

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ В СОЛНЕЧНЫХ И ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШКАХ. ОБЗОР

QUASI-PERIODIC PULSATIONS IN SOLAR AND STELLAR FLARES. REVIEW

Е.Г. Куприянова

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru

Д.Ю. Колотков

Уорикский Университет,
Ковентри, Великобритания, d.kolotkov.1@warwick.ac.uk
Институт солнечно-земной физики, СО РАН,
Иркутск, Россия

В.М. Накаряков

Уорикский Университет,
Ковентри, Великобритания
Санкт-Петербургский филиал
Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия, V.Nakariakov@warwick.ac.uk

А.С. Кауфман

Институт солнечно-земной физики, СО РАН,
Иркутск, Россия, deres@iszf.irk.ru

E.G. Kupriyanova

Central Astronomical Observatory at Pulkovo RAS,
Saint Petersburg, Russia, elenku@bk.ru

D.Yu. Kolotkov

University of Warwick,
Coventry, UK, d.kolotkov.1@warwick.ac.uk
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia

V.M. Nakariakov

University of Warwick,
Coventry, UK
Saint Petersburg branch of Special Astrophysical Observatory
RAS,
Saint Petersburg, Russia, V.Nakariakov@warwick.ac.uk

A.S. Kaufman

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, deres@iszf.irk.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современного состояния исследований колебательных процессов в солнечных и звездных вспышках, основанных на наблюдательных данных наземных и космических инструментов с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением в разных диапазонах электромагнитного спектра. Рассматриваются механизмы генерации вспыхивающего излучения и его квазипериодической модуляции. Обсуждаются сходство и различие солнечных и звездных вспышек, а также связанные с этим проблемы супервспышек на Солнце и космической погоды. Показано, что квазипериодические пульсации (КПП) вспыхивающего излучения являются эффективным инструментом диагностики как самих вспыхивающих процессов, так и параметров тепловой плазмы и ускоренных частиц. Рассматриваются виды КПП, их статистические свойства и методы анализа с учетом нестационарности параметров КПП. Сделан обзор предполагаемых механизмов КПП и открытых вопросов.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, солнечные вспышки, звездные вспышки, квазипериодические пульсации.

Abstract. This paper provides an overview of the state-of-the-art studies of oscillatory processes in solar and stellar flares, based on modern observational data from ground-based and space-borne instruments with high temporal, spatial, and spectral resolution in different electromagnetic spectrum ranges. We examine the mechanisms that generate flare emission and its quasi-periodic modulation. We discuss similarities and differences between solar and stellar flares, and address associated problems of superflares on the Sun and space weather problems. Quasi-periodic pulsations (QPPs) of flare radiation are shown to be an effective tool for diagnosing both the flare processes themselves and the parameters of flare plasma and accelerated particles. We consider types of QPPs, their statistical properties, and methods of analysis, taking into account the non-stationarity of the QPPs' parameters. We review the proposed mechanisms of QPPs and address open questions.

Keywords: Sun, solar activity, solar flares, stellar flares, quasi-periodic pulsations.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования Солнца позволяют найти ответы на многие вопросы, связанные с солнечно-земными связями и физикой звезд. Физические процессы, происходящие на Солнце, представляют интерес для понимания и предсказания взаимодействия солнечной плазмы с атмосферой и магнитным полем Земли,

что является необходимым для понимания земного климата и космической погоды. Кроме того, Солнце может рассматриваться как природная плазменная лаборатория. Плазма представляет собой ионизированный газ, и ее поведение во многом определяется электромагнитным взаимодействием между свободными электронами и ионами. Более 99.9 % наблю-

даемой Вселенной является плазмой, поэтому ее изучение представляет несомненный интерес для современной физики. Например, изучение плазмы важно в контексте решения проблем экологически чистой и практически неисчерпаемой энергетики будущего, поскольку плазма является рабочим телом в реакторах управляемого термоядерного синтеза.

Помимо таких относительно постоянных процессов, как тепловое излучение, в том числе в видимом диапазоне, исходящее с поверхности Солнца, и истечение плазмы в виде заполняющего почти всю Солнечную систему солнечного ветра, на Солнце происходит спорадическое импульсное энерговыделение во вспышках и корональных выбросах массы (КВМ). Характерные времена этих процессов составляют от нескольких секунд до нескольких часов. Выделяемая энергия достигает 10^{33} эрг, т. е. эквивалентна энергии одновременного взрыва двух миллиардов атомных бомб, сброшенных на Хиросиму, что делает вспышки и КВМ наиболее мощными физическими процессами в Солнечной системе. При этом выделение энергии обусловлено не ядерными реакциями, а преобразованием энергии магнитного поля в другие виды энергии — тепловую и кинетическую (включая ускорение заряженных частиц и генерацию плазменных струй). С ускоренными частицами связано появление излучения различных диапазонов длин волн — от длинноволнового до жесткого рентгеновского и гамма-лучей.

Звезды поздних спектральных классов, в частности красные карлики, также известны своей вспышечной активностью. В то же время окончательно не установлена идентичность физических механизмов, ответственных за импульсное энерговыделение на вспышечных звездах и на Солнце. Прецизионные наблюдения звезд солнечного типа показывают наличие вспышечной активности и у них. Более того, в ряде случаев на звездах наблюдались супервспышки с энергией до 10^{38} эрг, что значительно больше энергии самых мощных вспышек на Солнце. Регистрация супервспышек на звездах поднимает вопросы о возможности и вероятности появления супервспышки на Солнце и ее последствиях для нашей цивилизации.

Несмотря на очевидную важность и интенсивные исследования, до сих пор нет полного понимания физических процессов, приводящих к импульсному энерговыделению. Трудности при исследованиях обусловлены не только многомасштабностью и нелинейностью вспышек, но и недостатком данных высокоточных и многоволновых наблюдений. Кроме того, сложности встречаются в диагностике параметров плазмы и магнитного поля во вспышечных областях, а также в разработке и применении специфических методов, позволяющих выбрать модели, наиболее точно описывающие наблюдения.

В последнее время существенный прогресс достигнут в понимании важности колебательных квазипериодических явлений в солнечных вспышках. Тот факт, что квазипериодические явления, обычно называемые квазипериодическими пульсациями (КПП), наблюдаются в подавляющем большинстве вспышечных событий, указывает на необходимость их учета

при построении модели солнечной вспышки. В данной работе мы предлагаем детальный обзор современного состояния экспериментального изучения КПП в солнечных и звездных вспышках и их теоретического моделирования.

2. ЧТО ТАКОЕ СОЛНЕЧНЫЕ И ЗВЕЗДНЫЕ ВСПЫШКИ?

2.1. Наблюдения и феноменология солнечных вспышек

Излучение солнечных вспышек наблюдается во всем диапазоне электромагнитного спектра — от низкочастотных радиоволн до высокоэнергичного гамма-излучения. Определим различные диапазоны длин волн, о которых пойдет речь в данном обзоре (в порядке уменьшения длины волны). Сразу отметим, что границы диапазонов условные и в приграничных областях разделение на диапазоны зависит от конкретного механизма излучения (о механизмах см. подробнее в подразделе 2.3). Радиоизлучение солнечных вспышек принимается наземными телескопами в диапазоне от декаметровых до миллиметровых (мм) и субмиллиметровых (суб-мм) длин волн. Часто радиодиапазон от десятков сантиметров до нескольких миллиметров рассматривают отдельно, а излучение с такими длинами волн называют микроволновым. Недавно (в аспекте солнечных вспышек) также возник интерес к так называемым терагерцовому (ТГц) и субтерагерцовому (суб-ТГц) радиодиапазам. Исходя из длины волны, эти диапазоны также называют субмиллиметровым и миллиметровым, $\lambda \approx 0.1\text{--}8$ мм. Со стороны более длинных волн они граничат с микроволновым диапазоном, а в своей коротковолновой части — с инфракрасным (ИК) диапазоном ($\lambda \approx 0.74\text{--}200$ мкм). Оптический континуум охватывает диапазон от бальмеровского скачка ($\lambda = 3646$ Å) до ближнего ИК-диапазона ($\lambda \approx 7400$ Å). В диапазоне ультрафиолетового (УФ) излучения ($\lambda \approx 100\text{--}3000$ Å) выделяют поддиапазон крайнего ультрафиолета (КУФ) с длиной волны $\lambda \approx 100\text{--}1210$ Å. Для определения диапазонов рентгеновского излучения принято использовать значения энергии, выраженные в электронвольтах (эВ). Формула Планка легко позволяет перевести эти значения в длины волн: $\lambda_{\text{Д}} \approx 12400/E_{\text{эВ}}$, где $\lambda_{\text{Д}}$ — длина волны в Å, $E_{\text{эВ}}$ — энергия фотона в эВ. Диапазон мягкого рентгеновского (МР) излучения с энергиями от 10 эВ до 10–15 кэВ соответствует длинам волн $\lambda \approx 0.84\text{--}124$ Å. Длины волн жесткого рентгеновского (ЖР) излучения с энергиями 15–250 кэВ лежат в диапазоне $\lambda \approx 0.05\text{--}0.84$ Å. Самый высокоэнергичный (и коротковолновый) диапазон гамма-излучения с энергиями выше 100 кэВ перекрывается с ЖР-диапазоном ($\lambda < 0.1$ Å).

Солнечные вспышки происходят в атмосфере Солнца, в основном в активных областях, но иногда и между ними. Активные области расположены над областями концентрации магнитного потока, как правило многополярными, на поверхности Солнца. Часто на уровне видимой поверхности Солнца данные области содержат солнечное пятно, пору или их ансамбль (рис. 1). Сведения о магнитном поле в на-

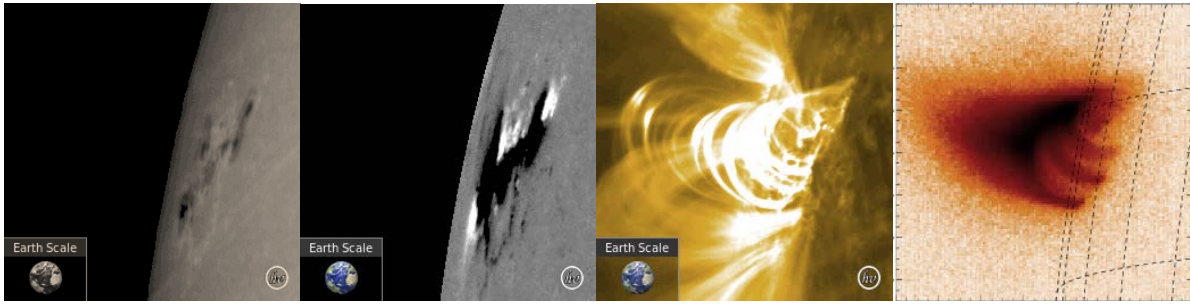


Рис. 1. Изображения активной области вспышечных петель на фазе спада вспышки SOL2013-05-14 в 04:20:00 UT в разных волновых диапазонах (слева направо): солнечные пятна на фотосфере (SDO/AIA 4500 Å), магнитограмма (SDO/HMI), КУФ-излучение (SDO/AIA 171 Å) и МР-излучение (Hinode) в 02:26:34 UT. Для построения изображений SDO использованы возможности интернет-ресурса [<https://legacy.helioviewer.org/>], МР-данные получены из интернет-архива [<http://sdc.uio.no/sdc/>]. (Цветную версию рисунка см. в электронной версии журнала)

стоящее время можно получить, используя, в частности, данные инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) [Scherrer et al., 2012]. В пятне магнитное поле достигает нескольких тысяч гаусс. В поре поле слабее — одна-две тысячи гаусс. Выходящее в верхнюю часть солнечной атмосферы — корону — магнитное поле заполняет весь доступный объем и приводит к структурированию плазмы, образуя петельные структуры, направленные вдоль магнитных силовых линий. Их характерные диаметры составляют десятки-сотни тысяч километров, а малые радиусы (радиусы сечения) — несколько тысяч километров.

