УДК 523.985.3

# ИСТОЧНИКИ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

© 2022 г. И. В. Зимовец<sup>1, \*</sup>, А. Б. Нечаева<sup>1, \*\*</sup>, И. Н. Шарыкин<sup>1, \*\*\*</sup>, Б. А. Низамов<sup>2, \*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),

г. Москва, Россия <sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва, Россия \*e-mail: ivanzim@iki.rssi.ru \*\*e-mail: nechaeva.ab@phystech.edu \*\*\* e-mail: ivan.sharykin@phystech.edu \*\*\*\* e-mail: nizamov@physics.msu.ru Поступила в редакцию 28.02.2022 г. Принята к публикации 30.03.2022 г.

В работе [Tan et al., 2016] утверждается, что перед значительной долей (26-46%) "изолированных" солнечных вспышек наблюдаются длиннопериодные (с периодом P = 1.9-47.3 мин и длительностью 1-2 ч) квазипериодические пульсации (КПП) в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Результаты получены по данным инструмента GOES/XRS без пространственного разрешения. В данной работе мы выполнили анализ источников таких КПП перед 35 "изолированными" вспышками класса X на основе "quick-look" изображений RHESSI в диапазоне 6-12 кэВ и установили, что события можно разделить на два типа. В событиях типа I источники всех КПП и основной вспышки располагаются в одной активной области (AO) на Солнце, тогда как в событиях типа II источники по крайней мере части КПП располагаются в другой АО, нежели АО вспышки. Более детальный анализ двух событий типа I и трех событий типа II с помощью изображений RHESSI в рентгеновском и SDO/AIA в ультрафиолетовом диапазонах показывает, что источники рентгеновских пульсаций в одной АО располагаются в разных местах (в пределах ~20 Мм друг от друга и от основной вспышки), причем их появление соответствует появлению новых петлеобразных ультрафиолетовых источников. Мы приводим наблюдательные аргументы в пользу того, что предполагаемые в работе [Tan et al., 2016] механизмы, основанные на осцилляциях корональных петель как LRC электрических контуров или МГД-осцилляциях петель, маловероятны. Более перспективными для объяснения рассматриваемых КПП представляется механизм осциллирующего пересоединения. В событиях типа I оно происходит в одной АО, тогда как в событиях типа II оно может происходить параллельно в нескольких разнесенных АО, и для объяснения этого обстоятельства требуется предположить когерентность подфотосферного всплытия магнитных потоков в разных участках Солнца. Это предположение требует дальнейшей проверки.

DOI: 10.31857/S0016794022040186

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вспышки, происходящие в активных областях (АО) на Солнце, представляют собой эпизоды (длительностью от минут до нескольких часов) трансформации магнитной энергии во внутреннюю и механическую энергию плазмы, в кинетическую энергию ускоренных нетепловых частиц [Priest and Forbes, 2002; Somov, 2013; Fleishman et al., 2020]. Нагреваемая до десятков миллионов градусов плазма и ускоренные до релятивистских скоростей частицы посредством различных механизмов излучают в широком спектре от радиоволн до гамма-лучей. Благодаря этим излучениям вспышки и наблюдаются на Солнце [Fletcher et al., 2011; Benz, 2017]. Крупные вспышки, в особенности вспышки рентгеновского класса X, наряду с часто сопровождаемыми корональными выбросами массы (КВМ), являются одними из наиболее мощных природных источников энерговыделения в Солнечной системе и оказывают значительное влияние на космическую погоду. По этой причине их изучение и надежное количественное прогнозирование имеет практическое значение [Петрукович и др., 2008; Schrijver et al., 2015].

Вспышки имеют несколько характерных фаз. При рассмотрении временных профилей в диапазоне мягкого рентгена обычно выделяются: (а) предвспышечная (или предимпульсная) фаза до условного начала (б) импульсной фазы (или фазы роста) до наступления основного максимума и (в) фаза спада после максимума. Наиболее сильная перестройка магнитных полей и электрических токов, ускорение частиц и нагрев плазмы происходят в импульсной фазе. Дальнейшая перестройка магнитной конфигурации вспышечной области, энерговыделение и ускорение частиц продолжаются и во время фазы спада, но обычно менее интенсивно (на больших высотах, в относительно более слабых магнитных полях и при более низких концентрациях плазмы), и в итоге прекращаются.

Считается, что во время предвспышечной фазы за счет всплытия новых магнитных потоков, движений плазмы под и на фотосфере в атмосфере АО происходит эволюция магнитных структур к неустойчивому состоянию, в результате чего и начинается импульсная фаза вспышки. Предвспышечная фаза может сопровождаться различными явлениями, в частности, активизацией волокон, локальными нагревом плазмы и уярчениями в разных спектральных диапазонах [Bumba and Krivsky, 1959; Martin, 1980; Charikov and Pharaphonov, 1983; Webb, 1985; van Hoven and Hurford, 1986; Chifor et al., 2007; Zimovets et al., 2009; Gyenge et al., 2016; Wang et al., 2017]. В литературе встречаются разные названия этих явлений предвспышечной активности: предвспышки, предвестники или прекурсоры вспышек. Они обычно наблюдаются в окрестности линии инверсии магнитной полярности (ЛИМП) в АО, где в последствии происходит основная вспышка [Chifor et al., 2007; Wang et al., 2017]. Изучение предвестников важно для понимания триггерных механизмов вспышек, их можно использовать для прогнозирования вспышек и КВМ.

Одним из специфических видов предвспышечной активности являются квазипериодические флуктуации (КПФ), квазипериодические осцилляции (КПО) или квазипериодические пульсации (КПП) электромагнитного излучения. В начале 1970-ых годов на Солнце были обнаружены КПФ в радиодиапазоне [Durasova et al., 1971] и вскоре после этого было установлено, что их параметры меняются перед вспышками, в частности, увеличивается их спектральная мощность [Aleshin et al., 1973; Kobrin et al., 1973]. Этот эффект был зафиксирован для микроволновых КПФ с различными периодами: 3 мин [Abramov-Maximov et al., 2011; Sych et al., 2009], 10 мин [Абрамов-Максимом и Бакунина, 2018] и 100 мин

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

[Abramov-Maximov and Bakunina, 2019]. В недавней работе [Abramov-Maximov and Bakunina, 2020] было показано, что перед 75% вспышек детектируются микроволновые КПФ с периодами от нескольких секунд до нескольких минут и длительностью от 2 до 70 мин. Предполагается, что возникновение этих КПФ может быть связано с усилением амплитуды магнитогидродинамических (МГД) волн, вследствие изменений физических параметров в АО в ходе предвспышечной эволюции.

КПП с различными периодами (от ~2 до ~90 мин) также обнаруживаются перед солнечными вспышками в мягком рентгеновском диапазоне [Жданов, 1985; Жданов и Чариков, 1985]. В работе [Tan et al., 2016] были рассмотрены "изолированные" солнечные вспышки за период времени с 2010 г. по 2016 г. и показано, что длиннопериодные (~2-47 мин) КПП обнаруживаются перед 26% вспышек класса С, 43% класса М и 46% класса Х. Под "изолированной" подразумевается вспышка, как минимум за 2 ч до начала которой не было другой вспышки аналогичного рентгеновского класса. Для анализа использовались временные профили температуры T(t) плазмы вспышечной области, рассчитанные стандартным методом в одно-температурном приближении из профилей потоков в каналах 0.5-4 и 1-8 Å инструмента X-Ray Sensor (XRS) на борту космических аппаратов серии GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) [White et al., 2005]. Были использованы следующие критерии отбора событий с предвспышечными КПП: 1) пульсации наблюдаются в интервале времени длительностью 2 ч до начала вспышки, 2) их общая продолжительность не менее 30 мин и количество пульсаций не менее четырех ( $N \ge 4$ ), 3) время между пиками двух последовательных пульсаций (период, Р) не менее 1 мин, причем максимальный и минимальный периоды удовлетворяют критерию  $P_{\text{max}} \leq 2P_{\text{min}}$  (критерий квази-периодичности), 4) амплитуда пиков пульсаций превышает два стандартных отклонения фона ( $2\sigma_{hckg}$ ).

На основе характерных наблюдаемых периодов и известных величин электрического тока в АО в работе [Тап et al., 2016] высказана гипотеза, что основным механизмом длинноволновых предвспышечных КПП может служить механизм осцилляций электрического LRC контура, которым могут являться корональные петли с продольным током [Zaitsev et al., 1998; Степанов и Зайцев, 2018]. Однако было отмечено, что поскольку наблюдения выполнены без пространственного разрешения источников пульсаций, другие механизмы, в частности основанные на МГД-осцилляциях в петлях, не могут быть исключены. В работе [Tan et al., 2016] также высказана идея о том, что поскольку длиннопериодные рентгеновские КПП наблюдаются перед значительным процентом вспышек (в особенности наиболее мощных классов М и Х), то они могут быть использованы для построения прогноза солнечных вспышек.

