в анализ вносит переход от описания потоков нетеплового рентгеновского излучения к потокам ускоренных электронов и к оценке их полной энергии. Мы использовали простейшую модель “толстой мишени” [34]. Однако в реальности перенос ускоренных частиц может быть гораздо сложнее с учетом дополнительных эффектов: захват в магнитные ловушки (например, [51]), обратный электрический ток (например, [51, 52]), мелкомасштабная турбулентность (например, [53]) и др.

Также спектр рентгеновского излучения зависит от особенностей мишени: теплая, толстая, тонкая, частичная ионизация плазмы и др. Учесть данные эффекты практически невозможно в рамках статистического анализа. Более того, такое исследование сложно сделать даже для отдельных солнечных вспышек. Дополнительные искажения регистрируемого жесткого рентгеновского излучения, усложняющие интерпретацию спектра, могут быть связаны с эффектом комптоновского рассеяния (или альbedo) от фотосферы (см., например, [54]), который зависит от гелиографической долготы и ширины вспышки.

Серьезным препятствием является пока непреодолимая проблема неопределенности низкоэнергетической границы, выше которой интегрируется спектр ускоренных электронов. Достаточно неожиданно было то, что мы получили корреляцию ($P_{cc} = 0.51$) нетепловой энергии (в рамках модели толстой мишени) с полной энергией солнцетрясений с учетом очень грубой оценки низкоэнергетической границы (мы брали пересечение тепловой и нетепловой части рентгеновского спектра).

Стоит также отметить, что мы в данном разделе опустили обсуждение очевидной важности пространственно разрешенных наблюдений и подключение других диапазонов электромагнитного спектра (в частности, микроволнового и гамма-диапазонов) к статистическому анализу. Здесь возникает так много задач, описание которых представляется излишним и выходящим далеко за рамки данной статьи.

В заключение мы хотим заметить, что полученные статистические результаты анализа особенностей энерговыделения гелиосейсмически активных солнечных вспышек являются фактически первыми в мире. Выводы, сделанные из анализа нетепловых рентгеновских спектров, пока только косвенно свидетельствуют в пользу гипотезы генерации солнцетрясений ускоренными электронами. Необходимо дальнейшие обширные исследования. Полученные результаты в данной статье мы рассматриваем как “затравку” для будущих наших (и других авторов) статистических исследований. Во-первых, необходимо бу-

дет уточнять полученные результаты для расширенных выборок вспышек. Во-вторых, совершенствование методик по ряду направлений (см. выше обсуждения) и подключение к статистическому анализу других параметров солнечных вспышек (магнитное поле, динамика КВМ и др.) позволят значительно улучшить понимание условий генерации солнцетрясений. Наряду с анализом данных наблюдений необходимо развивать моделирование солнцетрясений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленная работа поддержана грантом РФФ № 23-72-30002.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи утверждают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Wolff, *Astrophys. J.* **176**, 833 (1972).
2. A. G. Kosovichev and V. V. Zharkova, *Helioseismology* (Paris: ESA, in ESA Special Publication 376, ed. J. T. Hoeksema et al., 341, 1995).
3. A. G. Kosovichev and V. V. Zharkova, *Nature* **393**, 317 (1998).
4. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, et al., *Solar Phys.* **162**, 129 (1995).
5. V. Domingo, B. Fleck, and A. I. Poland, *Solar Phys.*, **162**, Is. 1–2, 1–37 (1995).
6. C. Lindsey and D. C. Braun, *Astrophys. J.* **485**, 895 (1997).
7. A.-C. Donea, D. C. Braun, and C. Lindsey, *Astrophys. J. Lett.* **513**, L143 (1999).
8. C. Lindsey and D. C. Braun, *Solar Phys.* **192**, 261 (2000).
9. J. C. Buitrago-Casas, J. C. Martínez Oliveros, C. Lindsey, et al., *Solar Phys.* **290**, 3151 (2015).
10. A. Donea, *Space Sci. Rev.* **158**, 451 (2011).
11. A. G. Kosovichev, *Extraterrestrial Seismology* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, ed. V. Tong & R. García, 306, 2015).
12. A. G. Kosovichev, *Solar Phys.* **238**, 1 (2006).
13. A. G. Kosovichev and T. Sekii, *Astrophys. J. Lett.* **670**, L147 (2007).
14. I. N. Sharykin, A. G. Kosovichev, V. M. Sadykov, I. V. Zimovets, and I. I. Myshyakov, *Astrophys. J.* **843**, 67 (2017).
15. J. T. Stefan and A. G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **895**, 65, 15 (2020).
16. V. M. Sadykov, J. T. Stefan, and A. G. Kosovichev, eprint arXiv:2306.13162 (2023).
17. S. Zharkov, L. M. Green, S. A. Matthews, and V. V. Zharkova, *Astrophys. J. Lett.* **741**, L35 (2011).
18. S. Zharkov, L. M. Green, S. A. Matthews, and V. V. Zharkova, *Solar Phys.* **284**, 315 (2013).
19. H. S. Hudson, G. H. Fisher, and B. T. Welsch, *Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity* (San Francisco, CA: ASP, ASP Conf. Ser. 383, ed. R. Howett et al., 221, 2008).
20. G. H. Fisher, D. J. Bercik, B. T. Welsch, and H. S. Hudson, *Solar Phys.* **277**, 59 (2012).
21. J. D. Alvarado-Gómez, J. C. Buitrago-Casas, J. C. Martínez-Oliveros, et al., *Solar Phys.* **280**, 335 (2012).
22. O. Burtseva, J. C. Martínez-Oliveros, G. J. D. Petrie, and A. A. Pevtsov, *Astrophys. J.* **806**, 173 (2015).
23. A. J. B. Russell, M. K. Mooney, J. E. Leake, and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **831**, 42 (2016).
24. I. N. Sharykin, A. G. Kosovichev, and I. V. Zimovets, *Astrophys. J.* **807**, 102 (2015).
25. I. N. Sharykin and A. G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **808**, 72 (2015).
26. D. Besliu-Ionescu, A. Donea, and P. Cally, *Sun and Geosphere* **12**, 59 (2017).
27. R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford, et al., *Solar Phys.* **210**, 3 (2002).
28. R. Chen and J. Zhao, *Astrophys. J.* **908**, 182, 14 (2021).
29. I. N. Sharykin and A. G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **895**, 76, 14 (2020).
30. P. H. Scherrer, J. Schou, and R. I. Bush, *Solar Phys.* **275**, Is. 1–2, 207–227 (2012).
31. W. D. Pesnell, B. J. Thompson, and P. C. Chamberlin, *Solar Phys.* **275**, 3–15 (2012).
32. W. M. Neupert, *Astrophys. J. Lett.* **153**, L59 (1968).
33. B. R. Dennis and D. M. Zarro, *Solar Phys.* **146**, 177 (1993).
34. J. C. Brown, *Solar Phys.* **18**, Is. 3, 489–502 (1971).
35. M. A. Livshits, O. G. Badalian, A. G. Kosovichev, and M. M. Katsova, *Solar Phys.* **73**, 269 (1981).
36. G. H. Fisher, R. C. Canfield, and A. N. McClymont, *Astrophys. J.* **289**, 414 (1985).
37. A. G. Kosovichev, *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory* **75**, 6 (1986).
38. J. C. Allred, A. F. Kowalski, and M. Carlsson, *Astrophys. J.* **809**, 104 (2015).
39. H. Wu, Y. Dai, and M. D. Ding, *Astrophys. J. Lett.* **943**, L6, 7 (2023).
40. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, et al., *Solar Phys.* **275**, Is. 1–2, 17–40 (2012).
41. M. J. Aschwanden, E. P. Kontar, and N. L. S. Jeffrey, *Astrophys. J.* **881**, 1, 22 (2019).
42. M. J. Aschwanden, P. Boerner, D. Ryan, et al., *Astrophys. J.* **802**, 53, 20 (2015).
43. M. J. Aschwanden, G. Holman, A. O’Flannagain, et al., *Astrophys. J.* **832**, 1, 27, 20 (2016).
44. E. P. Kontar, N. L. S. Jeffrey, A. G. Emslie, and N. H. Bian, *Astrophys. J.* **809**, 1, 35, 11 (2015).
45. M. J. Aschwanden, P. Boerner, A. Caspi, et al., *Solar Phys.* **290**, 10, 2733–2763 (2015).
46. R. L. Apteekar, D. D. Frederics, and S. V. Golenetskii, *Space Science Reviews* **71**, Is. 1–4, 265–272 (1995).
47. D. F. Ryan, A. M. O’Flannagain, M. J. Aschwanden, and P. T. Gallagher, *Solar Phys.* **289**, 2547 (2014).
48. G. J. D. Petrie, *Astrophys. J.* **759**, 50, 18 (2012).