В КУФ- и МР-диапазонах корональные петли наблюдаются как яркие арочные структуры (см. две правые панели рис. 1; для визуализации аркады использованы КУФ-данные инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту SDO и данные в МР-диапазоне спутника Hinode [Golub et al., 2007]). Магнитное поле в корональной части активной области составляет от нескольких единиц до нескольких сотен гаусс. Поведение плазмы над активными областями определяется в основном магнитным, а не газовым давлением. В частности, отношение β газового давления к магнитному является важным параметром плазменных систем. Над активными областями параметр β , как правило, не превышает 0.2 [Shibasaki, 2001; Wang et al., 2007].

Стандартная солнечная вспышка начинается с внезапного увеличения в КУФ-диапазоне яркости отдельных петель в активной области. В радио- и ЖР-диапазонах в это время наблюдается резкое, до нескольких порядков величины, повышение потока излучения — так называемая импульсная фаза вспышки. Как правило, источники ЖР-излучения локализованы в хромосфере, причем два источника располагаются по разные стороны от линии раздела полярностей (нейтральной линии) на поверхности Солнца (см. схематическое изображение солнечной вспышки на рис. 2) в областях с противоположной магнитной полярностью. Относительная площадь источников ЖР-излучения составляет десятую или сотую долю процента полной площади поверхности Солнца. Аналогичная морфология обычно наблюдается и в диапазоне H α , который ассоциируется с излу-

чением ионизированного водорода в хромосфере. В редких случаях в районах источников ЖР-излучения появляются уярчения в белом свете и гамма-излучении. Иногда с источниками ЖР-излучения и белого света совпадают источники излучения в среднем ИК-диапазоне [Penn et al., 2016]. В ряде случаев наблюдается третий источник ЖР-излучения в районе вершины вспышечной петли. В мощных вспышках часто наблюдаются сопряженные источники ЖР-излучения, перемещающиеся вдоль нейтральной линии с характерными скоростями несколько десятков километров в секунду [Bogachev et al., 2005; Reva et al., 2015]. В этом случае совокупность источников ЖР- и H α -излучения образует на хромосфере структуру с двумя локально параллельными «лентами», вытянутыми по обе стороны от нейтральной линии на расстоянии друг от друга несколько десятков тысяч километров. Подобные вспышки носят название двухленточных (two-ribbon flares). Совокупность корональных петель аркады соединяет хромосферные ленты (характерная высота также несколько десятков тысяч километров). Источники микроволнового радиоизлучения наблюдаются во вспышечной петле, в то время как всплески более длинноволнового радиоизлучения регистрируются выше, над активной областью. Динамические спектры вызванного вспышкой радиоизлучения содержат разнообразные тонкие структуры, называемые радиовсплесками. Длительность импульсной фазы вспышки составляет обычно от нескольких десятков секунд до нескольких минут [Benz, 2017].

Более длинным, до нескольких часов, оказывается временной интервал увеличенной яркости вспышечной области в КУФ- и МР-диапазонах. Как правило, максимум яркости в этих диапазонах достигается в конце импульсной фазы. Любопытно, что на фазе роста уровня излучения временная производная роста яркости МР-излучения напоминает сигнал, регистрируемый в радио- и ЖР-диапазонах (см. подробнее в подразделе 2.3). Данное явление называется эффектом Нойперта [Neupert, 1968]. Источники КУФ- и МР-излучения часто имеют форму петли или каспа (шлемовидная структура, рис. 1). Достигнув максимума, КУФ- и МР-излучение из вспышечной об-

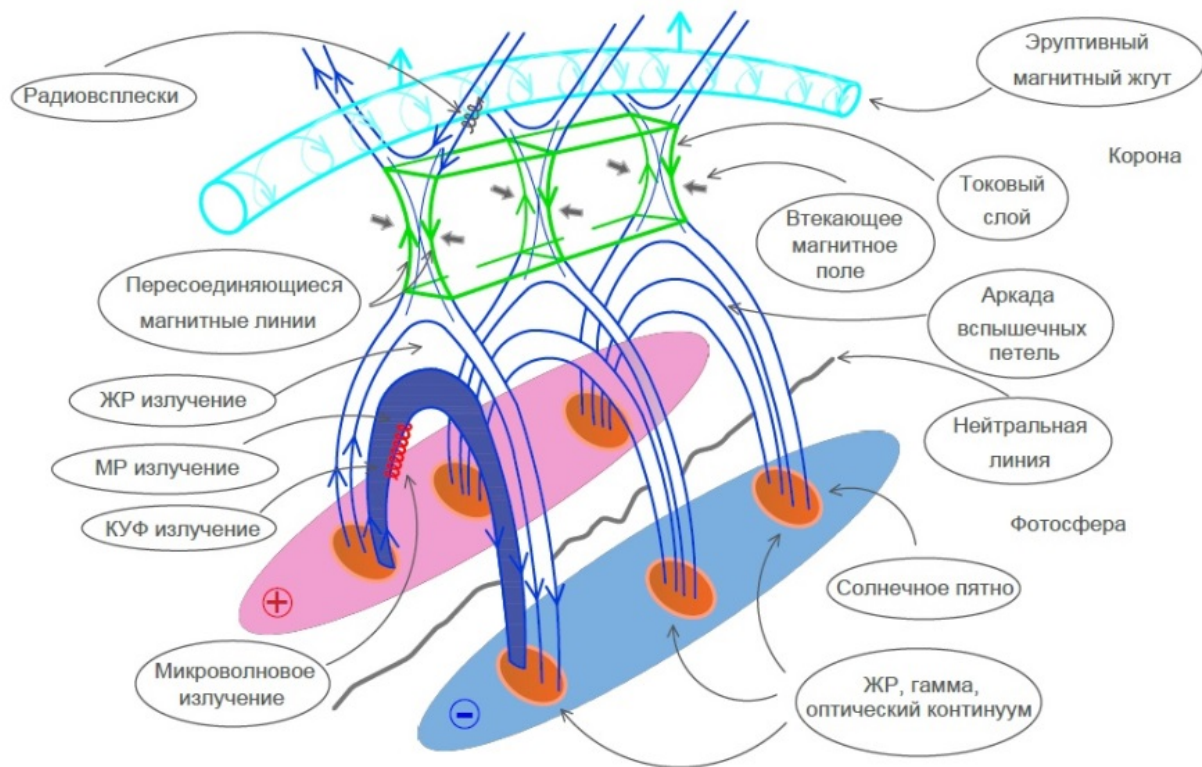


Рис. 2. Стандартная модель солнечной вспышки

ласти медленно и плавно спадает. Данный временной интервал продолжительностью от нескольких десятков минут до нескольких часов называется фазой спада.

Описанная картина является усредненной, и специфические проявления конкретной вспышки в различных диапазонах могут существенно отличаться от данного сценария. В частности, иногда наблюдаются «холодные» вспышки с крайне незначительным увеличением МР-излучения [Fleishman et al., 2011; Masuda et al., 2013; Lysenko et al., 2018], а также radio-quiet-вспышки, сопровождаемые лишь незначительным радиоизлучением [Benz et al., 2007]. Другим отклонением от данного обобщенного сценария являются упомянутые выше квазипериодические вариации потоков вспышечного излучения, регистрируемые на всех фазах вспышки во всех наблюдательных диапазонах.

Существуют несколько систем классификации солнечных вспышек. В настоящее время широко используется система, основанная на интенсивности МР-излучения в диапазоне 1–8 Å. Вспышки с интенсивностью больше 10^{-4} Вт/м² относятся к классу X, от 10^{-5} до 10^{-4} Вт/м² — к классу M, от 10^{-6} до 10^{-5} Вт/м² — к классу C и от 10^{-7} до 10^{-6} Вт/м² — к классу B. Вспышки класса B часто классифицируются как микровспышки. Другие классификации основаны на относительной площади и яркости H α -лент и на пиковом значении радиоизлучения на частоте 5 ГГц. Более полная информация о солнечных вспышках приводится в [Benz, 2017].

2.2. Стандартная модель солнечной вспышки

Стандартная модель солнечной вспышки (также известная как модель «Carmichael, Sturrock, Hirayama, Корр-Pneuman», CSHKP-модель), основанная на приведенных выше наблюдательных данных, схематично показана на рис. 2 (см. также рис. 22 и соответствующую веб-ссылку в [Hudson, 2016], где представлен архив (Flare Cartoon Archive) всех подобных схематичных иллюстраций солнечной вспышки, опубликованных в литературе с 1948 по 2012 г.). В этом подразделе мы дадим краткое описание CSHKP-модели с указанием основных физических механизмов и процессов.

На начальном (предвспышечном) этапе энергия магнитного поля, являющегося основным источником энерговыделения во вспышках, аккумулируется в активных областях короны в форме непотенциального поля. Такая магнитная конфигурация оказывается неустойчивой к произвольно малому возмущению параметров плазмы, вследствие чего инициируется процесс быстрого магнитного пересоединения, например, в токовом слое, формирующемся вслед за дестабилизированным всплывающим плазмойдом (эруптивным жгутом), что приводит к стремительному высвобождению свободной магнитной энергии. Пересоединяющийся токовый слой, как правило, ориентирован перпендикулярно к поверхности Солнца, аналогично хвосту земной магнитосферы. Освобожденная магнитная энергия в дальнейшем преобразуется во внутреннюю (тепловую) энергию плазмы, кинетиче-

скую энергию коллективных течений плазмы, таких как альфвеновские струи (джеты) или плазмиды, и в ускорение нетепловой популяции заряженных частиц до пиковых энергий от примерно 15–20 КэВ до десятков МэВ. Хотя процесс ускорения частиц на фоне магнитного пересоединения до сих пор не до конца изучен, именно с ним ассоциируют резкое увеличение нетеплового излучения активных областей: ЖР-, гамма- и радиоизлучения, а также других его видов, вызываемых электронными пучками, и, возможно, излучения в оптическом континууме (более детальное сравнение теплового и нетеплового излучения солнечных вспышек см. в подразделе 2.3). Ускоренные заряженные частицы движутся вдоль силовых линий магнитного поля, испуская гиротронное излучение в микроволновом диапазоне. Электроны с энергией 10–100 кэВ, движущиеся в направлении поверхности Солнца, высыпаются в более плотную плазму хромосферы, являющуюся для них так называемой толстой мишенью, в которой они теряют всю кинетическую энергию и генерируют электромагнитное тормозное ЖР-излучение (рис. 3). Ускоренные протоны, а также релятивистские электроны с энергиями более 100 кэВ, вероятно, могут проникнуть глубже, вплоть до нижней хромосферы и фотосферы, генерируя излучение в гамма-диапазоне (за счет ядерных процессов, таких как нейтронный захват, аннигиляция позитронов) и в белом свете (см. обсуждение механизмов формирования излучения в оптическом диапазоне в контексте солнечных и звездных вспышек соответственно, например, в [Heinzel, Kleint, 2014; Heinzel, Shibata, 2018]). В связи с тем, что число частиц, движущихся с релятивистскими скоростями, чаще всего мало, вспышки в гамма-диапазоне на Солнце наблюдаются достаточно редко. Возможно, по этой же причине редки и вспышки в белом свете. Высказывалось, однако, противоположное утверждение [Kretzschmar, 2011], что вспышки в белом свете сопровождают большинство вспышек на Солнце (если не все), включая слабые вспышки класса С.

В результате бомбардировки быстрыми частицами плотная плазма хромосферы нагревается до десятков миллионов кельвинов и испаряется вверх, в корону, в результате чего корональные магнитные петли заполняются горячей плазмой, находящейся в тепловом равновесии (здесь и далее мы будем называть ее «тепловой плазмой»). На этом этапе можно наблюдать появление ярких поствспышечных корональных петель, излучающих в мягком рентгеновском диапазоне (рис. 1). В свою очередь, нетепловые электроны, движущиеся вверх от области начального ускорения, взаимодействуют с окружающей тепловой плазмой, что ведет к формированию радиовсплесков различных типов [Mészárosóvá et al., 2009]. Представленная стандартная модель описывает процесс вспышки в нулевом приближении, поскольку не учитывает, в частности, трехмерную структуру областей наиболее мощного энерговыделения (см. обсуждение свойств двухленточных вспышек в подразделе 2.1). Попытка обобщения стандартной модели вспышки с учетом 3D-эффектов была предпринята, например, в работе [Aulanier et al., 2012].

