

СТАТИСТИКА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ

© 2025 И. Н. Шарыкин^{1*}, И. В. Зимовец¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

Поступила в редакцию 17 сентября 2024 года; после доработки 20 октября 2024 года; принята к публикации 8 ноября 2024 года

В статье описываются результаты статистического анализа свойств корональных выбросов массы (КВМ) во вспышках с гелиосейсмическим откликом («солнцетрясениями») в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений на базе наблюдений солнечной короны в ультрафиолетовом (по данным SDO/AIA) и видимом (по данным SOHO/LASCO) диапазонах. Рассматривались выборки вспышек с разными нижними порогами по данным Geostationary Operational Environmental Satellites — GOES-классу: выше M1.0, M5.0 и M7.0. Также проведен корреляционный анализ между параметрами КВМ и полной энергией солнцетрясений. Дополнительно для вспышек выше M7.0-класса анализировалась информация по наличию радиовсплесков в широком диапазоне длин волн и жесткого рентгеновского излучения. Обнаружено, что выбросы, сопровождающие вспышки с гелиосейсмическим откликом, являются более скоростными в нижней короне по данным AIA по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Массы КВМ распределены примерно одинаковым образом независимо от наличия солнцетрясений во время вспышек. Анализ свойств диммингов показал, что они более импульсные с точки зрения временной динамики в случае вспышек с солнцетрясениями. Выбросы во вспышках выше M7.0-класса с гелиосейсмическим откликом менее скоростные и массивные во внешней короне по данным LASCO. Корреляционный анализ не выявил сильных взаимосвязей между акустической энергией и параметрами КВМ по AIA, но для нескольких параметров (кинетическая энергия, масса КВМ и глубина димминга) корреляция была достоверна по t -критерию. В отличие от вспышек с солнцетрясениями, зафиксировано практически полное отсутствие радиовсплесков III типа и редкое появление всплесков II типа для вспышек выше M7.0-класса без фотосферных возмущений. Спектральный пик микроволновых всплесков в среднем располагается на более высоких частотах во вспышках с солнцетрясениями, чем во вспышках без них. Согласно результатам нашего анализа, вспышки с солнцетрясениями, вероятно, обладают свойством эффективной генерации скоростных корональных диммингов и ударных волн на фоне плохо развитых КВМ высоко в короне (в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений) и яркими проявлениями ускорения электронов, уходящих из области ускорения как в сторону поверхности Солнца, так и от нее. На наш взгляд, это указывает на то, что возможность эруптивной природы солнцетрясений нельзя сбрасывать со счетов. Ускоренные электроны могут быть как первичным, так и вторичным агентом, формирующим фотосферное возмущение.

Ключевые слова: *Солнце: активность — Солнце: корона — Солнце: корональные выбросы массы (CME) — Солнце: вспышки — Солнце: радиоизлучение — Солнце: УФ-излучение — Солнце: рентгеновское излучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Гелиосейсмические возмущения солнечных вспышек (или солнцетрясения, англ. sunquakes) наблюдаются на фотосферных картах доплеровских скоростей в виде концентрических волн, с разной степенью анизотропии распространяющихся из мощных локализованных фотосферных возмущений. Впервые данное явление описали Kosovichev and Zharkova (1998), которые проанализировали доплерограммы, полученные прибором

Michelson Doppler Imager (MDI, Scherrer et al., 1995) на борту космического аппарата SOHO (Domingo et al., 1995). Фотосферные возмущения, наблюдаемые во время солнцетрясения, появляются в результате рефракции внутри конвективной зоны генерируемых сопутствующих акустических волн. Из-за роста температуры акустические лучи загигаются к поверхности, и в результате формируются акустические фронты волн, косо падающие изнутри конвективной зоны на поверхность Солнца.

Наиболее полный и систематический каталог

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

вспышек с гелиосейсмической активностью, наблюдавшихся в 24-м цикле (далее этот каталог упоминается как SQ24), представлен в работе Sharykin and Kosovichev (2020), где было показано, что вспышки с гелиосейсмическим откликом появляются в среднем примерно в каждом пятом событии (если рассматривать вспышки выше M1.0 класса). Таким образом, обсуждаемое явление не является исключительно редким и должно рассматриваться в качестве реального дополнительного источника информации об энерговыделении солнечных вспышек. Однако солнцетрясения крайне мало исследуются с точки зрения наблюдений и теории.

На сегодняшний день нет четкого понимания природы гелиосейсмической активности солнечных вспышек. В работах Doney (2011), Kosovichev (2015) представлены обзоры свойств гелиосейсмических возмущений, продуцируемых солнечными вспышками, а также обсуждаются возможные механизмы генерации акустических волн. Существует несколько гипотез о появлении и причинах солнцетрясений:

- 1) солнцетрясения могут возникать в результате быстрого нагрева фотосферы высыпавшимися ускоренными электронами (например, Kosovichev and Zharkova, 1995; Kosovichev, 2006; Sharykin et al., 2017);
- 2) еще более мощными агентами инициации солнцетрясений могут быть ускоренные протоны (Sadykov et al., 2024);
- 3) возмущение давления, необходимое для генерации волн солнцетрясений, может быть следствием нагрева фотосферы потоками ультрафиолетового излучения из хромосферы (Doney, 2011); потоки излучения могут также быть связаны с нагревом плазмы ускоренными частицами;
- 4) импульс фотосферной плазме может передаваться за счет быстрых изменений градиента давления (например, из-за эрупции магнитного жгута, см. Zharkov et al., 2011; 2013);
- 5) перестройка магнитного поля во время вспышек может приводить к появлению импульсной силы Лоренца, которая может генерировать фотосферное возмущение (Hudson et al., 2008; Alvarado-Gómez et al., 2012; Fisher et al., 2012; Burtseva et al., 2015; Russell et al., 2016);
- 6) быстрая диссипация электрических токов в нижних слоях солнечной атмосферы (Sharykin and Kosovichev, 2015; Sharykin et al., 2015).

Нельзя исключать вариант одновременного действия разных механизмов и то, что их вклад может изменяться в ходе развития вспышки. На сегодняшний день наиболее популярной теорией является предположение о том, что ускоренные

заряженные частицы инициируют гелиосейсмическое возмущение. Большинство исследований этого явления так или иначе касается возможности инициировать солнцетрясения ускоренными частицами.

Кроме изучения отдельных вспышек, предпринимались усилия по статистическому анализу гелиосейсмических возмущений. В частности, на базе каталога SQ24 в работе Sharykin and Kosovichev (2020) было показано, что полная энергия солнцетрясений лучше коррелирует с максимумом производной потока рентгеновского излучения по GOES. Также гелиосейсмически активные солнечные вспышки более импульсны (имеют малые длительности импульсной фазы) по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Данный факт косвенно свидетельствует в пользу гипотезы об ускоренных электронах. Согласно эффекту Нойперта (Neupert, 1968; Veronig et al., 2005), производная профиля потока мягкого рентгеновского излучения по времени пропорциональна потоку жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, более импульсные гелиосейсмически активные вспышки с большими значениями временной производной мягкого рентгеновского излучения характеризуются большими потоками ускоренных электронов.

Sharykin et al. (2023) провели систематические исследования тепловых параметров плазмы (по каталогу из работы Aschwanden et al., 2015) и параметров спектров жесткого рентгеновского излучения (по каталогу из работы Aschwanden et al., 2019) для гелиосейсмически активных солнечных вспышек из каталога SQ24. Было показано, что вспышки, сопровождающиеся солнцетрясениями, характеризуются большими (примерно на порядок больше, чем для вспышек без солнцетрясений) потоками жесткого рентгеновского излучения, но при этом жесткость спектра не отличается от обычных вспышек (что не согласуется с результатами работы Wu et al., 2023). Несмотря на обнаруженные свидетельства того, что гелиосейсмически активные солнечные вспышки сопровождаются большими потоками ускоренных электронов, окончательно сделать вывод об инициировании фотосферных возмущений и последующих солнцетрясений электронами нельзя. Дело в том, что ускоренные электроны могут быть лишь косвенным подтверждением сопутствующего ускорения протонов, которые могут рассматриваться как более предпочтительный источник сильного фотосферного возмущения (Sadykov et al., 2024). Также можно предположить, что ускоренные заряженные частицы играют второстепенную роль в создании фотосферных возмущений относительно процесса перестройки магнитного поля или выбросов.

Заметим, что во многих моделях солнечных вспышек основное энерговыделение осуществляется посредством магнитного пересоединения в корональных токовых слоях, формируемых за счет развития эруптивного процесса (например, Priest and Forbes, 2002; Aulanier et al., 2012). Именно выбросы скрученных магнитных жгутов могут быть первичным звеном в серии энерговыделения солнечных вспышек от короны до фотосферы. В данной работе мы статистически анализируем свойства КВМ, сопровождающие солнечные вспышки, в контексте их гелиосейсмической активности и наличия фотосферных возмущений. Основной целью работы является поиск различий физических свойств КВМ во вспышках с солнцетрясениями и вспышках без фотосферных возмущений. Прежде всего речь идет о разнице в морфологии и основных характеристиках движения КВМ. Мы рассматриваем две основные задачи для данной работы:

- 1) сравнительный анализ групп вспышек с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений по различным параметрам КВМ и сопутствующих явлений в разных диапазонах GOES-классов (начиная с M1.0, M5.0 и M7.0);
- 2) анализ корреляционных связей между различными исследуемыми параметрами КВМ и энергией гелиосейсмических волн, оцененных с помощью метода акустической голографии.

Помимо введения в статье еще шесть разделов. В разделе 2 кратко описаны используемые данные наблюдений, каталог SQ24, а также каталоги, из которых взяты необходимые параметры КВМ и сопутствующих явлений в рамках рассматриваемых задач. В разделах 3 и 4 приведены результаты сравнения выборок вспышек по параметрам КВМ и диммингов соответственно. Итоги корреляционного анализа параметров КВМ с энергетикой солнцетрясений даны в разделе 5. Раздел 6 представляет подробное сравнение групп мощных вспышек (выше класса M7.0) с солнцетрясениями и без них. В разделе 7 сформулированы и обсуждаются основные результаты работы.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ, КАТАЛОГИ, ВЫБОРКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И МЕТОДЫ

В данной работе мы, главным образом, исследуем статистику параметров КВМ для вспышек с гелиосейсмической активностью. Наше исследование базируется на двух подходах. Мы проводим сравнительный анализ параметров вспышек с солнцетрясениями и вспышек с фотосферными возмущениями (первые являются подмножеством вторых), а также вспышек без зарегистрированных фотосферных возмущений. Вспышки мы разделили на подвыборки по классам GOES: выше M1.0,

выше M5.0 и выше M7.0. В последнем случае для наиболее мощных событий проведен более подробный сравнительный анализ по низкочастотным радиовсплескам, жесткому рентгеновскому и микроволновому излучениям на базе опубликованных каталогов (детальнее см. соответствующие разделы ниже в статье). Рассмотрение трех разных выборок по диапазонам GOES-классов с фиксированной нижней границей связано с тем, что одной из задач является рассмотрение случаев с меньшим разбросом параметров КВМ из-за «эффекта большой вспышки», так как чем шире диапазон GOES-классов, тем шире разброс других параметров и наоборот (Kahler, 1982). Также мы рассматриваем более мощные вспышки, поскольку для них, вероятно, определение характеристик КВМ является относительно более точным за счет более сильного сигнала (если принять во внимание тот факт, что для более энергичных событий регистрируется более мощный сигнал в самых разных каналах энерговыделения).