49. *S. Wang, C. Liu, R. Liu, N. Deng, Y. Liu, and H. Wang*, *Astrophys. J. Lett.* **745**, L17, 5 (2012).
50. *I. N. Sharykin, I. V. Zimovets, and A. V. Radivon*, *Cosmic Research* **61**, 4, 265–282 (2023).
51. *A. N. Shabalin, Yu. E. Charikov, and I. N. Sharykin*, *Astrophys. J.* **931**, 1, 27, 13 (2022).
52. *V. V. Zharkova and M. Gordovskyy*, *Astrophys. J.* **651**, 1, 553–565 (2006).
53. *Yu. E. Charikov and A. N. Shabalin*, *Technical Physics* **66**, 1092–1099 (2021).
54. *E. P. Ovchinnikova, Yu. E. Charikov, A. N. Shabalin, and G. I. Vasil'ev*, *Geomagn. Aeron.* **58**, 7, 1008–1013 (2018).

STATISTICS OF THERMAL PLASMA PARAMETERS AND NON-THERMAL X-RAY SPECTRA OF SOLAR FLARES WITH HELIOSEISMIC RESPONSE

I. N. Sharykin^{a,#}, I. V. Zimovets^a, and A. G. Kosovichev^b

^a*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia*

^b*New Jersey Institute of Technology, Newark, USA*

We present the results of statistical analysis of various thermal plasma parameters and non-thermal X-ray spectra of helioseismically active (producing “sunquakes”) solar flares of the 24th solar cycle up to February 2014. Two samples of flares are compared: with helioseismic activity in the form of sunquakes and a sample of flares without photospheric disturbances. The dependences of the considered flare parameters on the energy of helioseismic disturbances are also investigated. Quantitative parameters of solar flares are taken from the statistical work of the Global Energetics series by Markus Ashwanden in 2014–2019. We consider thermodynamic plasma parameters derived from the analysis of RHESSI X-ray spectra and differential emission measure (from AIA EUV images), as well as the characterization of non-thermal X-ray spectra from RHESSI. Statistical analysis confirmed that helioseismically active solar flares are characterized by significantly larger fluxes of non-thermal X-ray emission compared to flares without photospheric perturbations. A good linear relationship between helioseismic energy and the total flux of non-thermal X-ray radiation and the total energy of accelerated electrons is found. It is shown that the power-law index of the nonthermal X-ray spectrum is not the parameter by which one can separate the two groups of flares under consideration. The analysis of the X-ray thermal spectra shows a slight difference between the flares with the sunsets.

Keywords: solar flares, helioseismic waves, sunquakes, X-ray emission, nonthermal electrons, photosphere, ultraviolet emission