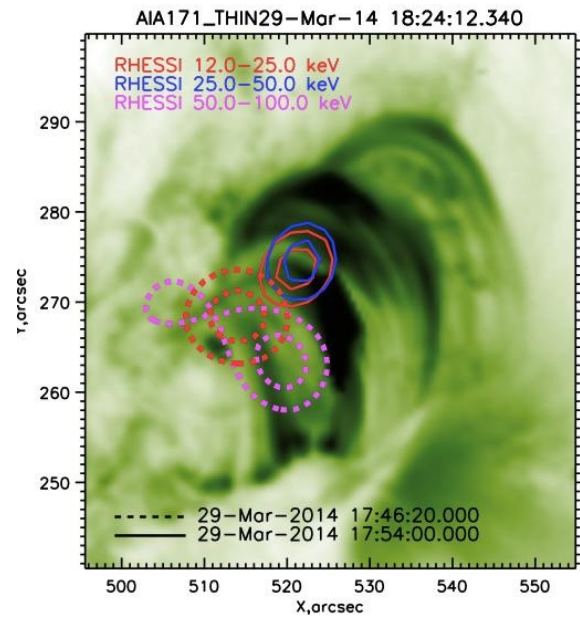


Рис. 3. Контуры источников ЖР- и МР-излучения во время импульсной фазы (штриховые линии) и фазы спада вспышки (сплошные линии), наложенные на КУФ-изображения SDO/AIA 171 Å

2.3. Тепловое и нетепловое излучение: механизмы генерации, наблюдения, диагностика

Природу излучения вспышечной плазмы в основном определяет распределение по скоростям и энергиям частиц, генерирующих данный вид излучения. Для описания распределения частиц используют различные функции, например, функцию Максвелла, степенные функции, κ - и η -распределения.

С электронами, имеющими максвелловское распределение по скоростям, т. е. находящимися в тепловом равновесии, связывают так называемое тепловое излучение. Генерация теплового излучения происходит в основном за счет тормозного механизма, а именно: кинетическая энергия, теряемая тепловыми свободными электронами в процессе кулоновских столкновений со свободными электронами и ионами плазмы, переходит в нагрев плазмы и в энергию излучения. Для того чтобы тепловое тормозное излучение в МР-диапазоне было существенным (регистрируемым), электроны должны обладать достаточно большой энергией — выше 0.1 кэВ (что соответствует температуре 1.2 МК).

Тормозной механизм является также одним из основных при генерации ЖР-излучения. Однако, поскольку энергия большинства электронов, генерирующих излучение в этой области спектра, определяется процессами ускорения и их распределение по скоростям (например, степенная функция) отличается от максвелловского, то форма спектра ЖР-излучения отличается от формы спектра МР-излучения. Такие электроны принято называть нетепловыми, а их излучение — нетепловым. В большинстве случаев излучение в диапазоне свыше 25–30 кэВ имеет нетепловую природу.

Таким образом, МР-излучение в диапазоне ниже 10 кэВ чаще всего связано с тепловыми процессами,

ЖР-излучение в диапазоне выше 30 кэВ — с нетепловыми. Область спектра 10–30 кэВ является переходной, где нетепловые и тепловые частицы вносят сопоставимый вклад в излучение. Для того чтобы надежно разделить тепловую и нетепловую компоненты, необходимо провести фитирование рентгеновских спектров с использованием по меньшей мере двух функций распределения электронов по скоростям — изотермической максвелловской и степенной [Hudson et al., 1978; Holman et al., 2003].

Заметим, что такая дифференциация между тепловой и нетепловой компонентами рентгеновского излучения не является строгой и универсальной. С одной стороны, в отдельных случаях электроны с распределением по скоростям, отличным от максвелловского (например, κ - и η -распределения [Battaglia et al., 2015; Dudik et al., 2011]), могут вносить вклад в область рентгеновского излучения до 20 кэВ. С другой стороны, сверхгорячая тепловая плазма может влиять на излучение в диапазоне 25–30 кэВ и выше [Caspi et al., 2010; Kashapova et al., 2013].

Самый распространенный способ диагностики тепловых процессов в плазме солнечных вспышек в настоящее время основан на анализе временных профилей МР-излучения, получаемых космическими аппаратами (КА) GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) в полосах 1–8 Å (1.5–12 кэВ) и 0.5–4 Å (3–25 кэВ). Для исследования нетеплового излучения широко используются данные российских и зарубежных КА, таких как «Конус-Винд» [Aptekar et al., 1995], Solar Neutron and Gamma rays (SONG) на борту КА Complex Orbital Observations in the Near-Earth space of the Activity of the Sun (CORONAS-F) [Kuznetsov et al., 2002]. Долгое время для исследования пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения использовался Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) [Lin et al., 2002].

Излучение в стандартных полосах КУФ, используемых при солнечных наблюдениях, является результатом или прямого нагрева, или остывания горячей плазмы. В большинстве случаев такое излучение имеет тепловую природу. Однако более надежным индикатором тепловой или нетепловой природы излучения этого спектрального диапазона остается рентгеновское излучение (см. выше). Оптическое (полоса 4500 Å), УФ (полосы 1600 Å, 1700 Å) и КУФ-излучение (304 Å), наблюдаемое на SDO/AIA, формируется на уровнях температурного минимума и хромосферы и также нуждается в предварительном анализе с помощью наблюдения в рентгеновском диапазоне. В ряде работ проводится фитирование спектров рентгеновского и КУФ-излучения, полученных на основе данных RHESSI и SDO/AIA, что позволяет охватить более широкий диапазон — от 0.1 кэВ до нескольких десятков кэВ [Battaglia et al., 2015].

Одним из механизмов, генерирующих микроволновое излучение солнечных вспышек, является гиросинхротронный (ГС) механизм (см. также рис. 5 и описание наблюдательных признаков ГС и других механизмов излучения в микроволновом диапазоне

в [<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/doc/manuale.pdf>]). Форма микроволнового ГС-спектра позволяет определить области оптически тонкого и оптически толстого излучения по частоте спектрального максимума. Источник излучения на частотах выше частоты спектрального максимума является оптически тонким. Отрицательный наклон спектра в этой области подчиняется степенному закону и определяется распределением энергии ускоренных электронов. Излучение на частотах ниже частоты спектрального максимума также связано с ускоренными электронами. Однако для излучения на этих частотах источник является оптически толстым, поэтому излучение выходит только из внешней области источника. Положительный наклон ГС-спектра в низкочастотной области определяется самопоглощением, приводящим к снижению интенсивности спектра с уменьшением частоты.

Для получения информации о спектре, временной и пространственной структуре микроволнового излучения в настоящее время используются такие инструменты, как Сибирский радиогелиограф – 48 (СРГ-48, изображения Солнца на пяти частотах в диапазоне 4–8 ГГц) [Лесовой и др., 2017], являющийся модернизацией Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ), и Сибирский солнечный радиоспектрополяриметр (ССРС, 4–8 ГГц и 2–24 ГГц), находящиеся в Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (урочище Бадары) [Zhdanov, Zandanov, 2015]; радиогелиограф (NoRH, изображения на 17 ГГц и 34 ГГц) и радиополяриметры (NoRP, 1–80 ГГц) обсерватории Нобеяма [Nakajima et al., 1980, 1985]; Радиоастрономический телескоп Академии наук (РАТАН-600, 0.610–35 ГГц, станция Зеленчукская) [Хайкин и др., 1972]; телескопы Radio Solar Telescope Network (RSTN).

Заметим, что в микроволновом диапазоне интенсивность гиросинхротронного и синхротронного излучения в солнечных вспышках определяется напряженностью магнитного поля, плотностью корональной плазмы (при наблюдении на низких частотах), а также показателем спектра, питч-углом и концентрацией нетепловых электронов [Dulk, Marsh, 1982]. Описанный в подразделе 2.1 эффект Нойперта связывает временные профили вспышечных сигналов в МР и ЖР (а также микроволновом) диапазонах, а следовательно профили теплового и нетеплового излучения, и является, по сути, индикатором прямой связи между ускорением электронов, приводящим к ЖР- и микроволновому излучению, и нагревом плазмы, излучающей в МР-диапазоне.

В конце этого раздела обратим внимание на приграничные волновые диапазоны ИК, субмиллиметрового и миллиметрового излучения, в которых исследования проводились в основном с целью уточнить модели распределения температур в хромосфере [см., например, Loukitcheva et al., 2004]. Первые наблюдения солнечных вспышек на суб-мм-волнах были получены в 1984 г. [Kaufmann et al., 1986]. С 2000 г. регулярно проводились наблюдения в суб-мм- и мм-диапазонах на Solar Submillimeter Telescope (SST). Первые данные о сол-

нечных вспышках в ИК-континууме получены позднее, в 2003 г. [Xu et al., 2004]. За последние два десятилетия популярность и актуальность наблюдений в этих диапазонах резко возросла в связи с вводом в эксплуатацию новой системы телескопов Atacama Large Millimeter Array (ALMA) [Wedemeyer et al., 2016]. Моделирование и наблюдения излучения ИК-континуума показывают, что оно является тепловым тормозным и обусловлено свободно-свободными столкновениями ионов хромосферы [Heinzel, Avrett, 2012; Trotter et al., 2015; Simões et al., 2015]. Механизмы суб-мм- и мм-излучения до конца не ясны. Излучение на импульсной фазе вспышек интерпретировалось на основе обратного эффекта Комптона [Kaufmann et al., 1986], прямого черенковского излучения ускоренных в хромосфере электронов [Fleishman, Kontar, 2010], когерентного плазменного механизма [Sakai et al., 2006; Zaitsev et al., 2014, 2016]. Если рассматривать суб-мм- и мм-диапазоны как продолжение микроволнового диапазона, то спектр приобретает N-образную форму, т. е. вслед за типичным спадом потока от частоты спектрального максимума в сторону больших частот наклон спектра опять становится положительным в суб-ТГц-области. С одной стороны, такое поведение спектра интерпретировалось как ГС-излучение электронов с энергией более 300 кэВ [Tsar et al., 2018] или как ГС-излучение из компактного источника с плотной плазмой, в условиях которого важную роль в формировании спектра играет эффект Разина [Silva et al., 2007]. С другой стороны, положительный наклон спектра может быть объяснен в рамках теплового тормозного излучения горячей плазмы вспышечных лент с температурой 10^4 – 10^6 К [Kontar et al., 2018].

2.4. Чем отличаются наблюдения солнечных и звездных вспышек?

Аналогично тому, как солнечные вспышки являются самыми мощными процессами импульсного энерговыделения в Солнечной системе, вспышки на активных звездах спектрального класса М (красные карлики) и звездах солнечного типа представляют собой один из наиболее высокоэнергетических процессов в их системах. Детектирование таких событий требует либо широких обзоров неба, либо длительного наблюдения отдельной звезды. Регистрируемые энергии звездных вспышек сравнимы или зачастую значительно выше энергий самых мощных солнечных вспышек, в то время как спектральные диапазоны, в которых видны звездные вспышки, достаточно широки — от радиоволн (регистрируемых, например, РАТАН-600 и другими радиотелескопами) и оптической области (КА Kepler и Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), а также наземная сеть телескопов Next-Generation Transit Survey) до ультрафиолета (КА Galaxy Evolution Explorer, GALEX) и рентгеновских лучей (ХММ-Newton). Важность изучения таких событий связана как минимум с двумя причинами: во-первых, влияние их высокоэнергетического излучения на потенциально жизнепригодные зоны соответствующих экзопланетных систем, а именно их роль в источе-

нии озонового слоя и диссипации атмосфер планет, а также воздействие на образование органических соединений (см. [Armstrong et al., 2016] и ссылки в этой статье); во-вторых, оценка вероятности таких событий на Солнце и их влияние на космическую погоду и жизнь на Земле.