Выборка солнечных вспышек с солнцетрясениями и фотосферными возмущениями сформирована по данным каталога SQ24. Методы построения каталога и критерии определения солнцетрясений в солнечных вспышках представлены в работе Sharykin and Kosovichev (2020). Заметим, что под фотосферными возмущениями мы понимаем более общий случай вспышечного энерговыделения, во время которого наблюдается возмущение на доплерограммах и картах интенсивности по данным Helioseismic and Magnetic Imager (HMI, Scherrer et al., 2012) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO, Pesnell et al., 2012). При этом солнцетрясения являются частным случаем фотосферных возмущений. Другими словами, существует значительное число вспышек с четкими возмущенными областями на доплерограммах, но без гелиосейсмических волн.

Для данной работы в выборку вспышек с гелиосейсмическим откликом мы отобрали те события, для которых были произведены оценки интегральной акустической мощности солнцетрясения методом акустической голографии (например, Lindsey and Braun, 2000). Напомним, что в работе Sharykin and Kosovichev (2020) достоверным источником гелиосейсмических волн считался тот, который дает сигнал выше 3σ (по оценкам перед началом события).

На рис.1 приведены гистограммы для созданных выборок вспышек (количество событий в выборках показано на рисунке) с солнцетрясениями, с фотосферными возмущениями и без какого-либо фотосферного возмущения: на панели (а) распределение по GOES-классу и на панели (б) в зависимости от гелиографической долготы вспышки. Видно, что медианы распределений

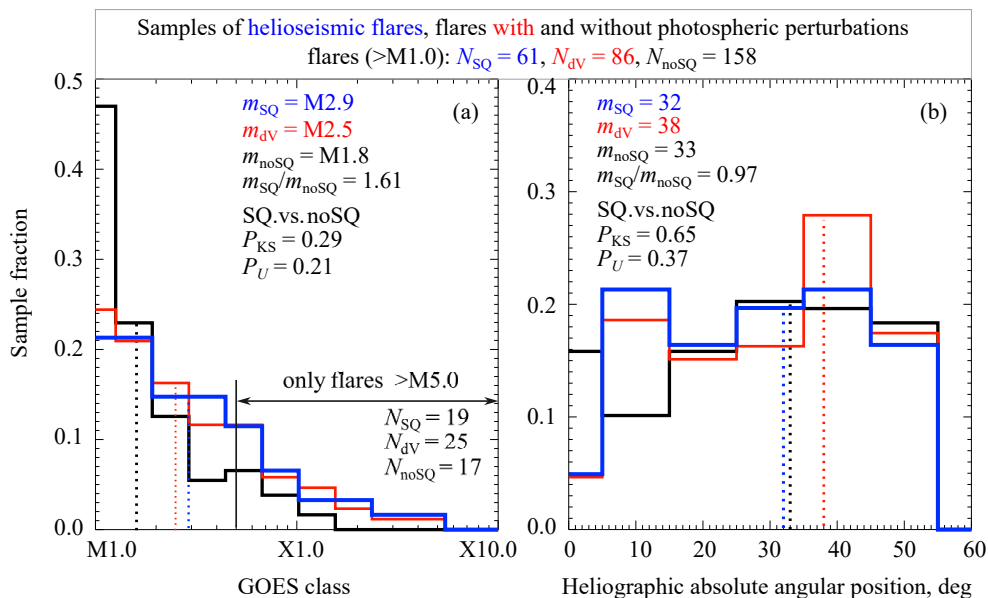


Рис. 1. Гистограммы нормированных распределений вспышек по GOES-классам (a) и по абсолютному угловому положению вспышки на гелиографической сетке (b) для трех выборок: вспышки без фотосферных возмущений, noSQ (черный), вспышки с фотосферными возмущениями, dV, включая гелиосейсмически активные события (красный), только гелиосейсмически активные солнечные вспышки, SQ (синий). Число членов каждой выборки указано в верхней части рисунка (N с соответствующим нижним индексом). Приведены значения медиан, показанных вертикальными пунктирными линиями для трех выборок, и сравнение близости распределений по тесту Колмогорова–Смирнова (вероятность совпадения P_{KS}) и близости значений медиан распределений noSQ и SQ (черный и синий цвета) по U -тесту Манна–Уитни (вероятность совпадения P_U). Двухсторонней стрелкой на панели (a) показана область вспышек с рентгеновским классом выше M5.0.

по GOES-классам отличаются в 1.61 раза в пользу гелиосейсмически активных вспышек, но при этом статистически значимой разницы между всеми распределениями нет согласно тесту Колмогорова–Смирнова (сравнение распределений в целом) и U -тесту Манна–Уитни (сравнение медиан распределений).

Статистическая информация по КВМ взята нами из каталога GEIV¹ (Aschwanden, 2016). Анализ свойств КВМ в настоящей работе основывался на данных наблюдений солнечной короны в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (ЭУФ) с помощью телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA, Lemen et al., 2012). Также в нашем исследовании вспышек с рентгеновским классом выше M7.0 мы используем каталог КВМ² (LASCO CME catalog, Gopalswamy et al., 2009). База данных КВМ создана на основе наблюдений солнечной короны в оптическом диапазоне с помощью космического коронографа LASCO (Brueckner et al., 1995) на борту Solar Orbital Heliospheric Observatory (SOHO, Domingo et al., 1995). Стоит заметить, что мы не случайно используем два разных каталога КВМ, характеристики которых определялись

разными инструментами и методами. Детали методов построения каталогов GEIV и LASCO CME мы обсудим ниже по тексту.

Наряду с характеристиками КВМ мы рассматриваем наличие жесткого рентгеновского излучения по данным KONUS/WIND³ (Aptekar et al., 1995), микроволнового радиоизлучения по данным NoRP⁴ и наличие радиовсплесков различных типов по данным о событиях — events-файлам NOAA⁵. Имеющиеся сведения по нетепловому радиоизлучению и рентгеновскому излучению мы используем с целью найти и обсудить в случае обнаружения разницу в особенностях ускорения электронов в контексте развития эруптивного процесса для двух разных групп вспышек. Как упоминалось выше, выборки вспышек более мощных, чем M7.0, с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений мы рассматриваем отдельно, в разделе 6.

В решении поставленных задач мы опираемся на два методологических подхода: 1) сравнительный анализ выборок вспышек и 2) корреляционный анализ параметров вспышек с гелиосейсмической мощностью, определенной методом акустической

¹<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/831/105>

²https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

³<http://www.ioffe.ru/LEA/Solar/>

⁴Nobeyama Radiopolarimeters, <https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/>

⁵<ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>

голографии. В основе первого подхода лежит сравнение гистограмм распределений, составленных по различным параметрам КВМ и сопутствующих диммингов. Мы сравниваем медианы распределений и их форму. Медианы считаем разными, если вероятность их совпадения минимальна по U -тесту Манна–Уитни ($P_U < 5\%$), а распределения — если тест Колмогорова–Смирнова показывает вероятность (P_{KS}) совпадения ниже 5%. В статье мы будем в основном рассматривать различия между выборками вспышек с солнцетрясениями и вспышек без фотосферных возмущений (нижние индексы «SQ» и «noSQ» соответственно). Третья выборка с фотосферными возмущениями (индексы «dV») упоминается как промежуточная. Корреляционный анализ мы проводим путем расчета коэффициента корреляции по Пирсону (далее r_{ps}) и рангового коэффициента корреляции (далее r_{sc}).

3. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ КВМ: СРАВНЕНИЕ ВЫБОРОК

В данном разделе мы обсуждаем сравнение параметров КВМ по каталогу GEIV для трех выборок вспышек: с солнцетрясениями, с фотосферными возмущениями (включая солнцетрясения) и вспышек без гелиосейсмического отклика. Метод определения характеристик КВМ для каталога GEIV (см. подробно в работе Aschwanden, 2016) основывается на анализе динамики диммингов (dimming, см., например, обзор Webb and Howard, 2012). Данное явление наблюдается после эрупции как потемнение (самых разных масштабов и формы) на разностных ЭУФ-изображениях и объясняется как результат понижения плотности плазмы и, соответственно, интенсивности излучения. Метод определения характеристик КВМ предполагает использование модели адиабатического расширения области димминга (аппроксимацию геометрических характеристик димминга). Заметим, что он дополняет информацию о КВМ, который стандартно рассматривается с точки зрения наблюдений внешней короны по данным LASCO. Если коронограф дает информацию о полете (распространении) КВМ от нескольких радиусов Солнца, то AIA, предположительно, видит начальные кинематические особенности КВМ. В частности, в работе Aschwanden (2016) показано, что параметры КВМ по данным AIA и LASCO не имеют выраженной корреляции между собой. Также использование данных AIA позволяет определить характеристики слабых выбросов, тогда как небольшие выбросы либо не видны по LASCO, либо плохо выделяются на зашумленных коронограммах. Кроме того, в данных LASCO есть проблемы отождествления начала КВМ и его стартовой позиции относительно

слабой вспышки (слабые события часто бывают рядом в пространстве и во времени).

Результаты сравнения параметров КВМ для рассматриваемых выборок отображены на рис. 2 и 3. Гистограммы для скорости, массы и характерного времени распространения КВМ τ_{prop} показаны на рис. 2. Параметр τ_{prop} рассчитывается как отношение шкалы высот к скорости КВМ и позволяет оценить, как быстро КВМ проходит атмосферу Солнца (нижнюю корону). Распределения по кинетической энергии, площади возмущенной КВМ области короны, потенциальной энергии и отношению кинетической к потенциальной энергии представлены на рис. 3. Размеры возмущенной области определялись по амплитуде изменения дифференциальной меры эмиссии. На обоих рисунках в верхнем и нижнем ряду панелей представлены гистограммы выборок вспышек классов выше M1.0 и M5.0 соответственно.

Сравнение гистограмм показывает, что все три выборки идентичны с точки зрения распределения массы КВМ (панели (a1) и (a2)) на рис. 2), характерной площади (панели (b1) и (b2) на рис. 3) и потенциальной энергии (панели (c1) и (c2) на рис. 3), причем идентичность распределений потенциальной энергии фактически следует из схожести распределений масс и линейных размеров. Заметим, что указанные распределения совпадают еще сильнее в случае рассмотрения вспышек более мощных, чем M5.0 (ср. положение медиан на нижних и верхних панелях, а также соответствующие вероятности P_{KS} и P_U). В действительности, исключая из рассмотрения более слабые вспышки с менее четким определением параметров сопутствующих более слабых (в среднем, статистически) КВМ, мы подчеркиваем схожесть распределений массы и линейных размеров КВМ для вспышек с гелиосейсмическим откликом и с полным отсутствием каких-либо фотосферных возмущений.