Цель представленной работы — определить пространственное положение источников длиннопериодных рентгеновских КПП перед вспышками и выполнить проверку гипотезы [Tan et al., 2016] об их механизме. В частности, определить взаиморасположение источников предвспышечных КПП по отношению к основной вспышке и выяснить: а) находятся ли источники КПП в той же самой АО, где и вспышка, б) если да, то находятся ли источники всех КПП одного события в одном месте (в одной корональной петле) или они появляются в различных местах (в различных петлях).

#### 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В этой работе мы используем каталог "изолированных" солнечных вспышек из статьи [Тап et al., 2016]. В явном (табличном) виде он не представлен в статье [Tan et al., 2016], но ее первый автор (проф. Баолин Тан) передал его нам посредством личной коммуникации. Каталог, в частности, содержит дату, время начала и пика вспышки, рентгеновский класс, номер вспышечной АО, средний период  $\langle P \rangle$  и стандартное отклонение периода  $\sigma(P)$  предсвспышечных КПП по данным временно́го профиля температуры T(t) GOES/XRS. Каталог содержит 43 "изолированных" вспышки класса X, 187 – класса М и 200 – класса С за 2010-2016 гг. В этой работе мы ограничиваемся рассмотрением в основном вспышек класса Х с предвспышечными КПП, как наиболее мощными и потенциально геоэффективными событиями.

Для определения положений рентгеновских источников предвспышечных КПП и самих вспышек Х класса мы, прежде всего, пользуемся "quick-look" изображениями в диапазоне энергий 6-12 кэВ, построенными по данным космического аппарата Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) [Lin et al., 2002] и доступными в базе данных (например, по адресу (http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/)). Эти изображения синтезированы в основном с помощью алгоритма Clean [Hurford et al., 2002] с использованием коллимирующих решеток 3 (полуширина на полувысоте функции рассеяния точки 6.79 угл. с; 1 угл. с в центре диска Солнца соответствует ~725 км) и выше. В качестве положения рентгеновского источника в каждом рассматриваемом интервале времени берутся гелиопроекционные (НРС) координаты центроида аппроксимации источника двумерной гауссианой.

Более детально мы исследовали положения источников рентгеновских предвспышечных КПП в четырех событиях Х, М и С классов, для которых в статье [Tan et al., 2016] (Fig. 2) в явном виде приведены временные профили потоков излучения в каналах 0.5-4 и 1-8 Å GOES/XRS и температуры (см. события № 1-4 в табл. 1). Эти события обозначены авторами как "типичные". Дополнительно, для сравнения, мы также рассмотрели еще одно событие (М1.9 17.02.2013, № 5 в табл. 1), явно не представленное в [Tan et al., 2016], но содержащееся в их каталоге (вспышек М-класса). Это событие примечательно, в частности тем, что все предвспышечные КПП и основная вспышка непрерывно, более 40 мин, наблюдались RHESSI, и ранее рентгеновские источники и электрические токи в этой вспышечной области рассматривались нами в работах [Sharykin et al., 2015; Zimovets et al., 2020]. Напомним, что RHESSI находится на низкой околоземной орбите с наклонением 38.04° и периодом обращения 96.5 мин. Поэтому примерно половину орбиты он находится в тени Земли и периодически попадает в Южно-атлантическую аномалию (South Atlantic Anomaly, SAA), во время прохождения которой детекторы отключаются для сохранения работоспособности в условиях повышенных потоков радиации. В силу этого обстоятельства, для многих событий RHESSI наблюдает только часть предвспышечных КПП.

Для этих пяти событий мы приводим временны́е профили темпов счета RHESSI в каналах 6-12, 12-25, 25-50 и 50-100 кэВ, скорректированные на состояние аттенюаторов A1, временны́е профили потоков рентгеновского излучения в каналах 0.5-4 и 1-8 Å GOES/XRS, а также профили температуры T(t) и меры эмиссии МЭ(t)плазмы, рассчитанные по данным двух каналов GOES/XRS в приближении модели однородной одно-температурной максвелловской плазмы [White et al., 2005].

Для этих пяти событий для каждой предвспышечной пульсации (и основной вспышки), для которой это можно сделать, мы синтезировали изображения в диапазоне 6–12 кэВ как для всего Солнца (128 × 128 пикселов каждый размером 16 × 16 угл. с), так и для локальной вспышечной области (64 × 64 пикселов каждый размером 4 × × 4 угл. с или 2 × 2 угл. с). Использовались обычно коллимирующие решетки начиная с № 3 и выше и различные алгоритмы (*Back Projection* - BP, Clean, Expectation Maximization – EM) [Hurford et al., 2002; Benvenuto et al., 2013] и выбиралось наиболее качественное изображение. Длительность интервалов времени для синтеза изображений от 16 до 360 с, в зависимости от потока фотонов в рассматриваемом диапазоне энергий 6-12 кэВ.

N⁰	Дата	Начало, пик, UT	Класс	Координаты HGC HPC	AO	КВМ начало, UT	$\langle P \rangle \pm \sigma(P),$ мин	Тип
1	26.10.2014	10:04 10:56	X2.0	S14W37 594", -216"	12192	Нет	$11.4 \pm 1.6$	Ι
2	05.05.2015	22:05 22:11	X2.7	N15E79 879", 198"	12339	22:24	$18.4 \pm 3.4$	II
3	25.10.2013	02:48 03:02	M2.9	S07E76 -903", -141"	11882	03:24	$16.1 \pm 2.6$	II
4	13.07.2012	06:23 06:29	C2.4	\$27W25 +358", -433"	11 521	Нет	$15.6 \pm 2.6$	II
5	17.02.2013	15:45 15:50	M1.9	N12E20 -356", +313"	11675	Нет	$3.7\pm0.9$	Ι

Таблица 1. Список и характеристики исследованных вспышек и предвспышечных рентгеновских КПП, для которых в статье приведены изображения источников излучения

Примечание. HGC – гелиографические координаты в градусах. HPC – гелиопроекционные координаты в угловых секундах.

В некоторых случаях (как, например, в событии C2.4 13 июля 2012 г., № 4 в табл. 1) RHESSI не наблюдал основную вспышку. Для определения положения вспышечных источников мы использовали изображения в "горячем" канале 131 Å  $(lg(T) \sim 7.0 \text{ и} \sim 5.6)$  инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту космического аппара-Ta Solar Dynamics Observatory (SDO) [Lemen et al., 2012]. Обычно вспышечные источники в мягком рентгене и в канале 131 Å соответствуют друг другу. Угловое разрешение SDO/AIA ≈1.2 угл. с (при размере пиксела ~0.6 угл. с), шаг по времени ~12 с. Мы анализируем разностные изображения в канале 131 Å с общей базой перед началом предсвспышечных КПП. Разностные изображения помогают надежнее обнаруживать появление новых источников на фоне уже существующих ярких источников.

Для каждого события изображения для всех рассматриваемых интервалов времени подворачивались к одному моменту времени — к первой в серии предвспышечной пульсации — с помощью процедуры "*drot\_map*" (*SolarSoftWare*, SSW (https:// www.lmsal.com/solarsoft/)) для компенсации дифференциального вращения Солнца. Изображения, построенные по данным RHESSI и SDO/AIA для ближайших интервалов времени, совмещались и визуализировались с помощью процедуры "*plot\_map*" в SSW.

#### 3. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 3.1. Статистика по 35 "изолированным" Х-вспышкам из каталога

Анализ "quick-look" изображений RHESSI дает следующие результаты. В ~31% изолированных вспышек класса X источники всех предвспышечных КПП располагаются в той же AO, что и основная вспышка. Такие события мы относим к типу I. Примером события такого типа является вспышка Х класса 26 октября 2014 г., № 1 в табл. 1 (также там приведена еще одна вспышка № 5 этого типа, но М-класса). В ~34% событий источники по крайней мере части предвспышечных пульсаций находятся в АО, отличных от АО основной вспышки. Такие события мы относим к типу II (примеры – события № 2-4 в табл. 1). В основном в таких событиях источники предвспышечных КПП принадлежат одной АО (события № 2 и 3), но в некоторых случаях могут располагаться в нескольких АО (как в случае события № 4). В оставшихся ~35% случаев RHESSI по тем или иным причинам не наблюдал большую часть предвспышечных КПП. Такие события отнесем к типу III и далее не рассматриваем их в этой работе.