При наблюдениях в белом свете солнечные и звездные вспышки обычно ассоциируются с усилением интегрального потока в оптическом континууме от области бальмеровского скачка до ближнего инфракрасного диапазона. Интенсивность потока белого света в звездных вспышках обычно изменяется от нескольких процентов до нескольких десятков процентов звездной величины у солнцеподобных звезд [Maehara et al., 2015] и на порядки величины у красных карликов [Gershberg, 2005]. Наиболее экстремальные звездные вспышки могут на несколько часов изменить блеск звезды на порядки величины. Более того, самые мощные события, произошедшие на относительно тусклой звезде с обычной светимостью за пределами чувствительности наблюдательного инструмента, могут сделать ее видимой на время вспышки. В свою очередь, на Солнце вспышки в белом свете лишь незначительно (около 0.01 %) увеличивают его общую светимость. Такая особенность солнечных вспышек в белом свете, в сочетании с относительно короткой продолжительностью (не более нескольких минут), усложняет их детектирование. Были предприняты многочисленные попытки детектирования увеличения спектральной мощности в оптической области в солнечных вспышках. Например, в нескольких недавних работах (см. [Kotrč et al., 2016] по наземным и [Heinzel, Kleint, 2014] по космическим спектрографическим наблюдениям) сообщалось о кратковременных локализованных увеличениях спектрального потока в оптическом континууме до 500 %, совпадающих по времени и положению с усилениями потока в других спектральных диапазонах. Оценка вариации полной яркости Солнца со временем в этих событиях показывает увеличение интенсивности оптического потока приблизительно на 0.1–0.5 %. С другой стороны, в большой доле спектрально-разрешенных наблюдений солнечных вспышек усиление спектральной мощности было значительно слабее [Lin, Hudson, 1976] или вообще не выявлялось [Švestka, 1966]. Таким образом, наблюдения солнечных вспышек в белом свете дают противоречивые результаты. Остается неясным, совпадают ли механизмы образования солнечных и звездных вспышек и, как следствие, можно ли отмасштабировать результаты наблюдений звездных вспышек до характерных значений солнечных вспышек. К примеру, оценка максимальной ожидаемой энергии вспышки в зависимости от размеров активной области (звездного пятна) была проведена в [Aulanier, 2013, рис. 4].

Огромная удаленность объектов относительно наземных и космических наблюдательных инструментов приводит к тому, что звездные вспышки детектируются как кратковременное увеличение интегральной яркости всего видимого диска звезды в выбранном электромагнитном диапазоне. Пространственно-разре-

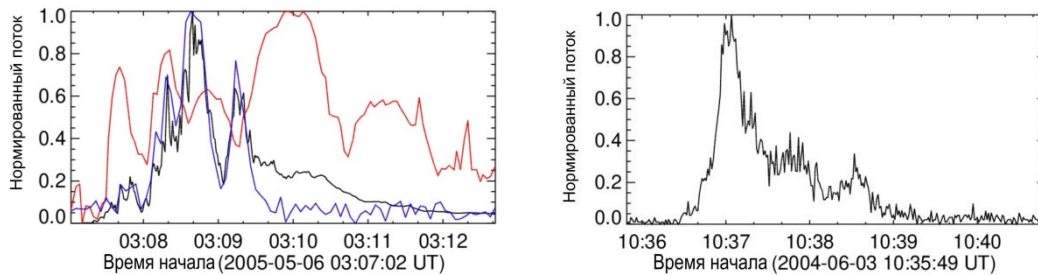


Рис. 4. Временные профили: левая панель — солнечной вспышки SOL2005-05-06T03:08:40 с КПП в микроволновом (34 ГГц, NoRH, черная кривая), жестком рентгеновском (100–300 кэВ, RHESSI, синяя кривая) и радиодиапазоне (32 МГц, RSTN, красная кривая) [Kupriyanova et al., 2016]; правая панель — звездной вспышки на красном карлике SDSS J144738.47+035312.1 с КПП в ближнем УФ-диапазоне по данным спутника GALEX [Doyle et al., 2018]

шенные наблюдения солнечных вспышек выгодно отличаются в этом аспекте, позволяя изучать не только интегральные кривые блеска вспышек, но и локализовать источники излучения и определить геометрию вспышечной области (см. описание двухленточных вспышек в подразделе 2.1). Заметим, что, помимо рутинных наблюдений солнечных корональных структур в коротковолновых диапазонах, холодные тусклые поствспышечные петли, расположенные над лимбом, наблюдаются также в белом свете [Saint-Hilaire et al., 2014]. Heinzel, Shibata [2018] использовали одно из наблюдений в белом свете для оценки вклада оптического излучения петель в общую светимость звездных вспышек. Таким образом, наличие пространственной информации имеет решающее значение для корректной интерпретации физических механизмов самой вспышки и параллельно протекающих процессов (см. раздел 5).

2.5. Супервспышки

Наиболее мощной вспышкой на Солнце за всю историю наблюдений считается так называемая Кэррингтоновская вспышка [Carrington, 1859] с полной энергией $\sim 10^{32}$ эрг. Среди «обычных» вспышек на звездах наблюдаются гораздо более мощные вспышки — так называемые супервспышки с полной энергией более 10^{33} эрг, что на порядки больше энергии всех наблюдавшихся солнечных вспышек. Типичными звездами, производящими вспышки, считаются красные карлики класса М. Тем не менее КА Kepler зарегистрировал более 1500 супервспышек с полной энергией 10^{33} – 10^{36} эрг на звездах класса G, т. е. на звездах солнечного типа [Shibayama et al., 2013]. Несмотря на то что число звезд, производящих супервспышки, составляет всего $\sim 0.1\%$ всех исследованных звезд [Maehara et al., 2012], возникает вопрос о вероятности возникновения супервспышки на Солнце. Shibayama et al. [2013] выявили эмпирическую зависимость частоты N возникновения вспышек на звездах от их энергии E , которая описывается степенной функцией $dN/dE \propto E^{-\alpha}$, $\alpha \approx 2$. Статистические исследования показывают аналогичную зависимость возникновения солнечных вспышек. Сопоставление статистических результатов для солнечных и звездных вспышек позволяет оценить

среднюю частоту появления вспышек на Солнце с энергией порядка 10^{34} – 10^{35} эрг (т. е. в 100–1000 раз более мощных, чем вспышка Кэррингтона) как одно событие в 800–5000 лет [Shibayama et al., 2013].

Вопрос возникновения супервспышки на Солнце становится более актуальным, если учесть, что вспышки на Солнце и звездах имеют сходный сценарий, о чем много говорилось в монографии [Gershberg, 2005]. Более того, недавно во многих супервспышках были выявлены затухающие квазипериодические пульсации, аналогичные пульсациям в солнечных вспышках [Pugh et al., 2015]. В работе [Cho et al., 2016] по 59 солнечным и 52 звездным вспышкам получено, что время затухания КПП и в тех, и в других связано с периодом колебания по одинаковому закону, а именно, характерное время затухания зависит линейно от периода колебаний. Это косвенно свидетельствует в пользу единой природы солнечных вспышек и супервспышек на звездах.

С другой стороны, анализ фотометрических измерений светимости звезд поздних спектральных классов показал, что пятна на звездах могут на порядки превышать солнечные пятна по площади и по напряженности магнитного поля [Gershberg, 2005], а следовательно, короны звезд являются хранилищем гораздо большего количества энергии, реализуемой впоследствии во вспышках, чем корона Солнца. Более того, звезды, производящие супервспышки, могут качественно отличаться от Солнца [Katsova et al., 2018]. Проведенное ранее моделирование динамомеханизма показало, что в случае, когда альфа-эффект имеет знак, обратный солнечному, должно наблюдаться резкое усиление магнитной активности звезды [Kitchatinov, Olemskoj, 2016].

2.6. Влияние вспышек на магнитосферу и верхние слои атмосферы Земли

Солнечные вспышки и корональные выбросы массы оказывают существенное влияние на состояние околоземного пространства, т. е. на космическую погоду и, как следствие, на здоровье космонавтов и экипажей и пассажиров высотных самолетов, на функционирование космических аппаратов и систем энергетики, связи и навигации, в частности GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Гло-

бальная навигационная спутниковая система). Например, упомянутая выше вспышка Кэррингтона в 1859 г. вызвала глобальные возмущения магнитного поля Земли и привела к сбою в работе телеграфа, а геомагнитная буря 13–14 марта 1989 г., вызванная солнечной вспышкой класса X4.5, привела к масштабным сбоям в энергосистеме канадской провинции Квебек (Квебекское событие). Поток энергичных частиц, генерируемых солнечными вспышками, является причиной возникновения наведенных токов в электрических цепях, особенно на высоких широтах, где магнитосфера не так хорошо защищает Землю от влияния космических лучей [Гуревич, 2016]. Совсем недавно, в сентябре 2017 г., самые мощные вспышки 24-го цикла солнечной активности привели к сбоям высокочастотных линий связи, что затруднило оказание помощи жителям островов у побережья Америки, пострадавшим от урагана Ирма [Frissell et al., 2019].

Hayes et al. [2017] выявили взаимосвязь КПП с характерным периодом порядка 20 мин в ионосферном слое D и пульсаций излучения солнечной вспышки в рентгеновском и КУФ-диапазонах. Было показано, что ионосфера Земли более чувствительна к мелкомасштабным изменениям потока солнечного МР-излучения, чем считалось ранее. Тем самым подтверждена тесная связь процессов в ионосфере Земли с мелкомасштабными изменениями солнечной активности.

3. КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ

Как было упомянуто выше, в солнечных вспышках наблюдаются повторяющиеся вариации потоков излучения, например изменяющиеся по гармоническому закону. Однако очевидно, что при наблюдениях солнечных вспышек невозможно встретить в точности гармонические сигналы, даже если они присутствуют. Инструментальные шумы, влияние ионосферы Земли, комплексная природа явлений на Солнце приводят к тому, что на практике мы имеем дело с такими отклонениями от гармонического сигнала, как всевозможные виды трендов, шумы различной природы, модуляция амплитуды и частоты сигнала как стохастическая, так и определенная неким физическим процессом (или процессами), сигналы в виде волновых пакетов, или цугов (wave trains). Все эти отклонения делают наблюдаемый сигнал не чисто периодическим, а квазипериодическим. Подобные вариации потока излучения называются квазипериодическими пульсациями (КПП). Кроме того, ряд механизмов (см. раздел 5) приводит к повторяющимся негармоническим или же к существенно модулированным сигналам, например в форме экспоненциально затухающей синусоиды.

3.1. Статистические свойства КПП

КПП присутствуют в излучении всего электромагнитного спектра, от радиоволн до гамма-лучей [Kane et al., 1983; Nakajima et al., 1983; Nakariakov et al., 2010a; Kupriyanova et al., 2010; Dolla et al., 2012; Su et al., 2012; Simões et al., 2015; Inglis et al., 2016]. Анализируя свойства сигнала в разных диапазонах,

а именно его амплитудные, частотные и фазовые характеристики, мы можем строить предположения относительно природы КПП [McLaughlin et al., 2018; Van Doorselaere et al., 2016; Nakariakov, Melnikov, 2009] (см. рис. 4 и раздел 5).

Статистические исследования показали, что КПП присутствуют как в нетепловом [Kupriyanova et al., 2010], так и в тепловом [Simões et al., 2015] излучении более 80 % исследованных солнечных вспышек. Тот факт, что КПП являются часто встречающейся или, возможно, даже неотъемлемой особенностью вспышечного энерговыделения, стимулирует интерес к наблюдениям данного явления и его теоретическому моделированию. В частности, достигнуто понимание того, что КПП необходимо включить в общую модель солнечной вспышки, что, несомненно, повысит надежность предсказания экстремальных событий космической погоды, а также позволит приблизиться к пониманию фундаментальных процессов плазменной астрофизики, таких как магнитное пересоединение и ускорение заряженных частиц.

Характерные периоды наблюдаемых КПП варьируются от долей секунды до десятков минут. Такие значения периодов связаны с физическими процессами, вызывающими КПП, однако необходимо также принимать во внимание особенности наблюдений. С одной стороны, временное разрешение ряда астрономических инструментов не позволяет выделять характерные периоды короче нескольких секунд. Наилучшим временным разрешением обладают инструменты в радиодиапазоне, где доступна регистрация изображений Солнца с шагом 0.1 с (например, NoRH). С другой стороны, небольшая продолжительность большинства вспышек ограничивает интервал со стороны длинных периодов величиной порядка нескольких минут.

Статистические исследования добротности КПП, т. е. числа циклов (периодов) осцилляций, и ее связи с периодом КПП, основанные на событиях, произошедших в одной и той же вспышечной области [Pugh et al., 2017b], показали, что типичная длительность КПП составляет всего несколько (2–10) циклов колебаний [Nakariakov et al., 2019]. Кроме того, показано полное отсутствие зависимости среднего значения периода КПП от количества циклов КПП. Эти статистические свойства, присущие КПП в солнечных вспышках, должны учитываться при их детектировании и анализе.