Наибольшие отличия найдены в распределениях скоростных характеристик КВМ, причем в случае выборок вспышек выше M5.0-класса данные различия проявляются сильнее. Так, например, медианные значения скорости КВМ отличаются в 2.74 и 5.58 раза (соответственно для вспышек классов выше, чем M1.0 и M5.0) в случае выборок с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений (ср. (a1) и (a2) на рис. 2) в пользу гелиосейсмически активных вспышек. Для распределений времени τ_{prop} (панели (c1) и (c2) на рис. 2) имеем меньшие времена для вспышек с солнцетрясениями по сравнению со вспышками без них, при этом отношение медиан распределений равно примерно обратным значениям отношений

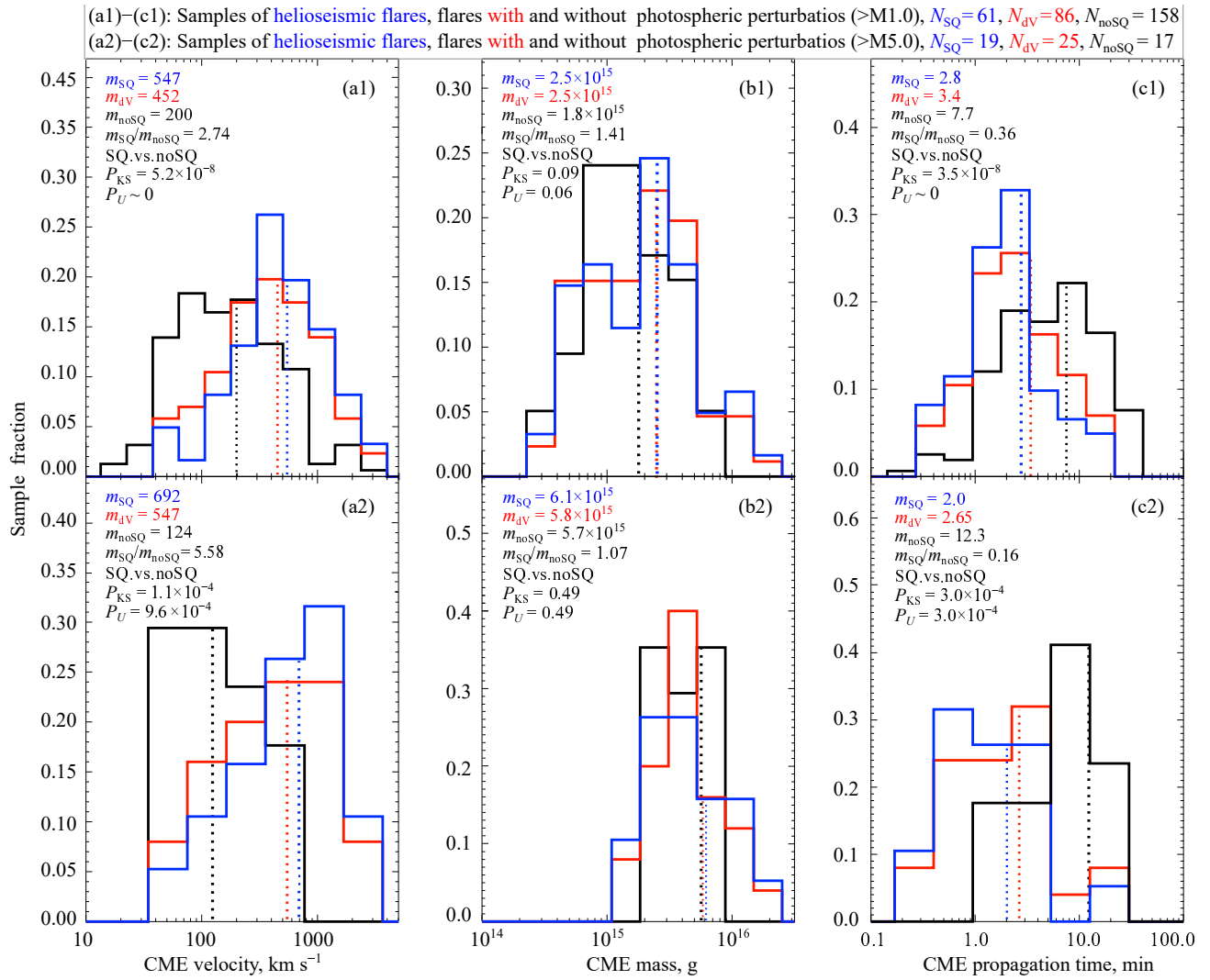


Рис. 2. Гистограммы нормированных распределений вспышек по параметрам КВМ из каталога GEIV, таким как скорость, масса и время распространения в короне (панели (а), (б) и (с) соответственно), для трех выборок: гелиосейсмически активные солнечные вспышки, SQ (синий цвет), вспышки с фотосферными возмущениями, dV, включая гелиосейсмически активные события (красный), и вспышки без фотосферных возмущений, noSQ (черный). Число членов каждой выборки указано в верхней части рисунка (N с соответствующим нижним индексом). Приведены значения медиан, показанных вертикальными штриховыми линиями, и сравнение близости распределений по тесту Колмогорова–Смирнова (вероятность совпадения P_{KS}) и близости значений медиан распределений noSQ и SQ (черный и синий цвета) по U -тесту Манна–Уитни (вероятность совпадения P_U). Подвыборкам вспышек классов выше M1.0 соответствуют панели верхнего ряда, выше M5.0 — нижнего.

медиан распределений скоростей КВМ. Наибольшая разница между распределениями наблюдается для кинетических энергий КВМ (см. (a1) и (a2) на рис. 3). Отношение медиан m_{SQ}/m_{noSQ} равно 10.53 для вспышек классов выше M1.0 и 26.86 — для M5.0, что примерно соответствует квадрату отношения медиан распределений скоростей КВМ (панели (a1) и (a2) рис. 2). Распределения отношения кинетической энергии к потенциальной показывают, что гелиосейсмически активные вспышки характеризуются приблизительным равенством обеих энергий ($m_{SQ}[>M1] \approx 0.79$ и $m_{SQ}[>M5] \approx 1.3$), в отличие от вспышек без

фотосферных возмущений, потенциальная энергия которых фактически на 1–2 порядка выше кинетической ($m_{noSQ}[>M1] \approx 0.1$ и $m_{noSQ}[>M5] \approx 0.04$). По нашему мнению, данный факт является очень важным результатом, и в заключительном разделе мы к нему вернемся.

В итоге мы имеем на уровне нижней короны (по данным ЭУФ-изображений AIA) в среднем примерно одинаковые КВМ по массе и геометрическим размерам. При этом вспышки с солнцетрясениями характеризуются большей скоростью и кинетической энергией КВМ.

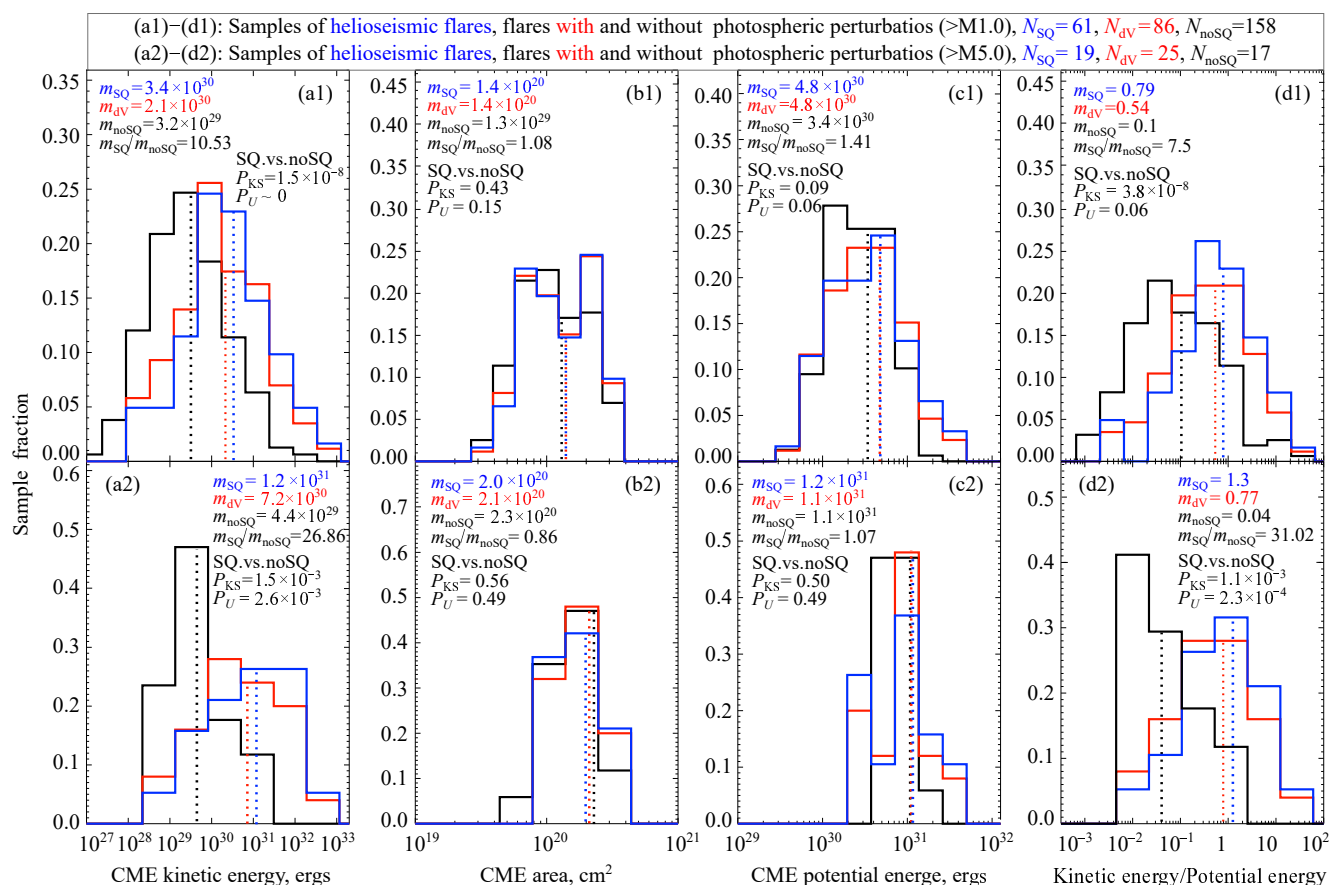


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но по таким параметрам, как кинетическая энергия КВМ — панели (а), площадь возмущения КВМ на диске Солнца — (б), потенциальная энергия КВМ — (с) и отношение кинетической энергии КВМ к потенциальной — (д).

4. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ДИММИНГОВ: СРАВНЕНИЕ ДВУХ ВЫБОРОК

В данном разделе мы рассматриваем разницу в распределениях параметров диммингов. Напомним, что метод заполнения таблицы каталога GEIV основан на анализе динамики диммингов и ее аппроксимации простыми аналитическими функциями. Фактически в рамках используемого каталога ставится равенство: динамика димминга есть динамика КВМ в нижней короне по ЭУФ-данным AIA. Таким образом, интересно проанализировать свойства диммингов в контексте сравнения наших выборок.

Данное сравнение иллюстрирует рис. 4, где показаны «глубина» димминга, его временная задержка и длительность. Под глубиной понимается амплитуда относительной вариации средней меры эмиссии (ЕМ) в области димминга: $(EM_{\max} - EM_{\min}) / (EM_{\max} - EM_{bg})$, где индекс «bg» обозначает фоновое значение меры эмиссии. В работе Aschwanden (2016) обсуждается тот факт, что чем ближе данная величина к единице, тем «проще» димминг. Под простотой понимается

импульсность динамики меры эмиссии. В сложных событиях мера эмиссии более растянутая по динамике и может иметь несколько пиков. На рис. 4 (панели (а)) видно, что вспышки с солнцетрясениями имеют более импульсную природу и простые димминги, согласно каталогу GEIV. Разница распределений SQ и noSQ в особенности хорошо заметна для вспышек более мощных, чем класс M5.0.

На рис. 4, панели (б), показаны распределения задержек начала диммингов относительно пика вспышечного потока мягкого рентгеновского излучения по данным GOES 1–8 Å. Несмотря на внешнюю похожесть распределений, используемые критерии сравнения находят различия между выборками (значимого различия по критерию Колмогорова–Смирнова не имеем только для вспышек выше M5.0-класса, панель (b2) рис. 4). В целом можно заметить, что распределения для вспышек с солнцетрясениями больше смещены в сторону малых времен.