Рассмотрим некоторые характеристики событий типов I и II. Зависимость расстояния d между "центрами массы" (центроидами) источников предвспышечных КПП и источника основной вспышки от среднего периода КПП (*P*) показана на рис. 1а ромбами и квадратами для событий типов I и II. соответственно. Точки данных разделяются для двух типов событий. Расстояния для событий типа I меньше расстояний для событий типа II. Минимальные, максимальные и средние расстояния имеют следующие значения:  $\min(d)_{I} =$  $= 1.5 \text{ Mm}, \min(d)_{\text{II}} = 284.3 \text{ Mm}, \max(d)_{\text{I}} = 90 \text{ Mm},$  $\max(d)_{II} = 1227.7 \text{ MM}, \langle d \rangle_{I} = 24.4 \text{ MM}, \langle d \rangle_{II} =$ = 815.6 Мм. соответственно (нижние индексы І и II обозначают принадлежность к соответствующему типу событий). Такая разница в расстояниях событий двух типов понятна. Источники предвспышечных КПП в событиях типа I находятся в одной со вспышкой АО на относительно малых расстояниях к источнику вспышки, тогда как в событиях типа II источники КПП и вспышки



**Рис. 1.** (*a*) — Зависимость расстояния *d* между источниками предвелышечных рентгеновских КПП и рентгеновским источником последующей "изолированной" вспышки класса Х в диапазоне 6–12 кэВ от периода *P* КПП для событий I (ромбы) и II (квадраты) типов. (*б*) — Положения рентгеновских источников вспышек (звездочки) и источников предвелышечных КПП (квадраты) в событиях II типа, соединенные прямыми отрезками на фоне солнечного диска.

располагаются в разнесенных АО на Солнце (примеры будут показаны ниже). Линейное расстояние между двумя АО в событии типа II может достигать почти двух солнечных радиусов, т.е. такие события находятся далеко друг от друга в разных полушариях Солнца (рис. 16). Отметим также, что среднее расстояние в событиях I типа  $(\langle d \rangle_{\rm I} = 24.4$  Мм) в 3–5 раз превышает пространственное разрешение наиболее точных коллимирующих решеток RHESSI (№ 3 – 4.9 Мм и № 4 – 8.5 Мм), использованных для построения "quick-look" изображений. Таким образом, даже из анализа "quick-look" изображений можно сделать вывод о том, что, в среднем, положения источников предвспышечных КПП не совпадали с положением источника основной вспышки в событиях типа I (хотя и находились в той же AO).

Средний период КПП событий типа I ( $\langle P \rangle_{I} = 12.3 \pm 7.1$  мин) меньше, чем событий типа II ( $\langle P \rangle_{II} = 16.4 \pm 11.5$  мин), однако разница периодов не такая существенная, как разница расстояний между источниками КПП и вспышки.

Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между P и d для событий I и II типов имеют следующие значения:  $cc_{I} = -0.21$  и  $cc_{II} = 0.28$ , соответственно (приведены на рис. 1a), что указывает на отсутствие явной линейной связи между этими двумя параметрами.

Далее, в качестве примера, мы разберем более подробно два события I типа и три события II типа. Основные характеристики вспышек в мягком рентгене (дата, время начала и пика, класс, гелиографические и гелиопроекционные координаты, номер родительской АО вспышки, время начала сопутствующего КВМ, если наблюдался, из каталога КВМ SOHO/LASCO, (https://cdaw.gsfc. nasa.gov/CME\_list/) и предвспышечных КПП (средний период  $\langle P \rangle$  и стандартное отклонение  $\sigma(P)$ ) для этих событий даны в табл. 1.

#### 3.2. Вспышка Х2.0 26 октября 2014 г.

Временные профили рентгеновского излучения по данным RHESSI и GOES/XRS, а также профили температуры плазмы T(t) и меры эмиссии МЭ(t) для этого события показаны на рис. 2. Серию из как минимум семи рентгеновских КПП (P1–P7) с возрастающей амплитудой и средним периодом  $\langle P \rangle = 11.4 \pm 1.6$  мин можно видеть на профилях потоков в каналах 0.5–4 и 1–8 Å и T(t) перед началом основной вспышки. На рис. 2s серой жирной кривой показана фиттирующая функция для предвспышечных КПП в профиле

$$T(t) = 5 + 10^{-3}t + 6.1 \times 10^{-8}t^2 \cos\left(\frac{2\pi(t+395)}{684}\right), (1)$$

где *T* в единицах 10<sup>6</sup> К (МК), время *t* в секундах, начиная с 08:30 UT. Эта функция взята из работы [Tan et al., 2016] с коррекцией фазы аргумента косинуса. Отметим, что пики меры эмиссии задержаны относительно пиков температуры на ~ $5.4 \pm 2.8$  мин для предвспышечных пульсаций и на ~13.7 мин для основной вспышки (рис. 2*в*).

RHESSI детектировал часть пульсаций Р3 и Р4, полностью пульсации Р5-Р7 и фазу спада ос-



**Рис. 2.** Временны́е профили скорректированных темпов счета RHESSI (*a*), потоков рентгеновского излучения в каналах 0.5-4 и 1-8 Å GOES/XRS (*b*), температуры (сплошная черная линия) и меры эмиссии (пунктирная серая линия) вспышечной плазмы по данным GOES/XRS (*b*), перед и во время солнечной вспышки X2.0 26 октября 2014 г. Сплошная серая жирная кривая на (*b*) – визуализация функции из выражения (1). Соседние вертикальные сплошные прямые линии обозначают интервалы времени (t1-t6), для которых построены изображения рентгеновских источников, показанные на рис. 3. Двумя вертикальными штриховыми линиями обозначен интервал времени пульсации P7, приведенный на рис. 4.

новной вспышки класса X2.0. Пропуски были изза нахождения RHESSI в тени земли и Южнойатлантической аномалии. Эти интервалы отмечены горизонтальными отрезками на рис. 2*a* сверху с символами "N" и "S", соответственно.

На рисунке 3a,  $\delta$  приведены рентгеновские источники для различных интервалов времени t1-t6, показанных на рис. 2 вертикальными прямыми и соответствующих пульсациям P3-P7 и фазе спада вспышки. Видно, что источники для всех рассмотренных интервалов времени, включая вспышечный источник, находятся в одной AO 12192. Таким образом, это событие типа I. При этом, в разных интервалах времени источники находятся в разных местах и имеют разную форму. Расстояния между "центрами масс" источников в соседние интервалы времени варыруются от ~1 до 16 Мм. Это также прослеживается на рис.  $3e-\ddot{e}$ , на котором на разностные изображения SDO/AIA в канале 131 Å изо-контурами

наложены рентгеновские источники. Видно, что источникам последовательных рентгеновских пульсаций соответствует появление различных ультрафиолетовых петлеобразных уярчений. Для интервала времени *t*6 во время вспышки поток излучения в канале 131 Å слишком велик, вследствие чего происходит перенасыщение матриц инструмента SDO/AIA и источник наблюдается в виде размытого белого пятна сложной формы (рис. 3*ж*). Он соответствует аркаде вспышечных петель.

Чтобы разобраться, что из себя представляют отдельные предвспышечные пульсации, в качестве примера рассмотрим более детально пульсацию Р7 в этом событии. Временные профили для нее (для интервала времени между двумя вертикальными штриховыми линиями на рис. 2) показаны на рис. 4a-e. Из этого рисунка можно видеть, что пульсация Р7 обладает набором признаков, характерных для обычных солнечных



**Рис. 3.** Рентгеновские источники на Солнце до и во время вспышки X2.0 26.10.2014 г. по данным RHESSI в диапазоне 6–12 кэВ для интервалов времени t1-t6. На (*a*) поле зрения – все Солнце. Черный прямоугольник обозначает вспышечную область (AO 12192), показанную на ( $\delta$ ). Разной толщиной и цветом показаны изо-контуры рентгеновских источников на уровне 50% от их максимальной яркости. Штриховой прямоугольник на ( $\delta$ ) обозначает область, показанную на ( $\delta$ ). Разной толщиной и цветом показаны изо-контуры рентгеновских источников на уровне 50% от их максимальной яркости. Штриховой прямоугольник на ( $\delta$ ) обозначает область, показанную на ( $\delta$ - $\infty$ ), где даны разностные изображения в канале 131 Å SDO/AIA для центров интервалов времени t1-t6 с нанесенными изо-контурами рентгеновских источников в диапазоне 6–12 кэВ на уровнях 30 и 70% от максимальной яркости.

вспышек: 1) фаза роста профиля мягкого рентгена короче (примерно в 5 раз) фазы спада, 2) пик профиля меры эмиссии задержан относительно пика профиля температуры (на ~3.3 мин), 3) присутствует импульсная фаза с несколькими пиками жесткого рентгеновского излучения >25 кэВ. Более того, динамика источников мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучения тоже соответствует обычной солнечной вспышке. На рис. 4z-3 для шести интервалов времени  $t1_{P7}-t6_{P7}$ (обозначенных на рис. 4a-6 вертикальными линиями) показаны разностные изображения в канале SDO/AIA 131 Å с наложенными на них изоконтурами рентгеновских источников. Из этого рисунка видно, что в разное время рентгеновские источники имеют разную форму и находятся в разных местах (разница положений "центров масс" соседних источников ~4–20 Мм), а их смещения соответствуют появлению новых источников ультрафиолетового излучения (возгоранию новых корональных петель). Таким образом, можно заключить, что пульсация Р7 сама по себе представляет обычную небольшую солнечную вспышку (класса С7.5), предшествующую основной более мощной вспышке (класса Х2.0) в той же АО.