3.2. Виды КПП

В основу классификации КПП может быть положена их нестационарность, а именно характерные вариации во времени амплитуды и периода, а также характерная временная структура сигнала. Например, среди прочих выделяются два характерных класса КПП: затухающие квазигармонические осцилляции и треугольные сигналы (т. е. колебания, каждый период которых имеет симметричную треугольную форму) [Nakariakov et al., 2019]. В частности, необходимо уделить особое внимание нестационарным свойствам КПП потому, что в характере

нестационарности заключена дополнительная сейсмологическая информация (см. подробнее в подразделе 3.3).

КПП наблюдаются на всех фазах солнечных вспышек. В ряде случаев КПП были зарегистрированы на импульсной фазе и фазе спада [Van Doorselaere et al., 2011; Dolla et al., 2012; Simões et al., 2015; Kupriyanova, Ratcliffe, 2015]. В других случаях КПП наблюдались только на импульсной фазе [Jakimiec, Tomczak, 2012] либо только на фазе спада [Kim et al., 2012]. Разные типы КПП ассоциируются с разными фазами солнечных вспышек. Например, КПП на импульсной фазе чаще характеризуются большой глубиной модуляции интенсивности излучения, иногда больше 80 % [Kupriyanova et al., 2016]. КПП на фазе спада часто проявляются в виде затухающих квазигармонических сигналов [Kupriyanova, Ratcliffe, 2016; Kim et al., 2012]. Для данного класса КПП время затухания сигнала пропорционально периоду осцилляций, причем эта пропорция верна и для солнечных, и для звездных вспышек [Cho et al., 2016].

Часто наблюдаются мультипериодические КПП, состоящие из нескольких периодических компонент (мод) с разными периодами [Inglis, Nakariakov, 2009]. Заметим, что каждая отдельная мода может относиться к разным типам КПП. С другой стороны, треугольные сигналы могут являться как результатом суперпозиции нескольких мод (рис. 5 и [Kolotkov et al., 2015]), так и свидетельствовать о нелинейных процессах во вспышечной плазме [Dubinov, Kolotkov, 2018]. Мультипериодические КПП могут служить хорошим инструментом диагностики плазмы [Inglis et al., 2009; Guo et al., 2016].

3.3. Нестационарные свойства КПП

В большинстве случаев период найденных КПП остается почти постоянным. Однако в последнее время стали появляться свидетельства присутствия в солнечных вспышках КПП с нестационарными, т. е. заметно меняющимися во времени, параметрами. Так, Kupriyanova et al. [2010] отметили наличие дрейфа периода между 20 и 60 с в микроволновом излучении нескольких солнечных вспышек, при этом в одних событиях период увеличивался, а в других — уменьшался. Дрейф периода от 2.5 до 5 мин был отмечен в микроволновом и ЖР-излучении [Reznikova, Shibasaki, 2011], а также в КУФ-излучении [Hayes et al., 2016], в том числе и в серии самых мощных вспышек 24-го цикла в сентябре 2017 г. [Kolotkov et al., 2018; Hayes et al., 2019]. Другим примером служат сигналы в форме волновых пакетов — локализованных во времени и пространстве амплитудно-модулированных и часто широкополосных колебаний [Mészárosová et al., 2009]. Наблюдаемая нестационарность параметров КПП может быть обусловлена, во-первых, последовательностью (либо суперпозицией) независимых физических процессов во вспышечной области и, во-вторых, динамикой физических и геометрических параметров вспышечной области, например параметров магнитогидродинамического (МГД) резонатора (см. подробнее в разделе 5).

Примером первого сценария может служить модуляция вспышечного излучения во вспышечной петле несколькими МГД-модами, действующими последовательно или параллельно [Inglis, Nakariakov, 2009], либо взаимодействие эруптивного волокна с аркадой петель. Поднимаясь, волокно последовательно вызывает пересоединения отдельных петель аркады, что, в частности, приводит к ускорению частиц, высыпанию их в хромосферу и к возникновению источников ЖР-излучения. Наблюдаемое перемещение источников ЖР-излучения связано не с физическим перемещением одного и того же источника вдоль поверхности Солнца, а с возникновением нового ЖР-источника в новом месте. Пульсации, наблюдаемые при этом в кривых блеска ЖР-излучения, отражают отдельные последовательные акты высыпания ускоренных частиц в хромосферу [Kuznetsov et al., 2016]. Похожие КПП в ЖР-излучении были ранее найдены в работе [Reznikova, Shibasaki, 2011], однако триггером магнитного пересоединения считалась медленная МГД-мода (см. подробнее подразделы 5.1 и 5.3). Отметим, что характерными особенностями упомянутых КПП являлись меняющийся временной интервал между отдельными импульсами, треугольная форма отдельного импульса, большая глубина модуляции и случайная модуляция амплитуды.

Ярким примером второго сценария, т. е. нестационарности, связанной с изменением параметров МГД-резонатора, являются затухающие квазигармонические КПП с периодом, уменьшающимся приблизительно от 90 до 50 с [Kolotkov et al., 2015]. По наблюдаемым параметрам вспышечной области и значению периода колебаний данная мода была ассоциирована с изгибными колебаниями вспышечной петли (см. подраздел 5.1, где детально описаны механизмы КПП). Позднее в работе [Pascoe et al., 2017] была обнаружена прямая зависимость между уменьшением длины петли и сокращением периода изгибных колебаний. Аналогично увеличение периода КПП может быть связано с увеличением длины вспышечной петли [Hayes et al., 2016].

4. МЕТОДЫ ПОИСКА И АНАЛИЗА КПП

Поиск и анализ КПП традиционно осуществляются методами, основанными на преобразовании Фурье, в частности, с бегущим окном [Reznikova et al., 2005], на вейвлет-анализе [Torrence, Compo, 1998], преобразованиях Гильберта [Huang et al., 1998] и Вигнера — Вилля [Kislyakov et al., 2006]. Данные методы предполагают, что сигнал имеет гармоническую форму, возможно, с модулированными амплитудой и периодом (см. также использование метода Крылова — Боголюбова в работе [Nagovitsyn, 1997]). Наилучшим образом подобные методы работают в случае узкополосного сигнала, существующего во время всей вспышки или, по крайней мере, содержащего достаточно большое количество циклов колебаний.

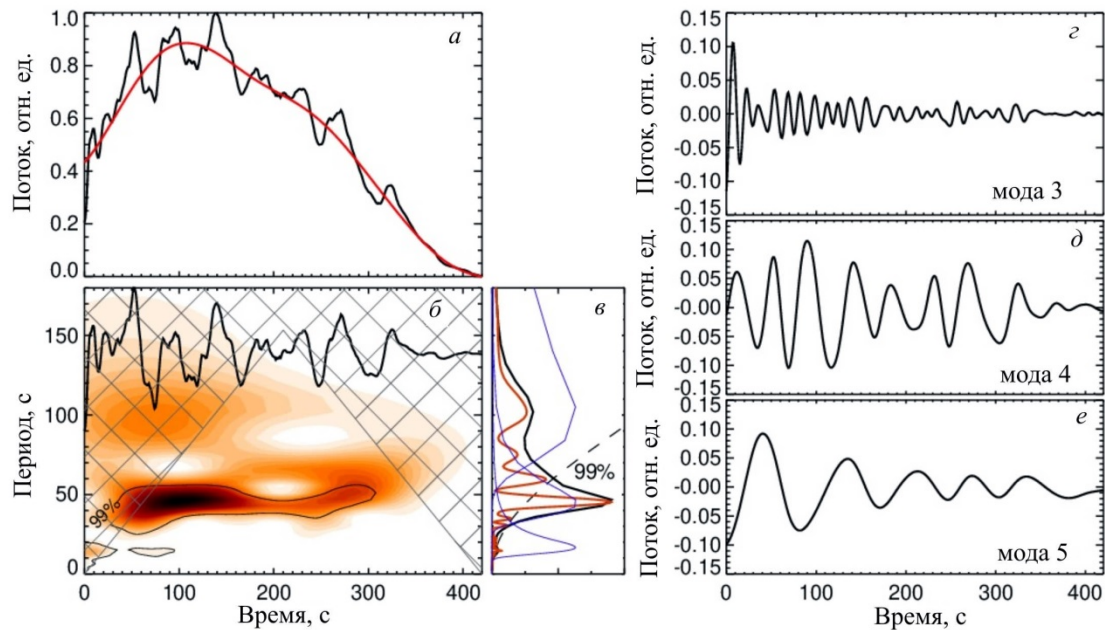


Рис. 5. Результаты анализа периодических свойств микроволнового излучения солнечной вспышки SOL2013-05-14T01:11 по данным NoRH на частоте 17 ГГц: *a* — временной профиль сигнала (черная кривая), демонстрирующий треугольные профили отдельных пульсаций, и наложенный на него тренд (красная кривая), полученный методом EMD; *б* — высокочастотная компонента сигнала после вычитания тренда (черная кривая), наложенная на ее вейвлет-спектр (оттенки красного), тонкими черными контурами показан уровень значимости 99 %; *в* — глобальный вейвлет-спектр (черная кривая), полученный интегрированием вейвлет-спектра по времени, и соответствующий фурье-спектр (красная кривая), синие кривые — три гауссовых фильтра, применение которых к фурье-спектру с последующим обратным фурье-преобразованием дает наилучшее соответствие EMD-модам, приведенным на панелях *z*, *д*, *e*; *z*, *д*, *e* — временные профили трех значимых EMD-мод с периодами около 15 и 45 с и уменьшающимся периодом приблизительно от 90 до 50 с соответственно

4.1. Фурье-анализ полного ряда с трендом

Как видно из рис. 4 и 5, *a*, полный временной профиль вспышки состоит из медленно меняющегося низкочастотного тренда (в данном случае выделенного с помощью метода разложения по эмпирическим модам (EMD)), квазипериодического сигнала, часто представляющего собой суперпозицию нескольких периодических компонент, высокочастотного (белого) и коррелированного (цветного) шумов. Для последнего спектральная мощность распределена по степенному закону с показателем степени, определяющим уровень корреляции шума, т. е. его «цвет». Одним из методов выделения периодических компонент является построение фурье-спектра временного ряда. Заметим, что данный метод достоверно выделяет только те сигналы, период которых остается постоянным либо меняется очень незначительно на протяжении всего исследуемого интервала. При наличии заметных вариаций периода со временем или в случае чрезвычайно низкой добротности колебательной системы метод не позволяет выделить сигнал на фоне шума.

Фурье-спектр полного временного профиля вспышки представляет собой степенную функцию, где низкочастотный тренд имеет максимальную спектральную мощность, а высокочастотный шум — минимальную. В качестве частного случая рассматривают степенной спектр с изломом, имеющий разные наклоны (разные показатели степени) в низко-

частотной и высокочастотной частях [Pugh et al., 2017b]. Уровень шума, или уровень значимости спектральных пиков, определяется по критерию χ^2 [Vaughan, 2005; Pugh et al., 2017a]. При этом цветность шума определяется эмпирически — как наклон фурье-спектра. Однако следует иметь в виду, что неотфильтрованный низкочастотный тренд вспышки также может оказывать влияние на наклон спектра (см. обсуждение в подразделе 4.2). Неоспоримым преимуществом метода является высокая достоверность найденных периодичностей: положительное детектирование периодичности означает ее статистическую значимость по сравнению как с фоновыми шумовыми процессами, так и с низкочастотной подложкой сигнала. Другими словами, спектральные пики, мощность которых превышает уровень значимости, с большой степенью вероятности являются истинными, т. е. имеют нешумовую природу. Недостатком данного метода является то, что при подобной оценке уровня значимости найдется не все периодические компоненты, присутствующие в сигнале. Иными словами, не все пики со спектральной мощностью ниже уровня значимости являются ложными. Для того чтобы решить эту проблему, необходимо проанализировать только высокочастотную компоненту сигнала, без тренда. Выделить высокочастотную компоненту можно двумя способами: вычитая из исследуемого сигнала предварительно найденный тренд (детрендинг, см. подраз-

дел 4.2) либо выделяя высокочастотную компоненту прямыми методами (см. подраздел 4.3).