В случае распределений длительностей диммингов (см. панели (с) рис. 4) обнаруживаются четкие указания на импульсность эруптивного процесса

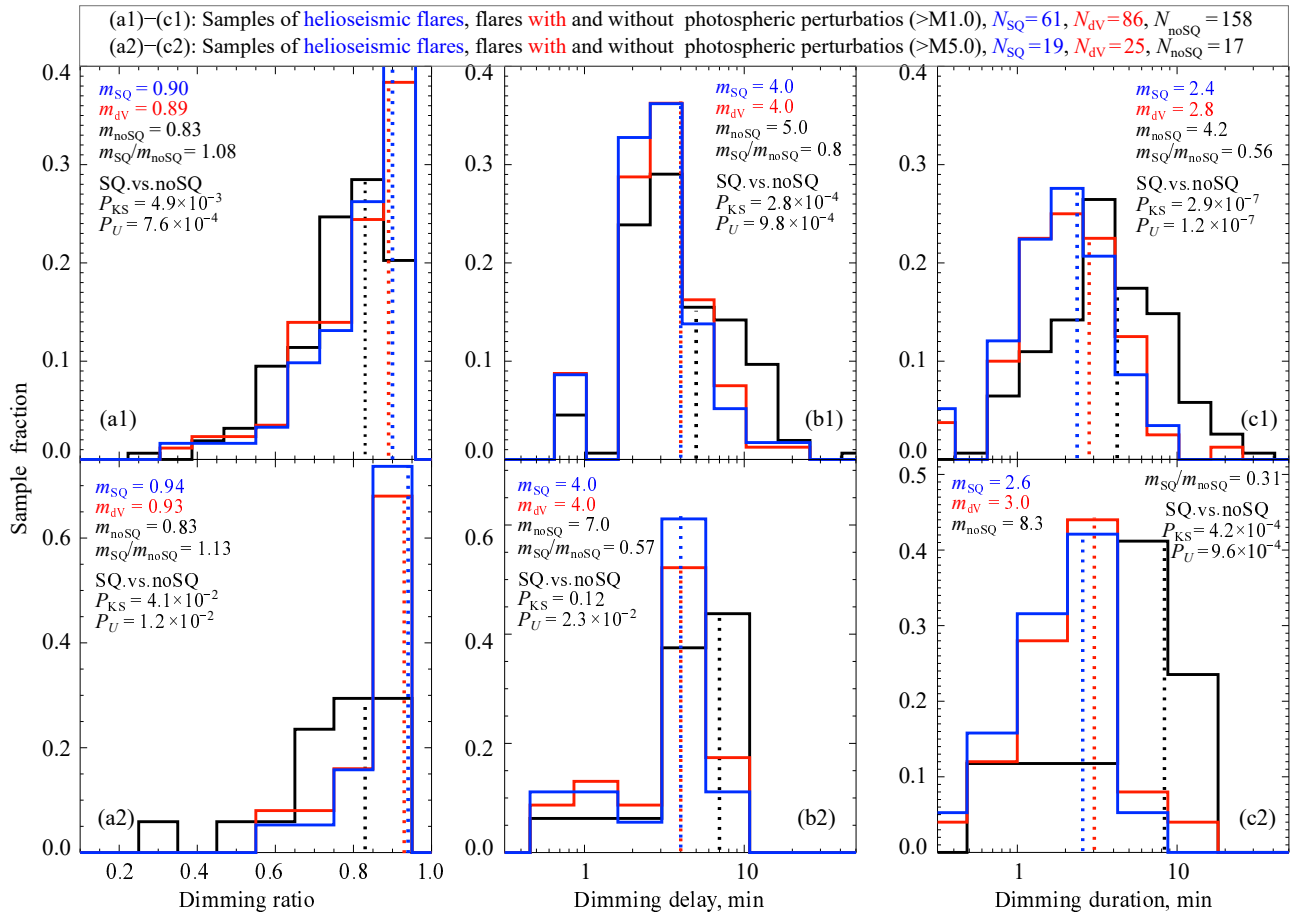


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но по параметрам диммингов. Панели (а) — относительный спад яркости, так называемая глубина димминга, (б) — временная задержка пика димминга и (с) — его длительность.

для вспышек с гелиосейсмическим откликом. Для вспышек класса выше $M5.0$ разница в медианах составляет более чем три раза ($m_{SQ} \approx 2.6$ против $m_{noSQ} \approx 8.3$ мин).

Сравнительный анализ распределений параметров диммингов для рассматриваемых выборок вспышек с разным уровнем фотосферной активности показывает, что для гелиосейсмически активных вспышек характерны импульсные быстрые димминги. Данный факт дополнительно подтверждает результаты предыдущего раздела, где рассматривались параметры КВМ.

5. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ КВМ, ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЦЕТРЯСЕНИЙ И РЕНТГЕНОВСКОГО КЛАССА ВСПЫШЕК С ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ

В предыдущих разделах мы рассмотрели распределения параметров КВМ и диммингов, сравнивая три выборки вспышек, разделенные по признаку проявления фотосферного энерговыделения.

Было найдено, что вспышки с солнцетрясениями характеризуются наиболее быстрыми и импульсными КВМ. Возникает вопрос о том, насколько полная акустическая энергетика⁶ солнцетрясений зависит от параметров эруптивного процесса. В данном разделе мы проводим корреляционный анализ между параметрами КВМ и полной гелиосейсмической энергией вспышек из каталога SQ24. Заметим, что в силу типичности степенных закономерностей в астрофизике (поскольку энергия по порядку величины зависит от параметров степенным образом) и широкого разброса значений параметров (примерно на два порядка) мы анализируем именно логарифмы значений.

Результаты корреляционного анализа для трех подвыборок: GOES-класс выше $M5.0$, быстрые КВМ $V_{CME} > 250$ км с⁻¹ и массивные КВМ $m_{CME} > 3 \times 10^{15}$ г, представлены на рис. 5 красным цветом (соответственно верхний, средний

⁶Под энергетикой здесь и далее подразумевается вся совокупность взаимосвязей и преобразований энергии события.

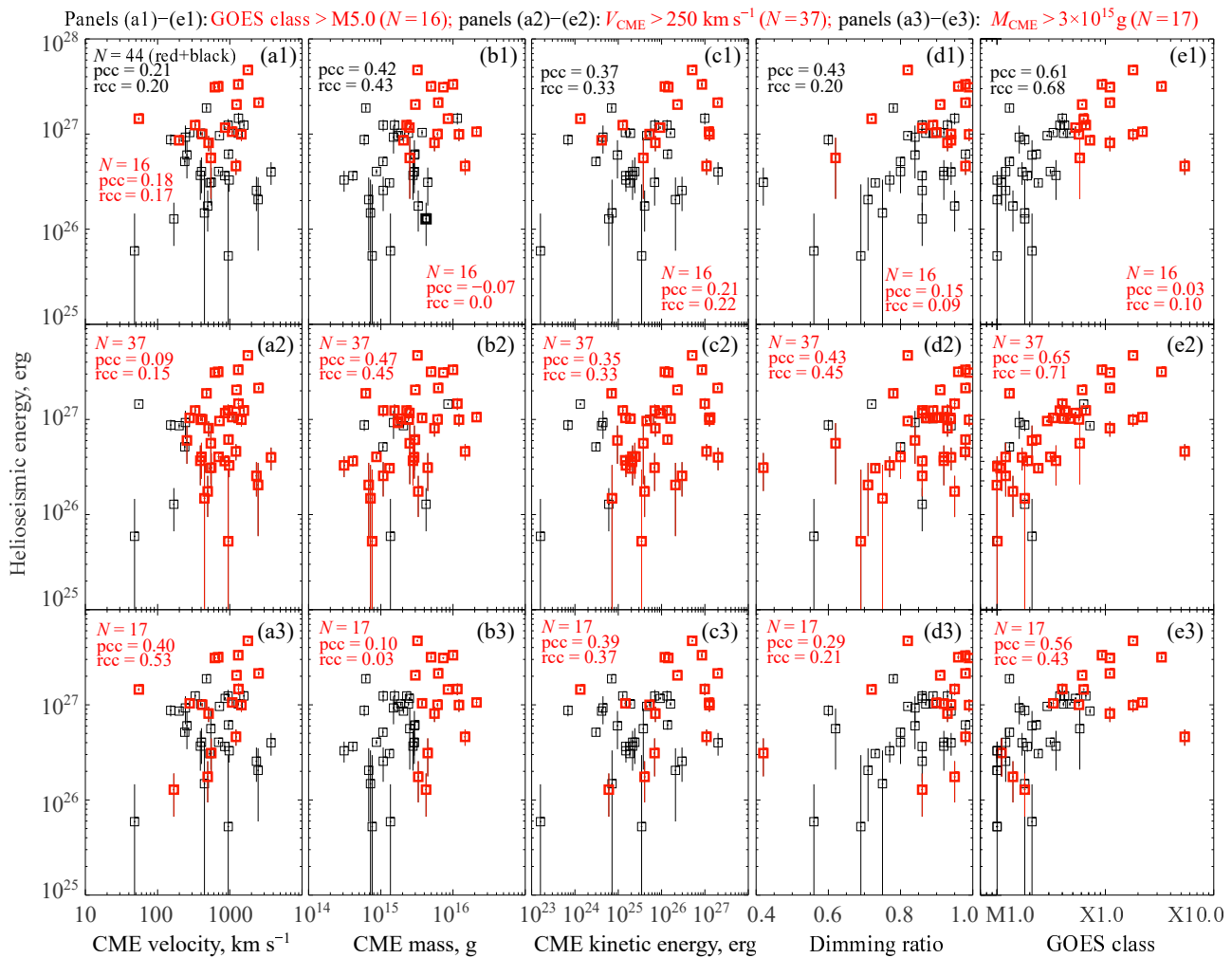


Рис. 5. Полная гелиосейсмическая энергия солнцетрясений солнечных вспышек и ее корреляционная взаимосвязь с параметрами сопутствующих КВМ, такими как (а) — скорость, (б) — масса, (с) — кинетическая энергия; а также с относительным перепадом яркости глубины димминга (д) и рентгеновским классом вспышки по GOES (е). Красным цветом показаны подвыборки, сформированные по следующим критериям: вспышки классов выше M5.0 (панели (a1)–(e1)); вспышки со скоростью КВМ, превышающей 250 km s^{-1} по данным каталога GEIV — (a2)–(e2); вспышки с массой КВМ выше $3 \times 10^{15} \text{ g}$ по данным каталога GEIV — (a3)–(e3). Количество событий в выборках N и коэффициенты корреляции рсс и гсс для данных подвыборок приведены на соответствующих панелях красным цветом. Черным цветом на панелях (a1)–(e1) указаны коэффициенты рсс и гсс для полной выборки из 44 вспышек с гелиосейсмическим откликом (все символы красного и черного цвета).

и нижний ряды панелей, где приведены также полученные коэффициенты корреляции рсс и гсс). Черным цветом показаны результаты для полной выборки вспышек с гелиосейсмическим откликом.

Наилучшая корреляция в случае полной выборки найдена для глубины димминга: $\text{pcc} = 0.44$ и $\text{gss} = 0.43$. Данный уровень является значимым (по порогу вероятности 5%) с точки зрения критерия для выборки в 44 вспышки. Однако заметим, что корреляционная взаимозависимость акустической энергии и GOES-класса выше, как и для других подвыборок (везде наилучшие корреляции с GOES-классом). Не очень высокие значения коэффициентов корреляции между параметрами

КВМ и энергией солнцетрясений, скорее всего, объясняются достаточно сильной неопределенностью оценок всех параметров КВМ, связанной с несовершенством метода, зашумленностью данных и эффектом проекции. Тем не менее мы имеем в отдельных случаях значимую корреляцию для полной выборки и ее значимо меньшие значения для рассматриваемых подвыборок. Заметим, что в работе Sharykin et al. (2023) были определены более сильные зависимости между акустической энергией и потоком жесткого рентгеновского излучения (до $\text{pcc} = 0.68$ для полного потока и низкоэнергетической границы 20 кэВ).