**Рис. 4.** На (a-e) аналогичные временные профили, что и на рис. 2a-e, но для интервала времени пульсации Р7 в событии 26.10.2014 г. Соседние вертикальные прямые линии обозначают начало (сплошные) и конец (штриховые) интервалов времени  $t_{1P7}$ - $t_{6P7}$ , для которых построены изображения на (z-3), аналогичные рис. 3e-w.

### 3.3. Вспышка М1.9 17 февраля 2013 г.

Временны́е профили, показанные на рис. 5, позволяют видеть наличие по крайней мере пяти пульсаций со средним периодом  $\langle P \rangle = 3.7 \pm 0.9$  мин перед началом вспышки класса М1.9 в 15:45 UT

17 февраля 2013 г. На рисунке 6 показано положение рентгеновских (6–12 кэВ) источников для шести интервалов времени t1-t6, обозначенных на рис. 5 вертикальными линиями. Интервалы t1-t5 соответствуют пикам последовательных предвелышечных пульсаций, а интервал t6 – пер-



Рис. 5. Временные профили, аналогичные показанным на рис. 2а-в, но для события М1.9 17.02.2013 г.

вому пику вспышки. Из рисунка 6а можно вилеть, что источники всех пульсаций и вспышки расположены в одной АО 11675 на диске Солнца. Таким образом, это событие относится к типу І. Из рисунка 66 можно видеть, что источники смещаются во времени в пределах 20 угл. с (или ~15 Мм). На рисунке 68-ж изо-контуры этих же рентгеновских источников наложены на разностные изображения (SDO/AIA в канале 131 Å) участка вспышечной АО. Времена этих ультрафиолетовых изображений соответствуют (в пределах 6 с) центрам временны́х интервалов t1-t6. Из рисунка 6в-ж видно, что динамика рентгеновских источников соответствует динамике ультрафиолетовых источников. А именно, в разные моменты времени "центр масс" рентгеновского источника совпадает с появляющимся новым ультрафиолетовым источником. В начале (в t1) ульрафиолетовый источник имел компактную (~15 Мм) S-образную форму. Со временем, от пульсации к пульсации, эта структура эволюционировала, меняла форму, увеличивались ее размеры (до ~30 Mм) и яркость.

Более детальное рассмотрение отдельных предвспышечных пульсаций в этом событии (рисунки не представляем для сохранения разумного объема статьи) показывает их схожесть с пульсациями в событии 26 октября 2014 г. Рентгеновские пульсации в данном событии проявляют признаки обычных вспышек: 1) фаза роста короче фазы спада, 2) пик меры эмиссии задержан относительно пика температуры на ~ $1.3 \pm 0.9$  мин (для основной вспышки задержка ~0.6 мин), 3) наличие импульсной фазы, сопровождаемой пиками жесткого рентгена (>25 кэВ), 4) соответствие пространственно-временной динамики рентгеновских и ультрафиолетовых источников, сопровождаемой вовлечением новых петлеобразных структур в процесс энерговыделения и увеличением объема излучающей области (рост вспышечных аркад).

### 3.4. Вспышка Х2.7 5 мая 2015 г.

Вспышка началась в мягком рентгене в 22:05 UT. Перед ее началом наблюдалась серия из четырех предвспышечных КПП Р1–Р4 (см. рис. 76,  $\theta$ ). Пики меры эмиссии были задержаны относительно пиков температуры на ~16.5  $\pm$  8.3 мин для предвспышечных КПП и на ~1.3 мин для основной вспышки (рис.  $7\theta$ ).



**Рис. 6.** Изображения в рентгеновском диапазоне 6–12 кэВ по данным RHESSI и SDO/AIA (131 Å), аналогичные показанным на рис. 3, но для события M1.9 17.02.2013 г.

Рентгеновские источники основной вспышки и предшествующей ей пульсации Р4 располагались в АО 12339 вблизи восточного лимба Солнца, причем положения их "центров массы" смещены на ~38 угл. с или ~28 Мм (рис. 7*e*, *ë*, *u*, *й*). Однако источники пульсаций Р1 и Р3 находились в другой АО 12335, расположенной в пределах 300 угл. с от центра солнечного диска (рис. 7*е*,  $\partial$ ,  $\mathcal{K}$ , *з*). По этой причине, данное событие мы относим к типу II. Из-за затенения Землей, RHESSI пропустил пульсацию Р2 (рис. 7*a*). Анализ ультрафиолетовых изображений SDO/AIA показывает, что пульсация Р2 могла произойти в AO 12339, где была и основная вспышка.



**Рис.** 7. (*a*–*в*) Временны́е профили, аналогичные показанным на рис. 2a-e, но для события X2.7 5 мая 2015 г. На (*z*–*ë*) изображения рентгеновских источников на Солнце, построенные по данным RHESSI в диапазоне 6–12 кэВ для интервалов времени t1-t4. Белые прямоугольники обозначают области, для которых показаны изображения на (*ж*–*й*). На изображения рентгеновских источников нанесены белые изо-контуры на уровнях 50% и 70% от их максимальной яркости.

Мы проанализировали ультрафиолетовые изображения Солнца SDO/AIA в разных каналах и не обнаружили корональные петли, которые могли бы соединять удаленные друг от друга AO 12339 и 12335. Дополнительно отметим, что это событие сопровождалось гало-КВМ с зафиксированной линейной скоростью 715 км/с, первое наблюдение которого было в 22:24 UT (через 19 мин после начала вспышки) по данным каталога КВМ SOHO/LASCO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/).

### 3.5. Вспышка М2.9 25 октября 2013 г.

Вспышка стартовала в мягком рентгене в 02:48 UT. Перед ее началом [Тап et al., 2016] выделили серию из семи пульсаций P1-P7 общей длительностью около 2 ч и средним периодом  $\langle P \rangle =$ = 16.1 ± 2.6 мин (см. рис. 86, в). Пики меры эмиссии были задержаны относительно пиков температуры на ~10.3 ± 4.9 мин для предвспышечных пульсаций и на ~5.7 мин для основной вспышки (рис. 8в).

RHESSI наблюдал пульсации Р1, Р2, Р5, Р6 и основную вспышку, но пропустил пульсации РЗ, Р4 и Р7 из-за затенения Землей и пребывания в Южно-атлантической аномалии (рис. 8а). На рисунке 8г-ж мы привели изображения всего Солнца, построенные по данным RHESSI в диапазоне 6-12 кэВ, для пяти интервалов времени t1-t5, показанных вертикальными линиями на рис. 8а-в. Можно видеть, что во время пульсации P1 (t1) рентгеновские источники располагались одновременно в двух удаленных АО: 11882 (вблизи восточного лимба) и 11875 (в западной части диска). Источники пульсаций P2 (t2), P5 (t3) и основной вспышки (15) находились в АО 11882. Однако источник пульсации Р6 (t4) находился в АО 11875. Таким образом, источники части пульсаций находились в АО, удаленной на значительное расстояние (~1300 угл. с) от родительской АО основной вспышки и другой части пульсаций. И поэтому это событие мы относим к типу II. Отметим, что в этом событии положения рентгеновских источников различных пульсаций и основной вспышки, находящихся в АО 11882, в пределах углового разрешения RHESSI совпадали друг с другом (рис. 83, где показаны изо-контуры источников для интервалов времени t1-t3 и t5).

Анализ ультрафиолетовых изображений Солнца SDO/AIA в разных каналах не выявил явного наличия длинных корональных петель, которые могли бы соединять сильно удаленные друг от друга AO 11882 и 11875. Отметим дополнительно, что согласно каталогу KBM SOHO/LASCO событие сопровождалось KBM с угловым раствором 121° и линейной скоростью 344 км/с, первое наблюдение которого было в 03:24 UT (через 36 мин после начала вспышки).

### 3.6. Вспышка С2.4 13 июля 2013 г.

Перед началом этой небольшой вспышки класса C2.4 (в 06:23 UT) [Тап et al., 2016] (figure 2D) зафиксировали в данных GOES/XRS серию из как минимум пяти квазипериодических рентгеновских пульсаций P1—P5 с близкими амплитудами (C1.8, C1.9, C1.6, C1.8 и C1.5) со средним периодом  $\langle P \rangle = 15.6 \pm 2.6$  мин и общей длительностью около 1.5 ч (см. рис. 9*б*, *в*). Пики меры эмиссии были задержаны относительно пиков

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

температуры на ~ $5.7 \pm 3.3$  мин для предвспышечных пульсаций и на ~14.5 мин для основной вспышки.