4.2. Проблема тренда и методы его определения

Исследование 8100 вспышек, наблюдаемых в белом свете на звезде GJ 1243 спектрального класса M, показало, что примерно 15 % из них имеют временные профили характерной «элементарной» формы — резкий рост сигнала и постепенный спад, имеющий форму экспоненты с изломом [Davenport et al., 2014]. Gryciuk et al. [2017] предложили аналитическую модель мягкого рентгеновского излучения «элементарной» солнечной вспышки. Эта модель создана в предположении, что рост энергии является гауссовой функцией времени, а релаксация энергии — экспоненциальной. Особого внимания заслуживает результат, полученный в статье [Nakariakov et al., 2019], согласно которому наклон фурье-спектра мощности от аналитической модели тренда [Gryciuk et al., 2017] может хорошо совпадать с наклоном спектра красного шума. Данное обстоятельство затрудняет определение истинной причины наклона фурье-спектра — влияние тренда или влияние цветного шума, описанного в подразделе 4.1.

Определение тренда само по себе является нетривиальной задачей и требует аккуратного подхода. Неправильно определенный тренд не только может привести к появлению ложных пиков в частотном спектре сигнала, но и влияет на оценку статистической значимости. Из-за этого в ряде недавних исследований процедура детрендинга не проводилась вообще [Dominique et al., 2018; Inglis et al., 2016; Pugh et al., 2017a]. В то же время тренд оказывает значительное влияние на форму спектра мощности [Kolotkov et al., 2018], из-за чего становится значительно труднее обнаружить истинные КПП [Pugh et al., 2017a], поэтому задача убрать тренд из временных профилей все же актуальна.

Существует несколько способов определения тренда. В идеальном случае мы знаем физический процесс, определяющий тренд, и знаем его аналитическую форму (к примеру, экспоненциальный спад излучения на фазе релаксации вспышки). В этом случае параметры тренда определяются, например, методом наименьших квадратов. Однако в большинстве случаев аналитический вид тренда определить невозможно. Большинство солнечных вспышек имеют сложную форму тренда, особенно в нетепловом излучении.

В случае когда аналитическая форма тренда неизвестна, можно использовать различные процедуры, сглаживающие сигнал внутри временного окна заданной ширины. Такое сглаживание может быть реализовано в IDL с помощью процедур SMOOTH.pro или SAVGOL.pro или в любой другой программной оболочке с аналогичными функциями. Сглаживание временного профиля в автоматическом режиме может приводить к появлению ложных пиков на пери-

одограмме Фурье или к искусственному подавлению истинных пиков, однако при ручной обработке временных профилей (подбор ширины сглаживающего окна) и визуальном контроле количество ложных пиков уменьшается. В качестве тренда также можно использовать наиболее долгопериодическую моду (или моды), полученную методом EMD (см. подраздел 4.4 и ссылки там).

4.3. Прямые методы выделения высокочастотной компоненты

К прямым методам выделения высокочастотной компоненты, в частности, относится фурье-фильтрация [Inglis, Nakariakov, 2009]. Процедура фильтрации состоит из нескольких этапов. Вначале строится фурье-спектр полного ряда. К полученному фурье-спектру применяется узкополосный фильтр в форме, например, гауссианы, оставляющий значимым спектр внутри фильтра и обнуляющий спектральную мощность вне фильтра. Затем временной ряд восстанавливается путем обратного преобразования Фурье фильтрованного фурье-спектра. В результате получается временной ряд, в котором присутствуют интересные нас частоты, заданные шириной спектрального фильтра. Отсекая высокочастотный шум, метод увеличивает мощность периодической компоненты, однако применение слишком узкополосного фурье-фильтра приведет к появлению ложного пика на периодограмме. Заметим, что метод фурье-фильтрации также подвержен влиянию тренда. Дело в том, что наличие тренда, помимо появления пика в низкочастотной области периодограммы, еще и меняет наклон всего спектра (см. подраздел 4.2). Поэтому даже внутри фильтра, выбираемого в высокочастотной области фурье-спектра, мощности спектральных пиков будут искажены из-за наличия тренда.

Аналогичным образом можно использовать вейвлет-фильтрацию, применяя фильтр к вейвлет-спектру [Dolla et al., 2012].

4.4. Вейвлет- и EMD-анализ КПП с нестационарными параметрами

Известно, что реализация стандартного метода в версии часто используемого в физике Солнца программного пакета [Torgence, Compo, 1998] существенно завышает статистическую значимость КПП сигнала в случае сравнения со спектром белого шума. Более реалистичная оценка значимости КПП может быть получена с использованием красного шума, что также предусматривается стандартным пакетом. Стандартные методы, основанные на преобразовании Фурье, раскладывают сигнал по базовым функциям, которые сами по себе являются периодическими. Свертка ангармонического сигнала с периодической базовой функцией может привести к появлению ложных пиков на периодограмме или в вейвлет-спектре. Поэтому необходим новый подход к проблеме анализа КПП с нестационарными параметрами.

Недавно введенный метод EMD (Empirical Mode Decomposition) принципиально отличается от вышеописанных методов тем, что не предполагает *a priori* никаких базовых функций [Huang, Wu, 2008]. Метод EMD анализирует временные масштабы самого ряда, выделяя общие временные масштабы во внутреннюю эмпирическую моду. Методом итераций выделяются моды разных временных масштабов, от низкочастотного тренда до высокочастотного шума. Это, в частности, может быть использовано для эффективного детрендинга анализируемого сигнала (см. [Nakariakov et al., 2010b; Cho et al., 2016] в случае солнечных и звездных КПП, а также [Hnat et al., 2016] в случае магнитосферных пульсаций). Каждая из мод, по сути, представляет нестационарный и ангармонический колебательный сигнал. По этой причине метод EMD наилучшим образом подходит для анализа нестационарных колебаний. Несмотря на то, что метод EMD уже применялся для изучения нестационарных свойств КПП [Nakariakov et al., 2016], полномасштабное применение данного метода требует более глубокого понимания его свойств и недостатков. В частности, существенный шаг вперед в использовании метода EMD для анализа зашумленных наблюдательных сигналов был сделан в работе [Kolotkov et al., 2016a], где было показано, что не все внутренние EMD-моды обязательно представляют собой статистически значимый колебательный процесс. Таким образом, оценка значимости EMD-мод, например через аппроксимацию формы спектра степенной функцией и построение доверительных интервалов, должна рассматриваться как необходимая и неотъемлемая составляющая метода.

Подытоживая написанное в разделе 4, отметим, что на данный момент общепринятого рецепта автоматического детектирования КПП во вспышечных кривых блеска не существует. Описанные выше подходы объединяет необходимость оценки статистической значимости найденных периодичностей по сравнению с фоновым шумом. Несмотря на существенный прогресс в этом направлении, вопрос детектирования статистически значимых КПП остается открытым (см., например, наиболее свежий обзор различных современных методов детектирования КПП во вспышках в работе [Broomhall et al., 2019]). На данном этапе для достижения надежности детектирования КПП необходимо осуществлять визуальный контроль промежуточных результатов и сопоставлять результаты, полученные разными методами.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КПП

Поскольку характерные периоды КПП — от долей секунд до нескольких десятков минут — совпадают с характерными периодами МГД-волн в атмосфере Солнца, естественно предположить наличие связи КПП с МГД-колебаниями. Например, характерное время пробега медленной магнитозвуковой (ММЗ) волны между основаниями корональной петли составляет (в зависимости от температуры плазмы и длины петли) от нескольких минут до не-

скольких десятков минут. Аналогичное время для быстрой магнитозвуковой (БМЗ) и альфвеновской волн составляет минуты. Те же волны пересекают петлю поперек за несколько секунд или быстрее.

Современное понимание механизмов, ответственных за появление КПП во временных профилях вспышечного излучения, разделяет их на три категории: механизмы, основанные на непосредственной модуляции излучающей плазмы МГД-колебаниями; механизмы, в которых МГД-волны осуществляют модуляцию эффективности энерговыделения (например, периодически индуцируемое магнитное пересоединение), ускорения заряженных частиц и их кинематических параметров; и механизмы, основанные на спонтанном квазипериодическом энерговыделении. Несколько наиболее широко известных механизмов КПП показаны на рис. 6.

5.1. Собственные моды осцилляций магнитной трубки

Первые модели КПП были основаны на рассмотрении собственных МГД-колебаний корональной петли. Моделируя петлю в виде прямого плазменного цилиндра, окруженного плазмой с другими свойствами, Зайцев, Степанов [1975] вывели дисперсионные уравнения, описывающие свойства МГД-мод в данной системе. В дальнейшем было дано обобщенное описание собственных МГД-колебаний корональной петли [например, Edwin, Roberts, 1983]. В случае плазменной петли граничные условия на ее основаниях приводят к образованию стоячих волн с фиксированной длиной волны в направлении вдоль поля (цилиндра). Как в любом трехмерном резонаторе, МГД-моды характеризуются набором трех волновых чисел. Продольный номер моды определяется количеством полуволн в пространственной структуре возмущения вдоль цилиндра. Радиальный номер моды описывает количество нулей в радиальной структуре возмущения, например, радиальной компоненты скорости плазмы. Азимутальный номер моды описывает азимутальную симметрию возмущения. Основные свойства МГД-мод определяются азимутальным номером m . Радиальная в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра, структура возмущения внутри цилиндра может быть осциллирующей (объемные моды) либо экспоненциально спадающей от границы к оси цилиндра (поверхностные моды). Во внешней среде радиальная структура возмущения может быть экспоненциально прижатой к оси цилиндра (захваченные моды, trapped) либо убегающей от цилиндра (вытекающие моды, leaky). Для обозначения этих мод используются также термины «неизлучающие» и «излучающие» моды. Характерные скорости МГД-мод определяются значениями внутри и снаружи цилиндра скорости звука $C_s = \sqrt{\gamma k_B T / m}$ и альфвеновской скорости $C_A = B / \sqrt{\mu \rho}$, где γ — показатель адиабаты, k_B — постоянная Больцмана; T — температура плазмы; m — средняя масса частиц, равная 0.6 массы протона (с учетом присутствия малой доли ионов

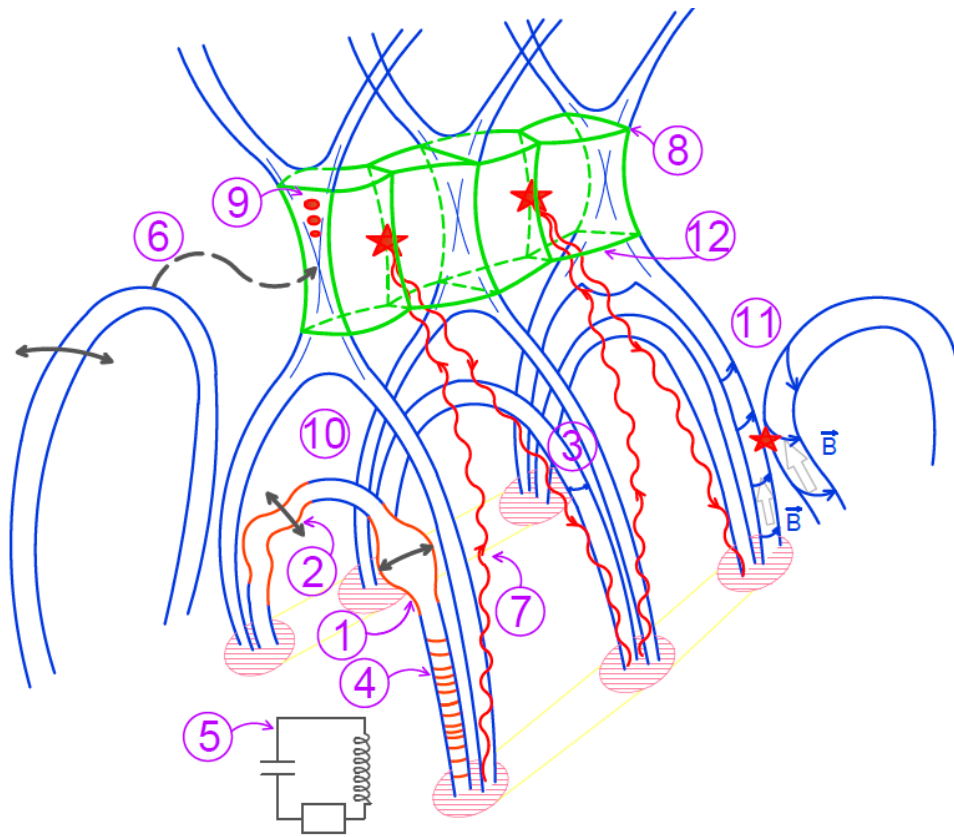


Рис. 6. Механизмы генерации КПП. Числа соответствуют номерам механизмов в тексте

гелия в короне); B — магнитная индукция; ρ — плотность плазмы и μ — магнитная проницаемость.