На рис. 6 приводятся результаты дополнитель-

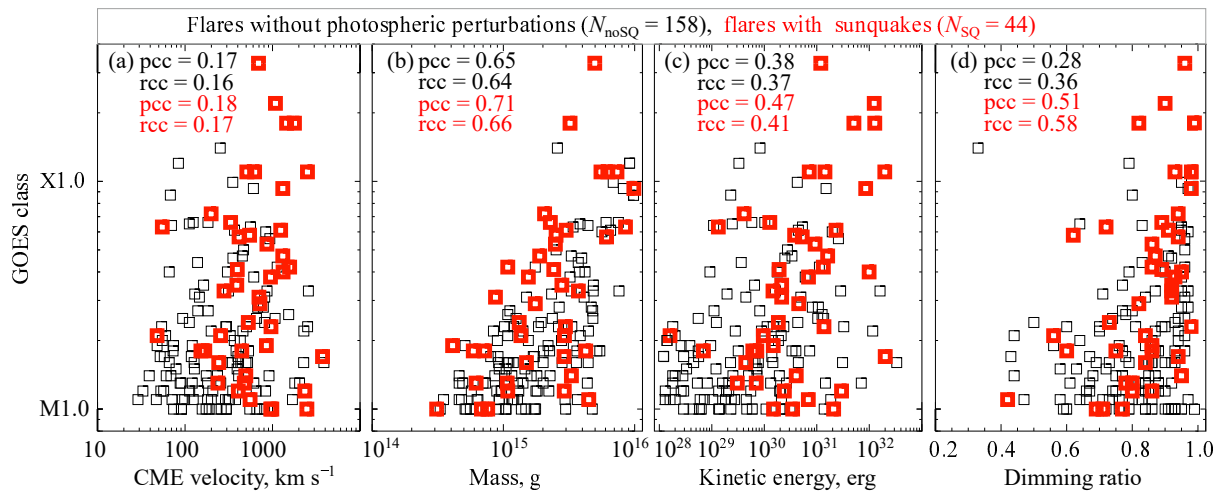


Рис. 6. Класс GOES солнечных вспышек и его корреляционная взаимосвязь с параметрами сопутствующих КВМ: (а) — скорость, (б) — масса, (с) — кинетическая энергия, и относительным перепадом яркости димминга (д) по каталогу GEIV. Красным цветом показаны события с гелиосейсмическим откликом и соответствующие значения коэффициентов корреляции; черными символами — все остальные вспышки. Коэффициенты корреляции для полной выборки (красные и черные квадраты) показаны черным.

ного корреляционного анализа между параметрами КВМ и GOES-классом для двух выборок: вспышки с солнцетрясениями (SQ, красный цвет) и без них (noSQ, черный). Видно, что значения коэффициента корреляции выше в случае вспышек с солнцетрясениями. Причем данный факт наиболее выражено (коэффициенты корреляции почти в два раза выше) проявляется для глубины димминга (см. рис. 6д). Наибольшая корреляция характерна для массы КВМ (рис. 6б), поскольку она связана с линейным размером возмущенной области (следовательно, коррелирует с пиковой мерой эмиссии). Корреляционные зависимости не различимы (и очень малы) между выборками в случае рассмотрения скорости КВМ (рис. 6а).

Корреляционный анализ показал, что сильной взаимосвязи между акустической энергией и параметрами КВМ нет: коэффициенты корреляции менее 0.5, хотя и достоверны по t -критерию в отдельных случаях (кинетическая энергия, масса КВМ и глубина димминга). Данный факт, скорее всего, связан с неопределенностью расчетов параметров КВМ, и поэтому корреляция акустической энергии с GOES-классом выглядит лучше на фоне сильно приближенных и модельных оценок свойств КВМ. Заметим, что в случае рассмотрения распределений параметров в предыдущих разделах мы легко разделили вспышки с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений, но внутри одной группы гелиосейсмически активных вспышек мы не видим ярких зависимостей энергетики солнцетрясений от параметров выбросов. При этом в случае GOES-класса мы не видим сильного разделения выборок (рис. 1а), но корреляция лучше с энергией солнцетрясений.

6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДВЫБОРОК НАИБОЛЕЕ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК

Здесь мы подробно рассматриваем две подвыборки вспышек: с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений, выделенные по мощности выше M7.0-класса. Данный порог выбран субъективно, специально для того, чтобы полностью сконцентрироваться на изучении самых мощных событий. Для них ожидаются максимальные проявления разных каналов вспышечного энерговыделения. В чем же особенность вспышек X1.0-класса без фотосферных возмущений? Что отличает их от аналогичных по мощности вспышек, генерирующих гелиосейсмические волны?

При обсуждении более слабых вспышек мы ограничились гистограммами распределений. Здесь считаем важным показать результаты сравнения выборок вспышек в таблицах с конкретными цифрами и примерами. Мы сравниваем свойства выборок по параметрам КВМ из каталога GEIV и каталога LASCO. Кроме этого, для событий из данных выборок рассматривается наличие нетепловых рентгеновских и радио всплесков, которые указывают на присутствие ускоренных электронов.

6.1. Свойства КВМ сравниваемых выборок вспышек по данным AIA из каталога GEIV

В этом подразделе мы приводим таблицы с данными по КВМ и диммингам из каталога GEIV: вспышки с солнцетрясениями (11 событий в таблице 1) и вспышки без фотосферных возмущений

Таблица 1. Параметры KBM и диммингов по данным каталога GEIV для вспышек класса более M7.0 с гелиосейсмическим откликом (SQ). В столбцах указаны: (2) и (3) — дата вспышки и ее класс по каталогу GOES, (4) — скорость, (5) — масса, (6)–(7) — кинетическая и потенциальная энергии, (8) — их отношение, (9) — глубина димминга KBM, (9) — максимальный энергетичный канал по данным рентгеновского телескопа Konus/Wind (KW), в котором детектировалось жесткое рентгеновское излучение вспышки, (11)–(12) — наличие (+) или отсутствие (–) радиовсплесков II и III типа по данным NOAA. Приведены также значения медиан и дисперсий параметров

No.	Дата и время вспышки (согласно GOES), UT	Класс GOES	V_{CME} , км с ⁻¹	M_{CME} , 10 ¹⁵ г	E_{kin} , 10 ³¹ эрг	E_{pot} , 10 ³¹ эрг	E_{kin}/E_{pot}	R_{dim}	KW	II	III
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	2012.03.07 00:02	X5.4	1220	14.70	10.9	2.8	3.89	0.98	G2	+	–
2	2013.11.05 22:00	X3.3	692	4.96	1.19	0.95	1.25	0.96	G3	+	+
3	2011.02.15 01:44	X2.2	1080	21.20	12.4	4.05	3.06	0.9	G2	+	+
4	2011.09.06 22:10	X2.1	3210	18.7	96.3	3.57	26.97	0.93	G3	+	+
5	2011.09.07 22:30	X1.8	1450	12.1	12.7	2.30	5.52	0.99	G3	+	+
6	2012.10.23 03:13	X1.8	1780	3.22	5.09	0.61	8.29	0.82	G3	+	+
7	2012.07.06 23:00	X1.1	509	5.54	0.72	1.06	0.68	0.93	G3	+	+
8	2013.11.08 04:20	X1.1	2510	6.25	19.7	1.19	16.55	0.98	G3	+	+
9	2013.11.10 05:08	X1.1	624	7.34	1.43	1.40	1.02	0.99	G2	+	+
10	2011.07.30 02:04	M9.3	1310	10.0	8.53	1.91	4.47	0.98	G3	+	–
11	2014.01.07 10:00	M7.2	199	2.06	0.04	0.39	0.10	0.94	G3	–	–
Медиана m_{SQ}		X2.0	1220	7.3	8.53	1.4	3.89	0.96			
Дисперсия D_{SQ}		X1.3	899	6.3	27.57	1.2	8.24	0.05			

(12 событий в таблице 2). Заметим, что все найденные по гистограммам особенности различия между выборками SQ и noSQ подтверждаются в случае событий выше M7.0 класса, и даже становятся более явными (см. последнюю строку с отношениями медиан выборок в таблице 2). В частности, отношение скоростей KBM составляет 8.71, а кинетических энергий — 142.2 (более чем на порядок). Также в случае гелиосейсмически активных вспышек кинетическая энергия KBM в 3.89 раза превышает потенциальную, тогда как в случае вспышек без фотосферных возмущений $E_{kin} \ll E_{pot}$. По глубине диммингов заметна еще большая разница между медианами и то, что в случае событий с солнцетрясениями димминги имели глубину, очень близкую к единице (что указывает на импульсность KBM).

В колонке (10) в таблицах 1 и 2 указана информация о наличии сигнала в наиболее энергетичном канале рентгеновского детектора KONUS/WIND (G1 20–80 кэВ, G2 80–300 кэВ или G3 300–1200 кэВ). Привлечение данных этого инструмента оправдано тем, что у него больше наблюдательного времени в точке L1 по сравнению с другими рентгеновскими телескопами (например, RHESSI и Fermi) на низких околоземных орбитах. Видно, что в случае гелиосейсмически активных

солнечных вспышек преобладает наиболее энергетичный канал G3 (8 из 11), а остальные вспышки себя проявили только в G2. Для вспышек без солнцетрясений были характерны регистрации в канале G2 (8 из 12), тогда как G1 и G3 были только в четырех случаях (по два в каждом канале). Примечательно, что только в данной выборке мы видим проявление в G1-канале. Фактически имеется разная эффективность ускорения в случае двух выборок. Более детально особенности жесткого рентгеновского излучения вспышек с солнцетрясениями обсуждались в статистической работе Sharykin et al. (2023). В настоящей работе мы обнаружили, что жесткость спектра нетеплового рентгеновского излучения не зависит от уровня «гелиосейсмичности» вспышки, а связана с потоками ускоренных электронов. Сравнение двух таблиц косвенно указывает на этот факт, но мы не проводим детального количественного анализа данных KONUS/WIND, поскольку это является отдельной большой работой.

6.2. Свойства KBM сравниваемых выборок вспышек из каталога LASCO CME

Ниже мы обсуждаем сравнение двух рассматриваемых выборок вспышек по параметрам KBM,

Таблица 2. То же, что и в таблице 1, но для вспышек класса выше M7.0 без фотосферного возмущения (noDV). В трех нижних строках таблицы приведены значения медиан и дисперсий параметров, а также отношения медиан двух выборок (из данной и предыдущей таблицы)

No.	Дата вспышки по каталогу GOES, UT	Класс GOES	V_{CME} , км с ⁻¹	M_{CME} , 10 ¹⁵ г	E_{kin} , 10 ³¹ эрг	E_{pot} , 10 ³¹ эрг	E_{kin}/E_{pot}	R_{dim}	KW	II	III
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	2011.03.09 23:10	X1.5	200	7.83	0.16	1.49	0.11	0.8	G2	+	—
2	2012.07.12 16:40	X1.4	253	2.58	0.08	0.49	0.17	0.33	G2	+	—
3	2012.03.07 01:05	X1.3	140	5.84	0.06	1.11	0.05	0.68	G3	+	—
4	2014.01.07 18:00	X1.2	84	9.17	0.03	1.75	0.02	0.79	G2	+	—
5	2012.03.05 02:30	X1.1	94	8.86	0.04	1.69	0.02	0.88	G2	—	—
6	2014.01.01 18:40	M9.9	351	6.87	0.42	1.31	0.32	0.95	G1	—	—
7	2013.10.24 00:21	M9.3	605	8.21	1.50	1.57	0.96	0.97	G2	+	+
8	2011.08.04 03:41	M9.3	289	6.49	0.27	1.24	0.22	0.92	G2	+	+
9	2012.01.23 03:38	M8.7	68	9.84	0.02	1.88	0.01	0.80	G3	—	—
10	2012.03.10 17:10	M8.4	59	5.67	0.01	1.08	0.01	0.77	G1	—	—
11	2011.09.25 04:31	M7.4	118	4.27	0.03	0.81	0.04	0.76	G2	—	—
12	2011.09.24 12:30	M7.1	62	4.21	0.01	0.80	0.01	0.79	G2	—	—
Медиана m_{noDV}		M9.9	140	6.86	0.06	1.31	0.05	0.8			
Дисперсия D_{noDV}		M2.6	162	2.24	0.42	0.43	0.27	0.17			
m_{SQ}/m_{noDV}		2.0	8.71	1.06	142.2	1.07	77.8	1.2			

определенным по наблюдениям солнечной короны в оптическом диапазоне инструментом LASCO. В таблицах 3 и 4 представлена стандартная информация по KBM из каталога LASCO для 11 событий из выборки вспышек с солнцетрясениями и 12 событий из выборки вспышек без фотосферного возмущений соответственно.