Из-за затенения Землей и пребывания в Южно-атлантической аномалии RHESSI пропустил первые три пульсации Р1-Р3 и основную вспышку, но детектировал две ближайшие ко вспышке пульсации Р4 и Р5 (рис. 9а). Для определения положения источника вспышки мы воспользовались изображениями SDO/AIA в канале 131 Å. Рентгеновские изображения всего Солнца для пульсаций Р4 и Р5, а также разностное изображение в канале 131 Å приведены на рис. 9 $\epsilon$ ,  $\partial$ , e для интервалов времени t1, t2 и t3 (обозначенных на рис. 9а-в вертикальными линиями), соответственно. Можно видеть, что источник Р4 располагался в АО 11522 в северном полушарии, источник Р5 в АО 11520 в южном полушарии, и источник основной вспышки в АО 11521, расположенной по соседству (~220 угл. с или ~160 Мм) с АО 11520. Более подробно это можно видеть на комбинированном рис. 9ё. Дополнительно, на основе анализа разностных изображений в канале 131 Å SDO/AIA мы определили, что источники уярчений. связанных с пульсациями Р1, Р2 и Р3 с большой вероятностью располагались в АО 11521 и 11522. Таким образом, в этом событии источники разных предвспышечных пульсаций и вспышки располагались по крайней мере в трех различных АО на Солнце. И это событие мы относим к типу II.

Три вовлеченные в это событие АО находились на относительно небольшом (<600 угл. с) расстоянии (по сравнению с рассмотренными выше событиями II типа 05.05.2015 г. и 25.10.2013 г.). Анализ ультрафиолетовых изображений Солнца в разных каналах SDO/AIA показывает, что АО 11522 и 11520 могли быть соединены трансэкваториальными корональными петлями, тогда как соседние АО 11520 и 11521 могли соединяться более короткими петлями.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем обсуждать возможные механизмы исследуемых предвспышечных длиннопериодных рентгеновских КПП, оценим вероятность их появления как серии независимых последовательных вспышек. В работе [Wheatland, 2000] показано, что плотность распределения времени ожидания  $\Delta t$  между последовательными солнечными вспышками по данным GOES/XRS описывается распределением кусочно-постоянного пуассоновского процесса, имеющего приближенный вид:

$$f(\Delta t) = \frac{2\lambda_0}{\left(1 + \lambda_0 \Delta t\right)^3},\tag{2}$$



**Рис. 8.** (a-e) Временные профили, аналогичные показанным на рис. 2a-e, но для события M2.9 25 октября 2013 г. На  $(e-\infty)$  изображения рентгеновских источников на Солнце, построенные по данным RHESSI в диапазоне 6–12 кэВ для интервалов времени t1-t5. На (3) локальный участок вспышечной AO 11882, показанный белым прямоугольником на  $(e), (d), (e), (\infty)$ . Рентгеновские источники показаны изо-контурами на уровне 50% от их максимальной яркости.



**Рис. 9.** (a-e) Временные профили, аналогичные показанным на рис. 2a-e, но для события C2.4 13.07.2012 г. На (z), (d) изображения рентгеновских источников на Солнце, построенные по данным RHESSI в диапазоне 6–12 кэВ для интервалов времени t1 и t2, соответственно. На (e) вспышечный источник в канале 131 Å SDO/AIA для центра интервала t3. На (e) разностное изображение в канале 131 Å SDO/AIA для центра интервала t3 для локального участка Солнца, показанного черным прямоугольником на (e-e). Белые прямоугольники показывают AO 11522, 11520 и 11521. Также белым нанесены изо-контуры (на уровне 50% от максимума) рентгеновских источников 6–12 кэВ, построенные для интервалов t1 и t2.

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

где  $\lambda_0 \approx 0.15$  ч<sup>-1</sup>. Сформулируем задачу следующим образом: считая интервал времени  $\Delta t$  между двумя последовательными вспышками случайной величиной, плотность распределения которой задана формулой (2), оценить вероятность того, что *N* вспышек произойдут последовательно друг за другом "примерно" с равными интервалами времени между соседними вспышками. Воспользуемся критерием "примерности" (квазипериодичности) из работы [Tan et al., 2016]: максимальное время между двумя соседними пульсациями (в серии из N≥4 штук) не превышает удвоенное минимальное время между двумя соседними пульсации в этой серии ( $\Delta t_{\text{max}} \leq 2\Delta t_{\text{min}}$ ). Если время между двумя какими-либо соседними событиями в серии составляет  $\Delta t_0$ , то этот критерий выполняется, если для любых двух соседних событий из серии время между ними удовлетворяет неравенству  $2/3\Delta t_0 \leq \Delta t \leq 4/3\Delta t_0$ . Оценим сверху вероятность попадания времени  $\Delta t$  в отрезок  $[2/3\Delta t_0, 4/3\Delta t_0]$ , воспользовавшись плотностью распределения из (2):

$$P_{0} = P\left(\Delta t \in \left[2/3 \Delta t_{0}, 4/3 \Delta t_{0}\right]\right) =$$
  
= 
$$\int_{2/3\Delta t_{0}}^{4/3\Delta t_{0}} f(x) dx \approx \frac{4\lambda_{0}\Delta t_{0}}{3\left(1 + \lambda_{0}\Delta t_{0}\right)^{3}}.$$
 (3)

Анализ этого выражения показывает, что оно имеет максимальное значение  $\max(P_0) = 16/81 \approx 1/5$ , не зависящее от  $\lambda_0$  и  $\Delta t_0$ . Максимальная вероятность того, что интервалы времени между всеми N соседними событиями удовлетворяет рассмотренному критерию квази-периодичности, тогда оценивается как (в предположении независимости последовательных событий):

$$P_N = \max\left(P_0\right)^N \approx \left(\frac{1}{5}\right)^N. \tag{4}$$

Например, для минимально короткой (согласно критерию в работе [Тап et al., 2016]) серии из N = 4 КПП имеем  $P_{(N=4)} \approx 1/625$  или 0.16%. Для серии из N = 7, как в событиях 26 октября 2014 г. и 25 октября 2013 г.,  $P_{(N=7)} \approx 1/78125$  или 0.00128%. Эти вероятности намного меньше найденных [Тап et al., 2016] вероятностей обнаружения предвелышечных КПП (46, 43 и 26% для велышек классов X, M и C, соответственно). Это свидетельствует о том, что появление серий предвелышечных КПП явно выбивается из общей статистики вспышек и такие КПП не следует рассматривать как независимые случайные вспышки. Между последовательными пульсациями должна быть какая-то причинная связь.

#### 4.1. Проверка механизма осцилляций LRC контура

В работе [Tan et al., 2016] высказано предположение, что механизм генерации рассматривае-

мых предвспышечных КПП может быть связан с осцилляциями электрического LRC контура, которым может рассматриваться корональная магнитная петля с продольным электрическим током [Zaitsev et al., 1998; Степанов и Зайцев, 2018]. В рамках рассматриваемого механизма предполагается наличие в АО магнитной петли с продольным током в короне, который замыкается по кратчайшему пути на фотосфере или под ней. Этот ток формируется и усиливается в петле перед вспышкой в результате изменений магнитного поля вследствие течений плазмы около подножий петли. Такая петля может рассматриваться как электрический LRC контур, собственные колебания которого имеют период, выражаемый зависимостью:

$$P = 2\pi\sqrt{LC} \approx 2.75 \times 10^4 \frac{S\sqrt{\rho}}{I},\tag{5}$$

где *L* – индуктивность, *C* – емкость, *S* – площадь сечения петли (м<sup>2</sup>),  $\rho$  – плотность плазмы в петле (кг м<sup>-3</sup>), I – электрический ток (A). [Tan et al., 2016] предполагают, что эти колебания в петле и наблюдаются перед вспышкой в виде рентгеновских КПП, а во время вспышки магнитная энергия тока диссипирует (происходит нагрев плазмы, ускорение частиц) и осцилляции контура прекращаются или сильно ослабевают. Подставив в формулу (5) значения наблюдаемых периодов КПП P = 1.9 - 47.3 мин и характерные для корональных петель плотность плазмы и площадь сечения, [Tan et al., 2016] получили возможные значения тока в петлях  $I = 3.1 \times 10^9 - 7.6 \times 10^{10}$  А. Такие токи действительно наблюдаются во вспышечных петлях на Солнце (например, [Zimovets et al., 2020]).