Как правило, в корональной петле альфвеновские скорости превышают скорости звука на порядок. Альфвеновская скорость снаружи превышает альфвеновскую скорость внутри цилиндра.

Выделяются несколько наиболее важных типов мод. Сосисочная (радиальная, или мода типа перетяжек, или перистальтическая, $m = 0$) мода представляет собой осесимметричные колебания границ цилиндра, сопровождаемые вариациями плотности плазмы и магнитного поля и, в плазме с низким значением параметра β , в основном радиальными течениями плазмы (см. рис. 6, механизм 1). В плазме с конечными значениями параметра β сосисочная мода также индуцирует продольные течения плазмы. Tsap et al. [2011] заключили, что продольные и радиальные течения в данной моде сдвинуты по фазе на $\pi/2$ относительно друг друга. В случае продольных длин волн порядка или короче диаметра цилиндра период сосисочной моды определяется отношением продольной длины волны к разности между значениями альфвеновской скорости внутри и снаружи петли, причем с уменьшением продольной длины волны данная разница по величине стремится к альфвеновской скорости внутри петли [Nakariakov et al., 2012]. В длинноволновом пределе период сосисочных колебаний определяется отношением малого радиуса петли (диаметр цилиндра) к альфвеновской скорости внутри

петли [Kopylova et al., 2007]. Типичные периоды сосисочных мод корональных петель составляют от долей секунды до десятков секунд.

Изгибная мода ($|m| = 1$), или кинк-мода, характеризуется поперечными колебаниями оси цилиндра и, соответственно, направления магнитного поля петли (рис. 6, механизм 2). При этом смещение оси цилиндра может иметь как линейную (в частности, горизонтальную или вертикальную), так и круговую или эллиптическую поляризацию. В длинноволновом режиме плотность плазмы при этом практически не меняется. Несмотря на то, что данная мода может рассматриваться как аналог колебания струны, ее не следует путать с альфвеновской модой. Изгибная мода является модифицированной БМЗ-модой, поскольку с уменьшением отношения длины волны к диаметру цилиндра она становится все более сжимающей, иными словами, возмущение плотности плазмы становится существенным. Период изгибных мод определяется отношением продольной длины волны к изгибной скорости,

$$C_K = \left(\frac{\rho_0 C_{A0}^2 + \rho_e C_{Ae}^2}{\rho_0 + \rho_e} \right)^{1/2},$$

определяемой плотностями плазмы и значениями альфвеновских скоростей внутри (индекс «0») и снаружи (индекс «e») плазменного цилиндра [Ryutov, Ryutova, 1976]. Типичные периоды изгибных мод корональных петель составляют несколько минут.

В плазменном цилиндре с прямым магнитным полем настоящей альфвеновской волной является крутильная волна, для которой характерно периодическое закручивание и раскручиванием цилиндра (рис. 6, механизм 3, см. [Van Doorsselaere et al., 2008]). Поскольку закрученная компонента магнитного поля связана с электрическим током вдоль оси цилиндра, данная мода может рассматриваться как переменный ток, протекающий по петле. Период крутильных волн определяется отношением продольной длины волны к альфвеновской скорости внутри цилиндра. Типичные периоды крутильных волн корональных петель близки к периодам изгибных мод. В отличие от сосисочных и изгибных мод, радиальная структура возмущений в крутильных волнах определяется только начальными условиями и может быть любой, что может приводить к перемешиванию (в радиальном направлении) фаз колебаний. Таким образом, крутильные волны не являются коллективными, и их свойства могут существенно различаться на соседних цилиндрических магнитных поверхностях. Коллективность специфической моды подразумевает связанность колебаний соседних слоев цилиндра (весь цилиндр осциллирует как целое), характерную для магнитозвуковых мод и отсутствующую для крутильной моды.

Продольная, или акустическая (медленная), мода характеризуется в основном продольными течениями плазмы вдоль оси магнитного поля цилиндра (рис. 6, механизм 4). При малых значениях параметра β данная мода хорошо описывается одномерными уравнениями акустики (иными словами, уравнениями для плоских звуковых волн). В то же время данные колебания не являются плоскими, поскольку их продольная длина волны, определяемая длиной цилиндра, значительно превосходит поперечную длину волны, определяемую диаметром цилиндра, что является важным в случае конечных значений параметра β . В данном случае фазовая скорость медленных мод близка к так называемой трубочной, или касповой, скорости $C_T = \frac{C_S C_A}{\sqrt{C_S^2 + C_A^2}}$. В пределе

$\beta \rightarrow 0$ трубочная скорость вырождается в скорость звука (приближение бесконечного магнитного поля). Возмущения магнитного поля и диаметра цилиндра для данной моды также определяются величиной параметра β , и для малых β данная мода практически не возмущает магнитное поле. Период медленных мод определяется отношением продольной длины волны к звуковой или трубочной скорости. Типичные периоды медленных мод корональных петель составляют от нескольких минут до нескольких десятков минут.

Прямая модуляция вспышечного излучения МГД-модами зависит от конкретного механизма излучения. Например, в случае оптически тонкого теплового излучения, определяемого температурой плазмы и квадратом плотности плазмы вдоль луча зрения, температура и плотность плазмы модулируются как ММЗ-, так и БМЗ-модами. Кроме того, наблюдаемая толщина петли и, соответственно, количество плазмы вдоль луча зрения модулируются и

сосисочными, и изгибными модами. В данном случае периоды и амплитуды КПП определяются периодами и амплитудами МГД-мод. Очевидно, что данный механизм легко объясняет КПП с малой относительной амплитудой (глубиной модуляции). Однако возникают трудности при интерпретации КПП с глубокой модуляцией излучения.

Помимо этого, в присутствии в осциллирующей петле нетепловых электронов модуляция электронной плазменной частоты и гирочастот, вызванная соответствующим возмущением плотности плазмы и магнитного поля в МГД-волне, может вызывать модуляцию некогерентного нетеплового излучения, например, за счет ГС-механизма [Kopylova et al., 2002]. Изгибные и крутильные моды, вызывая вариации направленного локального магнитного поля, будут тем самым менять угол между лучом зрения и локальным магнитным полем, также вызывая модуляцию интенсивности микроволнового излучения [Tapping, 1983].

Наблюдения показывают, что поперечное сечение вспышечных петель может увеличиваться с высотой. Таким образом, вспышечная петля является магнитной ловушкой для ускоренных электронов. Сосисочные моды приводят к неоднородному вдоль оси петли возмущению поперечного сечения петли и, следовательно, модулируют параметры ловушки (пробочное отношение), а значит, и поток высыпавшихся в хромосферу электронов. Данный эффект приводит к периодической модуляции нетеплового излучения, генерируемого ускоренными электронами, например, в микроволновом и в ЖР-излучении (механизм Зайцева — Степанова [Зайцев, Степанов, 1982]), поэтому периодичности, характерные для сосисочных мод, будут наблюдаться в излучении в этих диапазонах. Аналогичный механизм был адаптирован для интерпретации КПП с периодом около 13 с в оптическом излучении красного карлика EV Lac в работе [Stepanov et al., 2005]. Сделан вывод, что источники излучения локализованы в основаниях вспышечной петли и их излучение в оптическом диапазоне модулируется периодически высыпавшимися электронами.

5.2. Эквивалентный RLC-контур

Конечная электрическая проводимость частично ионизированной плазмы на уровне хромосферы и фотосферы замыкает электрические токи, направленные в короне вдоль магнитного поля активных областей. Таким образом, корональная петля может рассматриваться как виток с электрическим током с эффективными индуктивностью, емкостью и сопротивлением, определяемыми геометрическими и магнитными параметрами петли (рис. 6, механизм 5). Данная физическая система может выступать в роли эквивалентного резонансного контура [Зайцев, Степанов, 2008]. Период собственных колебаний переменного электрического тока определяется выражением $P_{LCR} = \left(\frac{2\pi}{c}\right)(\mathcal{L}C)^{1/2}$, где \mathcal{L} является эквивалентной индуктивностью, а C — эквивалентной емкостью. Переменный ток может вызывать периоди-

ческое ускорение заряженных частиц и влиять на их кинематические параметры, приводя к появлению КПП в нетепловом излучении.

5.3. Периодически индуцируемые магнитные пересоединения

Общепринято, что вспышечное энерговыделение осуществляется в результате магнитного пересоединения, хотя открытыми остаются вопросы накопления магнитной энергии и ее быстрой трансформации в другие виды энергии (проблема быстрого пересоединения). В простейших моделях Свита — Паркера и Петчека [Сомов, 2010] считается, что процесс магнитного пересоединения не имеет внутреннего временного масштаба. Прямые численные эксперименты показывают, что энерговыделение существенно нестационарно, а характерное статистическое распределение энергии описывается степенным законом [Barta et al., 2011]. Периодическая вариация граничных условий, например, периодическое изменение скорости течений, переносящих магнитное поле к области пересоединения, может приводить к периодической модуляции скорости пересоединения и, соответственно, энерговыделения.

Периодическая модуляция граничных условий может осуществляться МГД-колебаниями в плазменных структурах, расположенных на некотором удалении от области пересоединения. Например, изгибное колебание корональной петли вблизи вспышечного токового слоя или X-точки (рис. 6, механизм б) приведет к периодической модуляции величины магнитного поля и скорости течения плазмы [Nakariakov et al., 2006]. Более того, установлено, что взаимодействие БМЗ-волн, например излучаемых осциллирующей петлей (leaky mode), с X-точкой сопровождается фокусировкой волн в ее окрестности [McLaughlin et al., 2011], что вызывает резкое квазипериодическое усиление плотности электрического тока. Амплитуда вариаций плотности тока может на порядки превышать амплитуду индуцирующего их МГД-колебания. Высокие значения плотности электрического тока могут вызывать плазменные неустойчивости и, как следствие, развитие турбулентности в плазме, приводящей к резкому, на несколько порядков, увеличению электрического сопротивления плазмы. Будучи локализованным в окрестности X-точки, данное периодически появляющееся аномально высокое электрическое сопротивление выступает в качестве триггера периодического энерговыделения в результате пересоединения. В данном случае период КПП определяется периодом изгибного колебания. Аналогичный механизм может быть связан также с ММЗ-колебаниями [Chen, Priest, 2006].

Данный сценарий легко объясняет наблюдаемое распространение энерговыделения по вспышечным лентам вдоль нейтральной линии. Начальный акт энерговыделения, локализованный над плазменной аркадой, приводит к генерации ММЗ-импульсов, распространяющихся под некоторым небольшим

углом к магнитному полю, отражающихся от хромосферы, возвращающихся к вершине аркады и вызывающих там следующий импульс энерговыделения (рис. 6, механизм 7). Время, разделяющее отдельные импульсы, иными словами — период КПП, определяется временем распространения ММЗ-колебаний от вершины к основаниям и обратно [Nakariakov, Zimovets, 2011]. Детальное исследование данного эффекта до сих пор не проведено.

5.4. Хлопающие колебания

Квазипериодическое энерговыделение, распространяющееся вдоль нейтральной линии, может быть объяснено также собственными колебаниями макроскопического токового слоя, расположенного над вспышечной аркадой (см. рис. 2). Данное явление, называемое «хлопающие (flapping) колебания», связано с дестабилизацией токового слоя, приводящей к нарастающим квазипериодическим движениям, перпендикулярным к плоскости слоя (рис. 6, механизм 8). Хлопающие колебания являются чисто магнитогидродинамическими. Характерный период хлопающих колебаний может быть оценен через величины градиентов магнитного поля в окрестности токового слоя как $P_{\text{flap}} \approx \frac{2\pi\sqrt{\mu\rho}}{\sqrt{(\partial B_x / \partial z)(\partial B_z / \partial x)}}$.