В результате сравнения данных двух таблиц мы приходим к неожиданному заключению о противоречии между результатами сравнения двух выборок по каталогам GEIV и LASCO. В случае GEIV вспышки с солнцетрясениями характеризуются более скоростными KBM с большой кинетической энергией по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. По данным каталога LASCO в выборке гелиосейсмически активных вспышек KBM регистрируется не во всех случаях (в девяти из 11) и скорости примерно в два раза меньше по сравнению с другой группой событий. Имеются морфологические различия с точки зрения разлета плазмы KBM: для вспышек с солнцетрясениями (из GEIV) только пять событий из 11 были типа «Halo», а в другой выборке девять из 12 были данного типа. Также KBM во время SQ-вспышек менее массивны по данным LASCO: медианы выборок отличаются примерно в 2.5 раза (при этом в каталоге GEIV различия выборок

по массе KBM были минимальны). Кинетическая энергия KBM по LASCO в 10 раз больше для вспышек без фотосферных возмущений, что противоречит результатам анализа данных каталога GEIV.

Фактически KBM в нижних слоях короны, по данным AIA, обладают высокими значениями кинетической энергии в случае вспышек с гелиосейсмическим откликом. Но по данным коронографа LASCO, KBM для таких вспышек обладают меньшей энергией в дальних областях солнечной короны и гелиосфере по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Данный факт мы будем обсуждать в заключительном разделе.

6.3. Радиовсплески во вспышках из сравниваемых выборок

Рассмотрим отдельно особенности появления радиовсплесков в мощных вспышках с солнцетрясениями и вспышках без фотосферных возмущений (столбцы (11) и (12) таблиц 1 и 2). Информация о событиях, связанных с солнечными вспышками и регистрируемых в радиодиапазоне, требует в контексте нашей работы развернутого пояснения, в отличие от рассмотренных выше наблюдений KONUS/WIND. Рентгеновское излучение в связи

Таблица 3. Параметры КВМ по данным каталога LASCO CME для вспышек выше M7.0 с гелиосейсмическим откликом (SQ). В столбцах приведены: (2) — дата и время вспышки по каталогу GOES, (3) — GOES-класс, (4) — время старта КВМ, (5) — позиционный угол PA оси КВМ относительно линии юг–север (метка «Halo» обозначает расходящееся во все стороны в картинной плоскости возмущение), (6) — угловая ширина КВМ (для «Halo» она равна 360°), (7)–(9) — скорости КВМ (по оценкам разными способами), (10) — масса КВМ и (11) — кинетическая энергия КВМ. Даны значения медиан и дисперсий параметров. Прочерк означает отсутствие данных

No.	Дата вспышки по GOES, UT	Класс GOES	T_{start} в C2, UT	PA оси	Угловая ширина, deg	$V_{\text{CME}}, \text{ км с}^{-1}$			$M_{\text{CME}},$ 10^{15} г	$E_{\text{kin}},$ 10^{31} эрг
						линейная	при r_{max}	при $r = 20R_{\odot}$		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	2012.03.07 00:02	X5.4	00:24	Halo	360	2684	2379	2594	1.4	50
2	2013.11.05 22:00	X3.3	22:36	160	195	562	502	508	4.8	0.77
3	2011.02.15 01:44	X2.2	02:24	Halo	360	669	508	471	4.3	0.97
4	2011.09.06 22:10	X2.1	23:06	Halo	360	575	589	582	15	2.5
5	2011.09.07 22:30	X1.8	23:06	290	167	792	782	756	1.1	0.36
6	2012.10.23 03:13	X1.8	—	—	—	—	—	—	—	—
7	2012.07.06 23:00	X1.1	23:24	Halo	360	1828	1612	1730	8.4	14
8	2013.11.08 04:20	X1.1	03:24	Halo	360	497	659	625	8.8	1.1
9	2013.11.10 05:08	X1.1	05:36	220	262	682	413	0	2.3	0.54
10	2011.07.30 02:04	M9.3	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2014.01.07 10:00	M7.2	10:36	147	71	451	499	573	0.63	0.06
Медиана m_{SQ}		X2.0				669	589	582	4.3	0.97
Дисперсия D_{SQ}		X1.3				971	668	791	4.75	16.42

Таблица 4. То же, что и в таблице 3, для вспышек класса выше M7.0 без фотосферного возмущения (поDV). В нижней строке приведено отношение медиан двух выборок (из данной и предыдущей таблицы)

No.	Дата вспышки по GOES, UT	Класс GOES	T_{start} в C2, UT	PA оси	Угловая ширина, deg	$V_{\text{CME}}, \text{ км с}^{-1}$			$M_{\text{CME}},$ 10^{15} г	$E_{\text{kin}},$ 10^{31} эрг
						линейная	при r_{max}	при $r = 20R_{\odot}$		
1	2011.03.09 23:10	X1.5	23:06	356	155	332	259	0	0.12	0.003
2	2012.07.12 16:40	X1.4	16:48	Halo	360	885	1092	2265	6.9	2.7
3	2012.03.07 01:05	X1.3	01:30	Halo	360	1825	1468	1260	—	—
4	2014.01.07 18:00	X1.2	18:24	Halo	360	1830	1569	1714	22	37
5	2012.03.05 02:30	X1.1	04:00	Halo	360	1531	1400	1476	14	16
6	2014.01.01 18:40	M9.9	—	—	—	—	—	—	—	—
7	2013.10.24 00:21	M9.3	01:25	Halo	360	399	303	0	1.9	0.15
8	2011.08.04 03:41	M9.3	04:12	Halo	360	1315	1074	1208	11	9.3
9	2012.01.23 03:38	M8.7	04:00	Halo	360	2175	2283	2216	26	62
10	2012.03.10 17:10	M8.4	18:00	Halo	360	1296	1227	1261	—	—
11	2011.09.25 04:31	M7.4	05:12	98	193	788	651	567	2.6	0.79
12	2011.09.24 12:30	M7.1	12:48	Halo	360	1915	2254	2089	16	30
Медиана m_{noDV}		M9.9				1315	1227	1261 (1476)	11	9.3
Дисперсия D_{noDV}		M2.6				627	674	807	9.14	21.5
$m_{\text{SQ}}/m_{\text{noDV}}$		2.0				0.51	0.48	0.46	0.39	0.10

с солнцетрясениями много обсуждалось в других работах.

Остановимся на двух типах радиовсплесков, с разделением по механизму излучения: плазменному и гиротронному (Dulk, 1985). В первом случае мы обсуждаем наличие всплесков II и III типов. Радиовсплески II типа (см., например, теоретический обзор Cairns et al., 2003) обычно ассоциируют с ударными волнами в короне (в окрестности которых возникают ускоренные электроны, возбуждающие плазменное излучение). Данный тип излучения часто связывают с эруптивным процессом. Всплески III типа (например, см. обзор Reid and Ratcliffe, 2014) объясняются распространением пучков ускоренных электронов по «открытым» или крупномасштабным замкнутым силовым линиям магнитного поля с изменяющимся профилем плотности плазмы. Таким образом, данный тип связан с топологией магнитного поля и фактом ускорения электронов. Гиротронное излучение во вспышках обычно ассоциировано с инжекцией нетепловых ускоренных электронов (более 100 кэВ), вращающихся вокруг силовых линий магнитного поля (тепловое гиротронное излучение обычно в импульсной фазе мощной вспышки слабее нетеплового). Эта краткая информация нужна для интерпретации данных по радиовсплескам при сравнении двух выборок вспышек.

Согласно данным, представленным в таблице 1 (столбцы (11) и (12)), вспышки с солнцетрясениями в десяти и восьми из 11 случаев сопровождались радиовсплесками II и III типом соответственно. При этом «более эруптивные» с точки зрения LASCO вспышки без фотосферных возмущений (см. соответствующие столбцы в таблице 2) проявили себя только в шести и двух событиях из 12 с позиции наличия радиовсплесков II и III типов. Вероятно, эффективное образование ударных волн и последующих радиовсплесков II типа характерно именно для вспышек с гелиосейсмической активностью, где обнаружены скоростные движения в нижней короне по данным AIA.

Удивительным оказывается факт практически полного отсутствия радиовсплесков III типа для вспышек без фотосферных возмущений (таблица 2). При этом мы имеем информацию о наличии жесткого рентгеновского излучения, то есть ускорение электронов явно происходило во вспышках. Видимо, есть различия топологической структуры магнитного поля в активных областях, где происходят вспышки с солнцетрясениями и где вообще не наблюдаются воздействия на фотосферу. Нужны открытые силовые линии магнитного поля, связанные с местом ускорения электронов.

По наличию наблюдений для девяти вспышек из выборки событий с солнцетрясениями и семи событий из другой выборки (таблицы 1 и 2) мы

построили микроволновые спектры NoRP на четырех частотах: 3.75, 9.4, 17, 35 ГГц (см. рис. 7). Более низкие частоты мы не рассматривали, чтобы исключить плазменный механизм. На рисунке видно, что вспышки с солнцетрясениями обладают примерно в два раза большей частотой максимума микроволнового спектра по сравнению со вспышками без проявления энерговыделения на уровне фотосферы. Заметим, что согласно Dulk (1985) частота максимума спектра f_p сильнее всего зависит от величины магнитного поля: $f_p \propto B^\gamma$, где $\gamma = 0.68 + 0.03\delta = 0.77-0.92$ для степенного индекса плотности ускоренных электронов $\delta = 3-8$ (пределы типичны для вспышек). Скорее всего, микроволновые источники вспышек с солнцетрясениями создаются ускоренными электронами, локализованными в более сильных магнитных полях (по сравнению с другими вспышками без воздействия на фотосферу).

7. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получены первые статистические результаты анализа свойств КВМ во вспышках с гелиосейсмическим откликом в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений по данным наблюдений AIA и LASCO. Рассмотрены выборки вспышек с разными нижними порогами по GOES-классу. В ходе анализа информации о наличии радиовсплесков в широком диапазоне длин волн и жесткому рентгеновскому излучению получены следующие результаты.