Сделаем проверку на основе конкретного события I типа 17.02.2013 г., в котором источники всех предвспышечных КПП и вспышка находились в одной АО в пределах ~20 угл. с или ~15 Мм друг от друга. Как упоминалось в разделе 2, эта вспышка и электрические токи в ее окрестности рассматривались ранее в работах [Sharykin et al., 2015; Zimovets et al., 2020]. Была получена оценка величины тока  $I \approx 2.4 \times 10^9$  А на фотосфере под источником жесткого рентгена (>25 кэВ) площадью  $S = 3.5 \times 10^{13} \text{ м}^2$ . Будем полагать, что это соответствует площади поперечного сечения петли. Зная из наблюдений длину петли ( $l \approx 1.2 \times 10^7$  м), ее объем оценивается как  $V = Sl \approx 4.2 \times 10^{20} \text{ м}^3$ . Концентрация плазмы в петле  $n = \sqrt{EM/V}$ ≈  $0.6 \times 10^{17}$  м<sup>-3</sup>, где *EM* ≈  $1.5 \times 10^{54}$  м<sup>-3</sup> – мера эмиссии, рассчитанная стандартным образом из данных GOES/XRS в двух каналах 0.5-4 и 1-8 Å. Оценим плотность плазмы  $\rho \approx nm_p \approx 1 \times 10^{-10}$  кг м<sup>-3</sup>, где  $m_p$  — масса протона. Подставив оцененные значения физических параметров ( $S, \rho, I$ ) в петле

в выражение (5), получим значение периода осцилляций  $P \approx 66.7$  мин. Это значение примерно в 18 раз превышает измеренное значение периода предвспышечных КПП в этом событии  $\langle P \rangle =$ = 3.7 ± 0.9 мин (см. табл. 1). Даже несмотря на оценочный характер полученных нами параметров петли, такое большое расхождение теоретического и наблюдаемого периодов указывает на низкую вероятность применения этого механизма к рассматриваемому событию.

Это и неудивительно, поскольку из наблюдений событий типа I (включая и это событие) мы установили, что обычно источники последовательных пульсаций располагаются не в одной петле, а появляются в последовательных пульсациях в разных местах (со смещением до ~20 Мм), соответствующих появлению новых ультрафиолетовых источников (петель). Дополнительным аргументом является установленный наблюдательный факт, что предвспышечные КПП по своей сути могут являться последовательными вспышечными событиями, сопровождаемыми задержкой пика меры эмиссии относительно пика температуры на время от нескольких десятков секунд до нескольких минут (например, [Sadykov et al., 2019] и ссылки там), серией импульсов жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, перемещением их источников и поджигом новых ультрафиолетовых петельных источников [Grigis and Benz, 2005: Benz, 2017: Kuznetsov et al., 2016, 2017]. Такое поведение источников характерно для многих солнечных вспышек, которые сами по себе часто сопровождаются КПП в различных диапазонах спектра. Наконец, события типа II, в которых источники части или всех предвспышечных КПП располагаются в других АО, не связанных корональными петлями с родительской АО основной вспышки, вряд ли можно объяснить в рамках рассматриваемого механизма.

# 4.2. Другие возможные механизмы предвспышечных КПП

Ряд механизмов КПП основан на МГД-осцилляциях/волнах в различных магнитных объектах на Солнце: в корональных петлях, в расширяющихся магнитных воронках или в более сложных структурах типа Х-точек или токовых слоев (современные обзоры КПП во вспышках представлены в работах [Van Doorsselaere et al., 2016; McLaughlin et al., 2018; Куприянова и др., 2020; Zimovets et al., 2021]). [Тап et al., 2016] рассматривают МГД-осцилляции петель как возможную альтернативу механизму осцилляций LRC контура для предвспышечных КПП. У нас есть четыре довода против этого механизма:

*Во-первых*, из теории известно, что период основной моды медленных и изгибных осцилляций

фазовая скорость волны. Рассматриваемые длинные периоды ( $P \approx 2-47$  мин) обычно характерны для медленной и изгибной мод (например, [Zimovets et al., 2021]). Для условий солнечной короны их фазовые скорости примерно соответствуют скорости звука и альфвеновской скорости, соответственно. Линейная зависимость периода осцилляций и длины петли установлена для медленных и изгибных мод (см. обзоры [Wang et al., 2021; Nakariakov et al., 2021], соответственно, и ссылки в них). В стандартном предположении о полукруглой форме петли ее длина *l* и расстояние между подножиями d линейно связаны как l = $= \pi d/2$ . Однако в разделе 3.1 мы установили, что не наблюдается значимой линейной корреляции между периодом предвспышечных КПП и расстоянием d между их источниками и источниками вспышек. Если предположить, что рассматриваемые КПП связаны с МГД-осцилляциями петли, соединяющей разнесенные источники КПП и вспышки, то ожидалась бы значимая корреляция. Более того, среднее значение фазовой скорости для событий типа II получается  $\langle v \rangle = 3281 \pm$  $\pm$  2187 км с<sup>-1</sup> (при минимальной и максимальной скоростях  $v_{\min} = 1105$  км с<sup>-1</sup> и  $v_{\max} = 8153$  км с<sup>-1</sup>, со-ответственно), что превышает характерные звуковые и альфвеновские скорости в короне. При этом мало вероятно, чтобы в рассматриваемых событиях волны могли распространяться со сверхзвуковыми и сверх-альфвеновскими скоростями. В этом случае они могли бы становиться ударными волнами и сопровождались бы специфическими квазипериодическими радиовсплесками [Goddard et al., 2016; Pascoe et al., 2017], которые мы не наблюдаем во время предвспышеч-

линейно связан с длиной петли: P = 2l/v, где v -

Во-вторых, в ряде событий видно явное увеличение амплитуды предвспышечных КПП со временем (например, события 26.10.2014 г., 05.05.2015 г., 25.10.2013 г. и 17.02.2013 г.), тогда как обычно наблюдаются затухающие (или "незатухающие") изгибные и медленные осцилляции корональных петель после импульсного возбуждения [Nakariakov et al., 2021, Wang et al., 2021];

ных КПП;

*В-третьих*, по крайней мере, в части событий II типа мы не нашли корональные петли, соединяющие разнесенные АО источников КПП и вспышки;

Четвертым доводом является тот наблюдательный факт, что источники предвспышечных КПП обычно не располагаются в одном месте и их появление связано с поджигом новых петельных структур (т.е. речь не идет об осцилляциях одной петли).

Итак, приведенные аргументы не в пользу известных механизмов КПП, основанных на МГДосцилляциях петель. Тем не менее, полностью исключать их из рассмотрения пока преждевременно и нужна более тщательная проверка.

Другое возможное объяснение рассматриваемых КПП может быть связано с механизмом осциллирующего магнитного пересоединения [Мс-Laughlin et al., 2018; Zimovets et al., 2021]. Ha основе численного МГД-моделирования [Murray et al., 2009] показали. что при взаимодействии всплывающей из-под фотосферы горизонтальной магнитной трубки с вертикальным магнитным полем над фотосферой может происходить серия квазипериодических эпизодов магнитного пересоединения, в которой вытекающий поток предыдущего эпизода пересоединения является втекающим потоком при новом эпизоде. Поскольку при пересоединении происходит перестройка магнитного поля и нагрев плазмы (а также ускорение частиц), то серия таких эпизодов, вероятно, может проявляться как серия квазипериодических пульсаций с источниками, наблюдаемыми в различных местах (петлях) одной АО – осциллирующее пересоединение каждый раз происходит на разных силовых линиях. Потенциально это подходит для интерпретации событий типа І. Однако в событиях II типа источники излучения располагаются в различных АО. В этом случае можно предположить, что всплытие магнитных потоков в разнесенных областях Солнца может происходить когерентно (квази-синхронно) под фотосферой. Такая гипотеза высказывалась ранее в работах [Fritzova-Svestkova et al., 1976; Golubchina, 2001] для интерпретации симпатических вспышек, коими могут являться, по крайней мере, некоторые из рассматриваемых нами событий типа II. Но эта гипотеза требует дальнейшей проверки.

Стоит отметить, что моделирование [Murray et al., 2009] предсказывает ослабевающее со временем пересоединение и, как следствие, уменьшающуюся амплитуду КПП, тогда как в некоторых событиях наблюдаются предвспышечные КПП с нарастающей амплитудой (см. выше). Более того, после серии предвспышечных КПП происходит более мощное энерговыделение – основная вспышка. Возникает вопрос – почему происходит усиление эпизодов энерговыделения со временем? Здесь надо отметить, что [Murray et al., 2009] выполнили моделирование для очень специфических идеальных условий всплытия горизонтальной трубки в однородном вертикальном магнитном поле, имитирующем корональную дыру. Однако рассматриваемые нами события происходят в реальных АО, в которых магнитное поле имеет намного более сложную неоднородную структуру. К тому же и сами всплывающие магнитные потоки могут обладать пространственно-временными неоднородностями. Для проверки применимости этого механизма требуются дальнейшие исследования как со стороны моделирования, так и со стороны наблюдений.