1. Вспышки с гелиосейсмическим откликом являются более скоростными в нижней короне по данным AIA по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Медианы распределений отличаются примерно в три раза для вспышек с GOES-классом выше M1.0. При рассмотрении вспышек, начиная с M5.0- и M7.0-классов, различие между распределениями увеличивается.
2. С учетом идентичности распределений массы КВМ в нижней короне по данным AIA установлено очень большое различие в распределениях кинетической энергии КВМ между рассматриваемыми выборками вспышек. При рассмотрении событий выше M7.0-класса отношение медиан достигает 142 в пользу гелиосейсмически активных вспышек.
3. Медианное значение распределения отношения кинетической к потенциальной энергии составляет 1.3 и 0.04 для двух выборок вспышек (с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений соответственно), если рассматривать GOES-класс выше M5.0. При пороге M7.0 величина кинетической энергии еще сильнее превышает величину потенциальной в случае вспышек с солнцетрясениями.

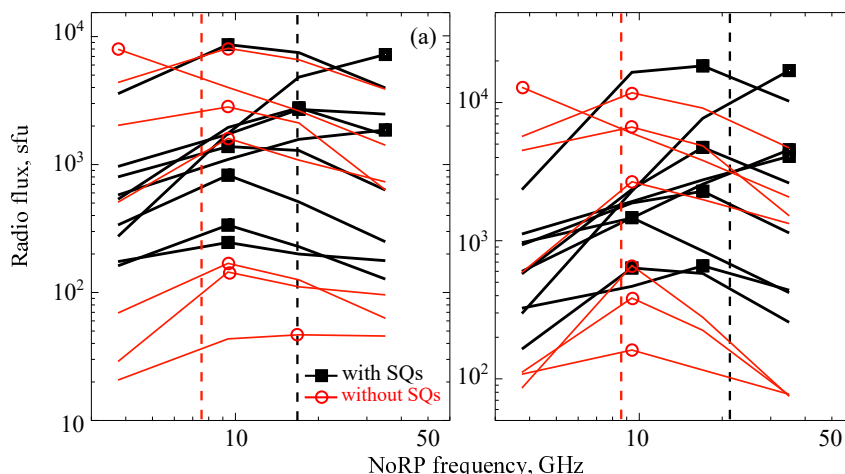


Рис. 7. Микроволновые спектры, построенные по наблюдениям NoRP на четырех частотах (3.75, 9.4, 17.1 и 35 ГГц), для вспышек выше M7.0-класса из таблицы 1 с гелиосейсмическим откликом (черный цвет) и без фотосферных возмущений (красный цвет). Панель (а) — спектры, усредненные по всему микроволновому всплеску; (b) — спектры, построенные в момент времени максимального потока на соответствующей частоте. Черными квадратами и красными кружками показаны положения пиков в спектрах. Вертикальные линии указывают средние значения пика спектров для соответствующих выборок вспышек.

4. Анализ свойств диммингов показал, что они быстрее и более импульсные с точки зрения временной динамики в случае вспышек с солнцетрясениями.
5. Вспышки более M7.0 GOES-класса с гелиосейсмическим откликом являются менее скоростными и массивными во внешней короне по данным LASCO по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Медианы распределений скорости и массы КВМ, наблюдаемых в белом свете, отличаются примерно в 0.5 и 0.4 раза в пользу вспышек без фотосферных возмущений.
6. Сильной корреляционной взаимосвязи между акустической энергией и параметрами КВМ по AIA нет: коэффициенты корреляции не превышают 0.5, но в отдельных случаях (кинетическая энергия, масса КВМ и глубина димминга) достоверны по t -критерию.
7. Установлено практически полное отсутствие радиовсплесков III типа для вспышек выше M7.0-класса без фотосферных возмущений. При этом у всех событий зафиксировано излучение в жесткой рентгеновской области. Радиовсплески II типа также встречаются реже в таких вспышках.
8. Для вспышек с солнцетрясениями практически во всех случаях выше M7.0-класса обнаружено присутствие радиовсплесков II и III типов.
9. Вспышки с солнцетрясениями обладают примерно в два раза большей частотой максимума микроволнового спектра по сравнению со вспышками без проявления энерговыделения на уровне фотосферы.

Наиболее интересный результат связан с различием выводов по поводу соотношения характерных скоростей КВМ в двух сравниваемых распределениях. Мы получили на первый взгляд противоречивые результаты, используя два каталога: по наблюдениям AIA и LASCO. Как мы писали выше, данное противоречие устраняется тем, что используемые инструменты видят разные слои солнечной атмосферы: AIA наблюдает нижнюю корону, а LASCO — КВМ, начиная с нескольких радиусов Солнца. Скорее всего, по AIA во многих случаях мы не видим непосредственно КВМ, а фиксируем пролет корональной EIT-волны (см. обзоры Gallagher and Long, 2011; Warmuth, 2015), которая часто ограничивает область потемнения, соответствующую диммингу (см. рисунки в данных обзорах).

Заметим, в обзоре Warmuth (2015) на рис. 22с показано распределение характерных скоростей корональных волн в диапазоне $200\text{--}1400\text{ км с}^{-1}$ со средним значением по распределению 650 км с^{-1} , что примерно соответствует распределению скоростей КВМ для вспышек с солнцетрясениями из каталога GEIV (рис. 2а). Также стоит отметить, что данный диапазон скоростей характерен для волн Мортон в H α (рис. 22d в обзоре Warmuth, 2015), что указывает на возможную взаимосвязь между корональной и хромосферной волной.

Взаимосвязь между гелиосейсмическими фотосферными волнами солнцетрясений и корональными волнами и волнами Мортон не очевидна. В работе Quinn et al. (2021) было показано, что гелиосейсмически активные вспышки проявляют себя на уровне хромосферы (по каналу AIA 1600 Å), но

оценки скорости не выходят за пределы 41 км с^{-1} и обнаруженные волны не распространяются далеко от источников, тогда как другие типы волн глобальны и уходят за пределы активных областей, где произошла вспышка. Результат данной работы показывает, что вспышки с солнцетрясениями, скорее всего, сопровождаются скоростными корональными волнами. Чтобы выяснить физическую взаимосвязь между разными волновыми явлениями, необходимо проводить моделирование с учетом как короны, так и всех нижних слоев атмосферы вместе с внутренним строением Солнца (для моделирования солнцетрясений).

Данные LASCO показывают, что вспышки с солнцетрясениями имеют менее развитые КВМ во внешней короне. Вероятно, геометрия магнитного поля не позволяет эруптивному жгуту легко покинуть активную область. Либо, возможно, условия в области вспышки были таковы, что большой эруптивный жгут не сформировался. Тогда как во вспышках без гелиосейсмической активности мы наблюдаем более массивные скоростные КВМ типа гало. Морфология КВМ и то, как она проявляется в наблюдениях, зависит от проекции. Однако в силу большей массы КВМ для вспышек без гелиосейсмического отклика тип гало дополнительно свидетельствует об эрупции большого масштаба. Понятно, что более детальные исследования динамики и морфологии КВМ требуют стереоскопических наблюдений.

Наличие ударных волн в короне и ассоциированных с ними радиовсплесков II типа является яркой особенностью рассмотренных мощных вспышек (класса выше M7.0) с солнцетрясениями. Этот результат дополняет факт наличия скоростных корональных волн с большой кинетической энергией в нижней короне. Именно в гелиосейсмически активных вспышках возникают условия для распространения мощных возмущений не только внутрь Солнца, но и во внешние слои солнечной атмосферы на фоне подавленной эруптивности (КВМ хуже проявляются по данным LASCO, чем в случае «обычных» вспышек). Одно из основных условий формирования ударной волны в короне Солнца: $v_{\text{СМЕ}} - v_{\text{SW}} > v_A$, где $v_{\text{СМЕ}}$, v_{SW} и v_A — скорость коронального выброса, скорость солнечного ветра и альфвеновская скорость соответственно (например, Eselevich and Eselevich, 2012, и ссылки там). В цитируемой работе показано, что альфвеновская скорость может увеличиваться до $3\text{--}4 R_{\odot}$, а затем падать с увеличением радиального расстояния. Таким образом, ударная волна (и, как следствие, радиовсплеск II типа) может сформироваться в нижней короне с большей вероятностью при быстром, импульсном ускорении выброса на небольших радиальных расстояниях (до $3\text{--}4 R_{\odot}$).

По всей видимости, различие между группами вспышек с солнцетрясениями и без фотосферных возмущений обусловлено еще и особенностями распределения магнитного поля в активной области и расположения места энерговыведения вспышки. Выше было показано, что в микроволновых источниках величина максимума спектра в среднем смещена в сторону больших частот для вспышек с солнцетрясениями (в 1.5–2 раза больше, чем у других вспышек). Скорее всего, вспышечное энерговыведение развивается в более сильном магнитном поле. Это может быть связано как с большими значениями магнитного поля пятен, так и с тем, что ускоренные частицы локализованы в более низких и компактных магнитных петлях. Силу магнитного натяжения F_R можно оценить по порядку величины на основе выражения $F_R = (B\nabla)B/(4\pi) \sim B^2/L_R$, где L_R — некоторый линейный масштаб, характеризующий кривизну силовых линий магнитного поля. Если во вспышках с солнцетрясениями характерные магнитные поля в области ускорения и транспорта ускоренных электронов в два раза больше, чем во вспышках без фотосферных возмущений, то магнитное натяжение выше в четыре раза. Следовательно, можно ожидать эффективное ускорение магнитных структур во время вспышки, которым и объясняется разница между рассматриваемыми выборками событий. Быстрое, импульсное ускорение коронального выброса и достижение им высокой скорости на низких высотах может также объяснить формирование ударной волны и радиовсплеска II типа в таких событиях (см. предыдущий абзац). При этом во вспышках без фотосферных возмущений выбросы могут ускоряться значительно более медленно и плавно, достигая высоких скоростей только на больших высотах в солнечной короне, где может быть большая альфвеновская скорость и не выполняется обсуждавшийся критерий формирования ударной волны.

По данным LASCO мы обнаружили, что вспышки без фотосферных возмущений обладают крупномасштабными КВМ, но очень плохо себя проявляют в радиовсплесках III типа. Тогда как практически все вспышки с солнцетрясениями сопровождались радиовсплесками III типа. Возможно, имеется разница в начальных конфигурациях магнитного поля. Можно предположить, что в случае вспышек с солнцетрясениями сразу существуют группы силовых линий «открытого» типа (либо петли большого радиуса кривизны), непосредственно соединенных с областью первоначального энерговыведения вспышки. В частности, топология типа «купол-шип» может удовлетворять этому критерию (см., например, Masson et al., 2019; Clarke et al., 2021). При этом в импульсной фазе ускоренные частицы сразу

имеют доступ высоко в корону. Возможна другая ситуация: магнитное пересоединение и формирование пучков ускоренных частиц происходит в результате взаимодействия магнитного поля быстро расширяющихся вспышечных петель или выброса с рядом расположенными «открытыми» силовыми линиями (например, см. Masson et al., 2019; Clarke et al., 2021). В случае вспышек без фотосферных возмущений может иметься сформированный магнитный жгут над нейтральной линией магнитного поля в активной области. Жгут окружен замкнутой оболочкой силовых линий магнитного поля, и непосредственно примыкающих к жгуту и к области формирующегося токового слоя «открытых» силовых линий магнитного поля нет. Тогда не наблюдаются и яркие радиовсплески III типа. Также заметим, что геометрия поля типа «купол» может объяснить слабость КВМ высоко в короне в случае гелиосейсмически активных вспышек, например, из-за сдерживания эрупции из более низких слоев атмосферы. Эту гипотезу можно будет в дальнейшем проверить, в частности, на основе анализа геометрии вспышечных лент и экстраполяции коронального магнитного поля. В случае купольной магнитной структуры часто наблюдаются вспышечные ленты круговой формы (Masson et al., 2009; Zhang et al., 2022).

Мы сделали ряд предположений на счет интерпретации полученных результатов статистического анализа КВМ во вспышках с солнцетрясениями. Данные гипотезы

Высказанные нами при интерпретации полученных результатов статистического анализа КВМ во вспышках с солнцетрясениями предположения открывают новые темы для исследований и сужают (но, может быть, и расширяют) области поиска причин генерации гелиосейсмических волн. На базе полученных результатов можно ставить задачи по моделированию процессов генерации гелиосейсмических волн вместе с появлением сильных возмущений в короне. Также заметим, что не очень популярная на сегодняшний день тема по исследованию солнцетрясений затрагивает практически все проблемы физики солнечных вспышек. Исследования по данному направлению могут рассматриваться в качестве методологического «прожектора», подсвечивающего с иной стороны не до конца понятую физику солнечных вспышек (учитывая дефицит прорывных экспериментов по наблюдению высокоэнергетических процессов на Солнце).

В рамках данной работы мы обнаружили, что вспышки с солнцетрясениями обладают свойством эффективной генерации корональных диммингов и ударных волн на фоне плохо развитых КВМ (в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений) и яркими проявлениями ускорения заряженных частиц, уходящих из области ускорения

как в сторону поверхности Солнца, так и от нее. На наш взгляд, данный результат указывает на то, что возможность эруптивной природы солнцетрясения нельзя сбрасывать со счетов. Остается открытым вопрос, являются ли ускоренные частицы ключевым агентом возбуждения фотосферы или они могут рассматриваться как вторичный (сопутствующий) эффект на фоне импульсного воздействия на фотосферу перестраивающихся во время вспышки эруптивных магнитных структур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Александре Львовне Лысенко (ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург) за помощь с данными наблюдений рентгеновского излучения солнечных вспышек прибором KONUS/Wind. Также авторы признательны соавителям всех используемых в данной работе каталогов солнечных вспышек и корональных выбросов массы за их открытый доступ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-72-30002).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. D. Alvarado-Gómez, J. C. Buitrago-Casas, J. C. Martínez-Oliveros, et al., *Solar Physics* **280**, 335 (2012). DOI:10.1007/s11207-012-0009-6
2. R. L. Aptekar, D. D. Frederiks, S. V. Golenetskii, et al., *Space Sci. Rev.* **71**, 265 (1995). DOI:10.1007/BF00751332
3. M. J. Aschwanden, *Astrophys. J.* **831** (1), article id. 105 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/831/1/105
4. M. J. Aschwanden, P. Boerner, D. Ryan, et al., *Astrophys. J.* **802** (1), article id. 53 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/802/1/53
5. M. J. Aschwanden, E. P. Kontar, and N. L. S. Jeffrey, *Astrophys. J.* **881** (1), article id. 1 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab2cd4
6. G. Aulanier, M. Janvier, and B. Schmieder, *Astron. and Astrophys.* **543**, id. A110 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201219311
7. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, et al., *Solar Physics* **162** (1–2), 357 (1995). DOI:10.1007/BF00733434
8. O. Burtseva, J. C. Martínez-Oliveros, G. J. D. Petrie, and A. A. Pevtsov, *Astrophys. J.* **806**, article id. 173 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/806/2/173

9. I. H. Cairns, S. A. Knock, P. A. Robinson, and Z. Kuncic, *Space Sci. Rev.* **107** (1), 27 (2003). DOI:10.1023/A:1025503201687
10. B. P. Clarke, L. A. Hayes, P. T. Gallagher, et al., *Astrophys. J.* **910** (2), id. 123 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/abe463
11. V. Domingo, B. Fleck, and A. I. Poland, *Solar Physics* **162** (1–2), 1 (1995). DOI:10.1007/BF00733425
12. A. Donea, *Space Sci. Rev.* **158** (2–4), 451 (2011). DOI:10.1007/s11214-011-9787-7
13. G. A. Dulk, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **23**, 169 (1985). DOI:10.1146/annurev.aa.23.090185.001125
14. V. Eselevich and M. Eselevich, *Astrophys. J.* **761** (1), article id. 68 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/761/1/68
15. G. H. Fisher, D. J. Bercik, B. T. Welsch, and H. S. Hudson, *Solar Physics* **277**, 59 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9907-2
16. P. T. Gallagher and D. M. Long, *Space Sci. Rev.* **158** (2–4), 365 (2011). DOI:10.1007/s11214-010-9710-7
17. N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, et al., *Earth Moon and Planets* **104** (1–4), 295 (2009). DOI:10.1007/s11038-008-9282-7
18. H. S. Hudson, G. H. Fisher, and B. T. Welsch, *ASP Conf. Ser.* **383**, 221 (2008).
19. S. W. Kahler, *J. Geophys. Research* **87** (A5), 3439 (1982). DOI:10.1029/JA087iA05p03439
20. A. G. Kosovichev, in *Proc. SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun (ESA SP-624), Sheffield, UK, 2006*, Ed. by K. Fletcher, M. Thompson (ESA Special Publication, 2006) id. 134.
21. A. G. Kosovichev, *Sunquakes: Helioseismic response to solar flares*, in: *Extraterrestrial Seismology* (Cambridge University Press, Cambridge, 2015) pp. 306–322. DOI:10.1017/CBO9781107300668.025
22. A. G. Kosovichev and V. V. Zharkova, in *Proc. 4th Soho Workshop on Helioseismology, Pacific Grove, California, USA, 1995*, Ed. by J. T. Hoeksema, V. Domingo, B. Fleck, and B. Battrick (ESA Special Publication, Paris, 1995), poster 341.
23. A. G. Kosovichev and V. V. Zharkova, *Nature* **393**, 317 (1998). DOI:10.1038/30629
24. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, et al., *Solar Physics* **275**, 17 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9776-8
25. C. Lindsey and D. C. Braun, *Solar Physics* **192**, 261 (2000). DOI:10.1023/A:1005227200911
26. S. Masson, S. K. Antiochos, and C. R. DeVore, *Astrophys. J.* **884** (2), article id. 143 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab4515
27. S. Masson, E. Pariat, G. Aulanier, and C. J. Schrijver, *Astrophys. J.* **700** (1), 559 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/700/1/559
28. W. M. Neupert, *Astrophys. J.* **153**, L59 (1968). DOI:10.1086/180220
29. W. D. Pesnell, B. J. Thompson, and P. C. Chamberlin, *Solar Physics* **275**, 3 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9841-3
30. E. R. Priest and T. G. Forbes, *Astron. Astrophys. Rev.* **10** (4), 313 (2002). DOI:10.1007/s001590100013
31. S. Quinn, M. Mathioudakis, C. J. Nelson, et al., *Astrophys. J.* **920** (1), id. 25 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/ac0139
32. H. A. S. Reid and H. Ratcliffe, *Research in Astron. and Astrophys.* **14** (7), 773 (2014). DOI:10.1088/1674-4527/14/7/003
33. A. J. B. Russell, M. K. Mooney, J. E. Leake, and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **831** (1), article id. 42 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/831/1/42
34. V. M. Sadykov, J. T. Stefan, A. G. Kosovichev, et al., *Astrophys. J.* **960** (1), id. 80 (2024). DOI:10.3847/1538-4357/ad0cf3
35. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, et al., *Solar Physics* **162** (1–2), 129 (1995). DOI:10.1007/BF00733429
36. P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, et al., *Solar Physics* **275**, 207 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9834-2
37. I. N. Sharykin and A. G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **808**, article id. 72 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/808/1/72
38. I. N. Sharykin and A. G. Kosovichev, *Astrophys. J.* **895** (1), id. 76 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab88d1
39. I. N. Sharykin, A. G. Kosovichev, V. M. Sadykov, et al., *Astrophys. J.* **843**, id. 67 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa77f1
40. I. N. Sharykin, A. G. Kosovichev, and I. V. Zimovets, *Astrophys. J.* **807**, article id. 102 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/807/1/102
41. I. N. Sharykin, I. V. Zimovets, and A. G. Kosovichev, *Astronomy Reports* **67** (11), 1216 (2023). DOI:10.1134/S1063772923110094
42. A. M. Veronig, J. C. Brown, B. R. Dennis, et al., *Astrophys. J.* **621**, 482 (2005). DOI:10.1086/427274
43. A. Warmuth, *Living Reviews in Solar Physics* **12** (1), article id. 3 (2015). DOI:10.1007/lrsp-2015-3
44. D. F. Webb and T. A. Howard, *Living Reviews in Solar Physics* **9** (1), article id. 3 (2012). DOI:10.12942/lrsp-2012-3
45. H. Wu, Y. Dai, and M. D. Ding, *Astrophys. J.* **943** (1), id. L6 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/acb0d1
46. Y. Zhang, Q. Zhang, D. Song, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **260** (1), id. 19 (2022). DOI:10.3847/1538-4365/ac5f4c
47. S. Zharkov, L. M. Green, S. A. Matthews, and V. V. Zharkova, *Astrophys. J.* **741**, article id. L35 (2011). DOI:10.1088/2041-8205/741/2/L35
48. S. Zharkov, L. M. Green, S. A. Matthews, and V. V. Zharkova, *Solar Physics* **284**, 315 (2013). DOI:10.1007/s11207-012-0169-4

Statistics of Coronal Mass Ejections in Solar Flares with Helioseismic Response**I. N. Sharykin¹ and I. V. Zimovets¹**¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

This paper presents the results of a statistical analysis of the properties of coronal mass ejections (CMEs) associated with solar flares that exhibit a helioseismic response (“sunquakes”) in comparison with flares that do not show photospheric disturbances. The analysis is based on observations of the solar corona in the ultraviolet range (from the Atmospheric Imaging Assembly on board the Solar Dynamics Observatory, SDO/AIA) and the visible range (from the Large Angle Spectroscopic Coronagraph on board the Solar and Heliospheric Observatory, SOHO/LASCO). We considered samples of flares with different lower thresholds based on the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) classification: above M1.0, M5.0, and M7.0. A correlation analysis was also carried out between CME parameters and the total energy of the sunquakes. Additionally, for flares above M7.0-class, information on the presence of radio bursts across a wide range of wavelengths, as well as hard X-ray emission, was analyzed. It was found that CMEs accompanying flares with a helioseismic response tend to have higher velocities in the lower corona (according to AIA data) compared to flares without photospheric disturbances. The distribution of CME masses is approximately the same regardless of the presence or absence of sunquakes during the flares. An analysis of dimming properties showed that they are more impulsive in terms of temporal dynamics in flares with sunquakes. CMEs in flares above M7.0-class that exhibit helioseismic responses are less massive and slower in the outer corona according to LASCO data. The correlation analysis did not reveal strong relationships between acoustic energy and CME parameters based on AIA observations, but for several parameters (kinetic energy, CME mass, and dimming depth), statistically significant correlations were identified according to the *t*-criterion. In contrast to flares with sunquakes, there was an almost complete absence of type III radio bursts and a rare occurrence of type II bursts in the M7.0-class flares without photospheric disturbances. The spectral peak of microwave bursts tends to occur at higher frequencies in flares with sunquakes than in those without. According to our analysis, flares with sunquakes likely possess the ability to efficiently generate fast coronal dimmings and shock waves, even in the presence of poorly developed CMEs in the upper corona (in comparison to flares without photospheric disturbances). These events are also characterized by pronounced signatures of electron acceleration, with particles escaping the acceleration region both toward the solar surface and outward from it. In our view, this indicates that the possibility of an eruptive origin for sunquakes cannot be ruled out. Accelerated electrons may act as both the primary and secondary agents responsible for initiating the photospheric perturbation.

Keywords: *Sun: activity—Sun: corona—Sun: coronal mass ejections (CMEs)—Sun: flares—Sun: radio emission—Sun: UV radiation—Sun: X-ray emission*