Мы также пока не исключаем возможности и других механизмов для рассматриваемых предвспышечных КПП. В частности, в работе [Zimovets et al., 2018] на основе сопоставления структуры экстраполированного перед вспышками магнитного поля в короне и положения вспышечных источников жесткого рентгеновского излучения было показано, что отдельные эпизоды энерговыделения (пульсации) могут испускаться из различных мест (петель) вспышечной аркады петель при ее взаимодействии (пересоединении) с вложенным в нее магнитным жгутом. Исходя из этого, можно предположить, что после каждого эпизода пересоединения (сопровождаемого предвспышечной пульсацией) поднимающийся жгут временно переходит в новое квазиравновесное состояние [Priest and Forbes, 2002]. В результате эволюции магнитного поля в АО через некоторое время (примерно равное периоду КПП) магнитный жгут выходит из равновесного состояния и скачком перемещается в новое состояние, что сопровождается эпизодом пересоединения некоторых силовых линий и новой пульсацией излучения. И так далее, до момента основной вспышки, в результате которой сбрасывается свободная магнитная энергия неустойчивой структуры. Она может как полностью эруптировать и стать основой КВМ или затормозиться на какой-то высоте из-за сдерживающих сил натяжения вышерасположенных корональных петель в АО и гравитации. Однако, опять же, для интерпретации событий типа II в рамках этого сценария нужно предполагать квази-синхронность процессов эволюции магнитных полей в различных АО Солнца. Вообще, обсуждение причинных связей между удаленными событиями II типа может в настоящее время носить только феноменологический характер. Эта проблема требует дальнейшего, более глубокого изучения.

#### 4.3. Использование предвспышечных КПП для прогнозирования вспышек

В работе [Tan et al., 2016] также высказана идея, что рассматриваемые предвспышечные длиннопериодные рентгеновские КПП в данных GOES/XRS могут использоваться для количественного предсказания солнечных вспышек. На наш взгляд, это малоперспективно по следующим причинам. Во-первых, такие пульсации идентифицируются только в "изолированных" вспышках, перед которыми нет других вспышек аналогичного класса. Во-вторых, предвспышечные КПП проявляются не более чем перед 46 и 43% "изолированных" мощных вспышек классов Х и М, соответственно. Это означает, что для более чем половины всех мощных вспышек эти КПП не наблюдаются и, соответственно, не могут использоваться для их прогнозирования. Более того, далеко не все предвспышечные пульсации имеют такой "типичный" (по определению [Tan et al., 2016]) квазипериодический вид, который имеют КПП в рассмотренных пяти событиях из Таблицы. Скорее, эти события "атипичные". Во многих же событиях предвспышечные пульсации далеко не так ярко выражены — их амплитуда меняется произвольно, они перемежаются шумами в данных и вкраплениями отдельных вспышечных событий, выбивающихся из квазипериодической серии. В-третьих, источники КПП и вспышки в ~1/3 событий располагаются в различных АО, по крайней мере часть из которых не связана наблюдаемыми корональными петлями. Поскольку на Солние одновременно может присутствовать множество АО, не очевидно, в какой из них произойдет вспышка после серии наблюдаемых КПП, даже если известна их родительская АО. В-четвертых, пока не проводился анализ процента серий рентгеновских КПП с аналогичными периодами, после которых не происходит более мощная вспышка (ложные срабатывания). Тем не менее, в качестве дополнительного (не самого основного) признака/предвестника возможного появления вспышки на Солнце эти КПП, вероятно, все же могли бы использоваться после дальнейшего систематического анализа.

Наконец, нам представляется, что использование предвспышечных рентгеновских КПП для прогнозирования КВМ еще менее оправдано, чем для прогнозирования вспышек, поскольку часть событий с такими КПП вообще не сопровождается КВМ (см. табл. 1).

#### 5. ВЫВОДЫ

На основе анализа рентгеновских "quick-look" изображений RHESSI "изолированных" вспышек класса Х с предвспышечными длиннопериодными квазипериодическими пульсациями, исследованными в работе [Tan et al., 2016] без пространственного разрешения, мы пришли к выводу, что такие события можно разделить на два типа.

В событиях типа I (составляющих ~1/3 от всех событий) источники всех квазипериодических пульсаций и основной вспышки располагаются в одной AO, тогда как в событиях типа II (тоже ~1/3) источники по крайней мере части пульсаций находятся в других AO, нежели вспышка. Более детальный анализ изображений RHESSI в мягком рентгене и SDO/AIA в ультрафиолете для двух событий типа I и трех типа II показал, что предвспышечные квазипериодические пульсации можно рассматривать как серии (из  $N \ge 4$ ) причинно-связанных вспышечных событий, причем источники пульсаций не располагаются в одной петле, их последовательное появление сопровождается поджигом новых ультрафиолето-

вых петлеобразных источников в различных местах АО (в пределах ~20 Мм друг от друга и от основной вспышки для рассмотренной выборки событий).

Ряд наблюдательных аргументов указывает на то, что механизмы, связанные с осцилляциями LRC контура и МГД-осцилляциями петель маловероятны для объяснения рассматриваемых квазипериодических пульсаций. Более перспективен, на наш взгляд, механизм осциллирующего магнитного пересоединения. В событиях типа I этот процесс протекает в одной AO, тогда как для объяснения событий типа II требуется предположить наличие когерентности всплытия магнитных потоков в разнесенных AO. Для проверки этого предположения требуются дальнейшие исследования.

Мы считаем, что рассматриваемые квазипериодические пульсации малоперспективны для построения надежных количественных прогнозов солнечных вспышек и KBM, хотя они и могут рассматриваться в качестве одного из (но не основного) предвестников вспышек.

#### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны коллективам инструментов RHESSI, GOES/XRS, SDO/AIA и SDO/HMI, а также создателям LASCO/SOHO каталога KBM за свободный доступ к данным, без которых эта работа не могла бы быть реализована в настоящее время. Мы также признательны ISSI (Берн) за поддержку международной рабочей группы "Bridging New X-ray Observations and Advanced Models of Flare Variability: A Key to Understanding the Fundamentals of Flare Energy Release", на онлайн встрече которой (7–11 февраля 2022 г.) обсуждалась представленная работа. Благодарим зав. кафедрой ФАиП ВГУ В.Д. Буркова за помощь в выводе оценки вероятности появления серии КПП в разделе 4. Благодарим рецензента за полезные замечания.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10158).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А. Особенности короткопериодических колебаний микроволнового излучения активной области Солнца перед вспышкой // Ядер. физика. № 3. Т. 81. С. 366–370. 2018. https://doi.org/10.7868/S004400271803011X

— Жданов А.А. Исследование характеристик предвспышечного увеличения интенсивности мягкого рентгеновского излучения Солнца // Дисс. на соискание степени к. ф.-м. н. ФТИ им. А.Ф. Иоффе. 178 с. Ленинград. 1985. — Жданов А.А., Чариков Ю.Е. Частотный анализ предвспышечного рентгеновского излучения Солнца // Письма в Астрон. Журн. Т. 11. С. 216—221. 1985.

- Куприянова Е.Г., Колотков Д.Ю., Накаряков В.М., Кауфман А.С. Квазипериодические пульсации в солнечных и звездных вспышках. Обзор // Солнечно-земная физика Т. 6. № 1. С. 3–29. 2020.

https://doi.org/10.12737/szf-61202001

- Петрукович А.А., Белов А.В., Обридко В.Н. Прогноз гелиогеофизической обстановки // Плазменная гелиогеофизика. Т. П. Ред. Зеленый Л.М., Веселовский И.С. М: ФИЗМАТЛИТ. С. 235–252. 2008.

- Степанов А.В., Зайцев В.В. Магнитосферы активных областей Солнца и звезд. М.: ФИЗМАТЛИТ. 392 с. 2018.

*– Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* Solar-Flare Precursors in the Microwave Range // Geomagn. Aeron. V. 60. № 7. P. 846–852. 2020.

https://doi.org/10.1134/S0016793220070038

*– Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* Oscillations of the microwave emission of solar active region 12673 before flares // Geomagn. Aeron. V. 59. № 7. P. 822–826. 2019. https://doi.org/10.1134/S001679321907003X

- Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K. Quasi-periodic Oscillations of Solar Active Regions in Connection with their Flare Activity – NoRH Observations // Solar Phys. V. 273. P. 403–412. 2011.

https://doi.org/10.1007/s11207-011-9822-6

- Aleshin V.I., Kobrin M.M., Korshunov A.I. Quasiperiodic components with periods of from 30 to 60 min in the fluctuation spectra of solar radio emission at 3 cm wavelength // Radiophys. Quantum Electron. V. 16.  $\mathbb{N}$  5. P. 571–576. 1973.

https://doi.org/10.1007/BF01033493

- Benvenuto F, Schwartz R., Piana M., Massone A.M. Expectation maximization for hard X-ray count modulation profiles // Astron. Astrophys. V. 555. ID. A61. 5 PP. 2013. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321295

- *Benz A.O.* Flare Observations // Living Reviews in Solar Physics. V. 14. № 2. 2017.

https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3

- Bumba V., Kryvsky L. Chromosphere pre-flares // Bull. Astron. Inst. Czech. V. 10. P. 221–223. 1959.

- Charikov Ju.E., Pharaphonov V.G. X-ray precursors of solar flares // Proc. 18th Int. Cosm. Ray Conf., Bangalore, India, 22 August-3 September 1983. V. 4. P. 109–112. 1983.

- *Chifor C.*, Tripathi D., Mason H.E., Dennis B.R. X-ray precursors to flares and filament eruptions // Astron. Astrophys. V. 472. P. 967–979. 2007.

https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077771

- Durasova M.S., Dobrin M.M., Yudin O.I. Evidence of Quasi-periodic Movements in the Solar Chromosphere and Corona // Nature Phys. Sci. V. 229. P. 82–84. 1971. https://doi.org/10.1038/physci229082b0

- *Fleishman G.D., Gary D.E., Chen B., Kuroda N., Yu S., Nita G.M.* Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flares // Science. V. 367. P. 278–280. 2020.

https://doi.org/10.1126/science.aax6874

- Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al. An Observational Overview of Solar Flares // Space Sci. Rev. V. 159. P. 19-106. 2011.

https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8

*– Fritzova-Svestkova L., Chase R.C., Svestka Z.* On the occurrence of sympathetic flares // Sol. Phys. V. 48. P. 275–286. 1976.

https://doi.org/10.1007/BF00151996

- Goddard C.R., Nistico G., Nakariakov V.M., Zimovets I.V., White S.M. Observation of quasi-periodic solar radio bursts associated with propagating fast-mode waves // Astron. Astrophys. V. 594. ID. A96. 8 p. 2016.

https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628478

- *Golubchina O.A.* The sympathetic flares // Proc. Of the Reg. Meet. On Sol. Phys. "Solar Researches in the South-Eastern European Countries: Present and Perspectives", Bucharest, Romania, 24–28 April 2001. Obser. Sol. P. 160–164. 2002.

- *Grigis P.C., Benz A.O.* The Evolution of Reconnection along an Arcade of Magnetic Loops // Astrophys. J. V. 625. P. L143–L146. 2005.

https://doi.org/10.1086/431147

*– Gyenge N.*, Ballai I., Baranyi T. Statistical study of spatiotemporal distribution of precursor solar flares associated with major flares // Month. Not. Royal Astr. Soc. V. 459. P. 3532–3539. 2016.

https://doi.org/10.1093/mnras/stw859

- Hurford G.J., Schmahl E.J., Schwartz R.A. et al. The RHESSI Imaging Concept // Solar. Phys. V. 210. P. 61–86. 2002.

https://doi.org/10.1023/A:1022436213688

- Kobrin M.M., Korshunov A.I., Snegirev S.D., Timofeev B.V. On a sharp increase of quasi-periodic components of fluctuations of inclination of the spectrum of solar radio emission at lambda = 3 cm before active events in August 1972 //Soln. Dannye. V. 10. P. 79–85. 1973.

- Kuznetsov S.A., Zimovets I.V., Melnikov V.F., Wang R. Spatio-temporal Evolution of Sources of Microwave and Hard X-Ray Pulsations of the Solar Flare using the NoRH, RHESSI, and AIA/SDO Observation Data // Geomagn. Aeronom. V. 57. P. 1067–1072. 2017.

https://doi.org/10.1134/S001679321708014X

- Kuznetsov S.A., Zimovets I.V., Morgachev A.S., Struminsky A.B. Spatio-temporal Dynamics of Sources of Hard X-Ray Pulsations in Solar Flares // Solar Phys. V. 291. P. 3385–3426. 2016.

https://doi.org/10.1007/s11207-016-0981-3

- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar. Phys. V. 275. P. 17–40. 2012. https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8

- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // Solar. Phys. V. 210. P. 3–32. 2002. https://doi.org/10.1023/A:1022428818870

- Martin S.F. Preflare conditions, changes and events // Sol. Phys. V. 68. P. 217–236. 1980. https://doi.org/10.1007/BF00156861

- McLaughlin J.A., Nakariakov V.M., Dominique M., Jelinek P., Takasao S. Modelling Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares // Space Sci. Rev. V. 214. ID. 45. 54 p. 2018.

https://doi.org/10.1007/s11214-018-0478-5

- Murray M.J., van Driel-Gesztelyi L., Baker D. Simulations of emerging flux in a coronal hole: oscillatory reconnection // Astron. Astrophys. V. 494, P. 329–337, 2009. https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810406

Nakariakov V.M., Anfinogentov S.A., Antolin P. et al. Kink Oscillations of Coronal Loops // Space Sci. Rev. V. 217. ISS. 6. ART. ID. 73. 2021. https://doi.org/10.1007/s11214-021-00847-2

- Pascoe D.J., Goddard C.R., Nakariakov V.M. Dispersive

Evolution of Nonlinear Fast Magnetoacoustic Wave Trains // Astrophys. J. Lett. V. 847. ISS. 2. ART. ID. L21. 7 p. 2017. https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8db8

- Priest E.R., Forbes T.G. The magnetic nature of solar flares // Astron. Astrophys. Rev. V. 10. P. 313-377. 2002. https://doi.org/10.1007/s001590100013

- Sadykov V.M., Kosovichev A.G., Kitiashvili I.N., Frolov A. Statistical Properties of Soft X-Ray Emission of Solar Flares // Astrophys. J. V. 874:19 (11 pp). 2019. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab06c3

- Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D. et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. // Adv. Space Res. V. 55. P. 2745-2807. 2015. https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023

- Sharykin I.N., Kosovichev A.G., Zimovets I.V. Energy Release and Initiation of a Sunguake in a C-class Flare // Astrophys. J. V. 807. ID. 102. 9 PP. 2015. https://doi.org/10.1088/0004-637X/807/1/102

- Somov B.V. Plasma Astrophysics, Part II: Reconnection and Flares, Astrophysics and Space Science Library, V. 392. Springer Science + Business Media New York. 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4295-0

- Svch R., Nakariakov V.M., Karlickv M., Anfinogentov S. Relationship between wave processes in sunspots and quasiperiodic pulsations in active region flares // Astron. Astrophys. V. 505. P. 791-799. 2009.

https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912132

- Tan B., Yu Z., Huang J., Tan C., Zhang Y. Very long-period pulsations before the onset of solar flares // Astrophys. J. V. 833:206 (6 p). 2016.

https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/206

- Van Doorsselaere T., Kupriyanova E.G., Yuan D. Quasiperiodic Pulsations in Solar and Stellar Flares: An Overview of Recent Results (Invited Review) // Solar Phys. V. 291. P. 3143-3164. 2016.

https://doi.org/10.1007/s11207-016-0977-z

- van Hoven G., Hurford G.J. Solar flare precursors // Adv. Space Res. V. 6. P. 83-91. 1986.

https://doi.org/10.1016/0273-1177(86)90121-3

Wang H., Liu C., Ahn K. et al. High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere // Nature Astr. V. 1. ART. N. 0085. P. 1-6. 2017.

https://doi.org/10.1038/s41550-017-0085

- Wang T., Ofman L., Yuan D., Reale F., Kolotkov D.Y., Srivastava A.K. Slow-Mode Magnetoacoustic Waves in Coronal Loops // Space Sci. Rev. V. 217. ISS. 2. ART. ID. 34. 2021.

https://doi.org/10.1007/s11214-021-00811-0

- Webb D.F. Coronal X-ray activity preceding solar flares // Sol. Phys. V. 97. P. 321-344. 1985.

https://doi.org/10.1007/BF00165993

- Wheatland M.S. The Origin of the Solar Flare Waiting-Time Distribution // Astrophys. J. V. 536. P. L109–L112. 2000

https://doi.org/10.1086/312739

- White S.M., Thomas R.J., Schwartz R.A. Updated expressions for determining temperatures and emission measures from GOES soft X-ray measurements // Solar Phys. V. 227. P. 231-248. 2005.

https://doi.org/10.1007/s11207-005-2445-z

- Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S., Pohiolainen S. LRCcircuit analog of current-carrying magnetic loop: diagnostics of electric parameters // Astron. Astrophys. V. 337. P. 887-896. 1998.

- Zimovets I.V., Gros M., Struminsky A.B. Evidence of the radio-quiet hard X-ray precursor of the 13 December 2006 solar flare // Adv. Space Res. V. 43. P. 680-686. 2009. https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.009

- Zimovets I.V., Wang R., Liu Y.D., Wang C., Kuznetsov S.A., Sharykin I.N., Strumincsky A.B., Nakariakov V.M. Magnetic structure of solar flare regions producing hard X-ray pulsations // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. V. 174. P. 17-27. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.017

- Zimovets I.V., Sharykin I.N., Gan W.Q. Relationships between Photospheric Vertical Electric Currents and Hard X-Ray Sources in Solar Flares: Statistical Study // Astrophys. J. V. 891. ID. 138. 21 PP. 2020. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab75be

- Zimovets I.V., McLaughlin J.A., Srivastava A.K. et al. Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares: A Review of Underpinning Physical Mechanisms and Their Predicted Observational Signatures // Space Sci. Rev. V. 217. ART. ID. 66. 2021.

https://doi.org/10.1007/s11214-021-00840-9