В данном случае ось Z может рассматриваться как вертикальная координата, а ось X — как горизонтальная координата поперек токового слоя. Токовый слой с компонентой магнитного поля, перпендикулярной плоскости слоя, иногда называется magnetic reversal. В общем случае период колебаний зависит также от толщины токового слоя и длины волны возмущения вдоль слоя [Erkaev et al., 2007]. Хлопающие колебания сосисочной симметрии модулируют толщину токового слоя, что может приводить к квазипериодической модуляции скорости магнитного пересоединения и сопутствующих ему процессов, таких как ускорение заряженных частиц [Artemyev, Zimovets, 2012]. Хлопающие колебания активно исследуются в контексте интерпретации волновых процессов, наблюдаемых в геомагнитном хвосте.

5.5. МГД-автоколебания

Известно, что в неконсервативных нелинейных динамических системах возможно появление автоколебательных режимов, соответствующих появлению предельного цикла на фазовом портрете. Автоколебательный процесс можно проиллюстрировать преобразованием энергии постоянного тока или постоянного течения жидкости или плазмы в переменный ток или механические колебания. Частота автоколебаний определяется свойствами системы и не зависит, как правило, от свойств внешнего источника энергии. В окружающем нас мире автоколебательные процессы играют огромную роль. Например, автоосцилляторами (генераторами автоколебаний) являются человеческое сердце, различные генераторы радиоволн, лазеры, музыкальные инструменты, электронные и механические часы [Jenkins, 2013].

В стандартной модели солнечной вспышки присутствуют все необходимые компоненты автоосциллятора. Внешним источником энергии являются приносящие магнитное поле в область пересоединения течения плазмы. Роль нелинейного элемента играет токовый слой, а роль МГД-резонатора могут играть касповые петельные структуры под токовым слоем. Таким образом, скорость энерговыделения может быть периодически промодулирована внутренними спонтанными автоколебательными процессами (рис. 6, механизм 9). Теория данного явления отсутствует, хотя прямые численные эксперименты показывают возможность его существования. Например, в работе [Munro et al., 2009] обнаружено квазипериодически пульсирующее магнитное пересоединение при взаимодействии вертикального магнитного поля с плавно всплывающей биполярной магнитной областью. Характерные периоды автоколебаний составляли несколько десятков минут. Зависимость периода автоколебаний от параметров системы исследована не была. В численных экспериментах [Thurgood et al., 2019] показано периодическое изменение геометрии магнитного поля в окрестности X-точки.

В работе [Nakariakov et al., 2010b] предложена интерпретация явления пульсирующего пересоединения, основанная на аналогии с процессом образования и отрыва капель в гидродинамике. Рассмотрим известный каждому подтекающий кран. Поток воды к носику крана можно рассматривать как постоянный. При этом процесс отрыва капель может быть строго периодическим. Данная периодичность не имеет ни малейшего отношения к каким бы то ни было колебательным процессам. Период отрыва капель определяется скоростью притока воды, ее поверхностным натяжением и гравитацией. Роль притока воды при пульсирующем магнитном пересоединении играют МГД-течения, приносящие магнитное поле в область пересоединения, электрическое сопротивление плазмы играет роль поверхностного натяжения, а сила Лоренца — роль силы тяжести. Следовательно, можно ожидать появления спонтанных колебаний скорости энерговыделения, например, при квазипериодическом образовании плазмоидов и квазипериодическом ускорении заряженных частиц. Данный механизм, возможно, объясняет периодическое образование плазмоидов в токовом слое, наблюдаемое в численном эксперименте [Kliem et al., 2000]. Эмпирически установлено, что характерный период образования плазмоидов определяется отношением диаметра плазмоида к альфвеновской скорости в нем [Jelínek et al., 2017].

5.6. Колебательная тепловая неустойчивость

Долгопериодические (несколько десятков минут) КПП теплового излучения могут быть вызваны модуляцией термодинамических параметров плазмы тепловой неустойчивостью. Физику данной неустойчивости можно проиллюстрировать следующим образом. Потери на излучение электромагнит-

ных волн приводят к непрерывному охлаждению горячей плазмы короны Солнца. В оптически тонком режиме данные потери определяются квадратом плотности плазмы и сильно немонотонной функцией температуры. Например, 1 г вещества корональной активной области с температурой в 10 МК теряет более 10^{11} эрг/с, что соответствует более чем 100 кВт. Существование горячей короны требует непрерывной компенсации данных потерь на излучение, что определяет одну из фундаментальных проблем современной физики Солнца, а именно проблему нагрева короны. Специфические механизмы нагрева короны являются предметом интенсивных исследований. Очевидно, что зависимости функций радиационных потерь и нагрева от физических параметров, возмущаемых МГД-колебаниями, должны быть различными. Таким образом, нарушение теплового равновесия, обусловленного балансом радиационных потерь, нагрева и, возможно, теплопроводности, МГД-волнами или другой внешней причиной вызывает тепловой дисбаланс. В зависимости от производных функций нагрева и потерь по МГД-величинам (плотности, температуре, возможно, магнитному полю) данный дисбаланс может приводить как к восстановлению теплового равновесия, так и к различным неустойчивостям [Field, 1965]. В частности, может существовать режим раскочки периодических колебаний, т. е. колебательной тепловой неустойчивости (рис. 6, механизм 10). Модуляция параметров плазмы и, возможно, магнитного поля данной колебательной неустойчивостью может приводить к КПП (см., например, наблюдения [Tan et al., 2016]).

5.7. Периодический режим слияния двух скрученных петель

Осциллирующий режим слияния двух скрученных токопроводящих потоковых трубок также может приводить к квазипериодическим всплескам интенсивности излучения в солнечных вспышках [Tajima et al., 1987] и часто рассматривается как один из возможных механизмов возбуждения наблюдаемых КПП (рис. 6, механизм 11). Согласно этому механизму, токовый слой формируется в области взаимодействия двух сталкивающихся магнитных петель с закрученностью магнитного поля в одном направлении. На начальном этапе такие петли с однонаправленными токами могут сближаться за счет относительного движения их оснований в фотосфере. По мере уменьшения расстояния между ними растет сила Ампера взаимодействия токов, что ведет к стремительному уменьшению толщины токового слоя и, возможно, его пересоединению, т. е. к так называемой неустойчивости слияния скрученных магнитных петель (магнитных жгутов, плазмоидов). Нелинейная эволюция «взрывной» фазы этой неустойчивости (когда сталкивающиеся плазмойды расположены достаточно близко друг к другу, так что их динамика полностью определяется балансом между магнитной силой Ампера и градиентом теплового давления) моделировалась аналитически и численно с помощью МГД и кинетических кодов. Полученные результаты позволили определить, что

существует как минимум два сценария формирования колебаний параметров плазмы в процессе этой неустойчивости. Во-первых, сам процесс слияния плазмоедов может быть квазипериодическим. Во-вторых, быстрые (короткопериодические) поперечные колебания токового слоя могут возникать в каждом элементарном акте слияния. В первом случае необходим постоянный приток энергии магнитного поля в область пересоединения. При этом характерный временной масштаб процесса будет определяться интенсивностью втекания магнитного потока и параметрами плазмы в токовом слое (см. обсуждение аналогии такого пульсирующего пересоединения с квазипериодическим отрывом капель воды с горизонтальной поверхности в подразделе 5.5). Tajima et al. [1987] численно показали, что при типичных значениях параметров короны характерные периоды такого процесса составляют около 200 с. Во-втором случае токовый слой, формирующийся при каждом новом сближении сливающихся плазмоедов, также может испытывать колебания радиальной (сосисочной) симметрии со значительно более короткими периодами с магнитной силой Ампера и градиентом теплового давления в качестве вынуждающей и возвращающей сил соответственно. В приближении квазинейтральной МГД было показано, что колебания такого токового слоя описываются нелинейным обычным дифференциальным уравнением второго порядка, в линейном режиме сводящимся к обычному гармоническому осциллятору с периодом $P \propto \beta^{3/2} \tau_A$, где β — плазменный параметр, определяющий соотношение между тепловым и магнитным давлением плазмы; τ_A — время пробега возмущения альфвеновского типа через токовый слой шириной L , определяемой на границе $\beta=1$. При типичном значении параметров плазмы во вспышке и $L=1$ Мм период таких линейных колебаний равен долям секунды. Однако, если принять во внимание нелинейную связь периода колебаний с амплитудой, период колебаний может достигать 1 с в нелинейном режиме эволюции токового слоя при относительной амплитуде колебаний 100 %. В работе [Kolotkov et al., 2016b] было аналитически показано, что, когда толщина токового слоя перед пересоединением в процессе слияния плазмоедов уменьшается до масштабов, сравнимых с длиной Дебая, рассматриваемые высокочастотные колебания вызывают эффективное локальное разделение электрических зарядов. Разделение зарядов, в свою очередь, приводит к образованию дополнительной вынуждающей силы электростатической природы. В этом случае в приближении двухжидкостной МГД период линейных колебаний определяется как $P \propto \sqrt{\beta^3 \tau_A^2 + 4\beta / \omega_i^2}$, где ω_i — характерная частота ионных колебаний плазмы токового слоя. Для типичных условий солнечной короны этот период составляет несколько микросекунд. Интересно, что индуцируемое в этом случае электростатическое поле осциллирует с тем же периодом и в нелинейном режиме имеет характерную форму симметричных треугольных пиков.

5.8. Модель магнитного камертона

Другим примером формирования колебаний вспышечной плазмы может служить модель магнитного камертона [Takasao, Shibata, 2016], согласно которой сверхзвуковой неперриодический магнитный поток, вытекающий из области пересоединения, взаимодействует с верхней частью горячих и плотных поствспышечных петель (рис. 6, механизм 12). Столкновение быстрого магнитного потока с плотной плазмой приводит к образованию ударных волн в относительно небольшой области над вершинами поствспышечных петель и последующему формированию там специфических магнитных V-образных структур, служащих эффективными резонаторами для возмущений плазмы. Численное 2D-МГД-моделирование показало, что рукава таких плазменных структур могут испытывать поперечные колебания радиальной симметрии с периодом P , пропорциональным величине локального магнитного поля, $P \propto B^{-2.1}$. Оценка периода для типичных условий солнечной короны дает значения около 40 с и больше, согласующиеся с наблюдаемыми периодами КПП во вспышках. Эмпирически было установлено, что колебания зависят также от структуры образующихся ударных волн и прекращаются полностью при отсутствии втекающего магнитного потока. Важно отметить, что появление ударных волн, необходимое для образования соответствующей магнитной V-конфигурации и ее последующих колебаний, может происходить в режиме стационарного, неппульсирующего магнитного пересоединения. В свою очередь, квазипериодические движения рукавов структуры возмущают окружающую плазму, приводя к генерации бегущих БМЗ-волн. Описанная модель по принципу действия напоминает работу акустического резонатора камертона, вследствие чего и получила свое название.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые пятьдесят лет назад квазипериодические пульсации вспышечного излучения продолжают привлекать пристальное внимание исследователей. Повышение чувствительности и разрешающей способности инструментов, совершенствование методов анализа наблюдательных данных и опережающее развитие теоретического моделирования физических процессов, протекающих во вспышках, привели к существенному прогрессу как в понимании причин, приводящих к КПП, так и в методах их детектирования и анализа. Было установлено, что и в нетепловом, и в тепловом излучении КПП являются весьма распространенной и, более того, возможно, неотъемлемой компонентой процесса вспышечного энерговыделения, не зависящей от диапазона наблюдений, специфики инструмента и метода обработки данных. Более того, установлена аналогичность КПП, наблюдаемых в супервспышках на звездах и в существенно более слабых вспышках на Солнце. Таким образом, КПП являются необходи-

мым элементом вспышки вообще и физическая модель вспышки не может быть полной, если она не включает описания КПП. Достигнуто понимание того, что отдельные КПП могут вызываться физическими процессами, которые можно отнести к одной из трех групп (см. раздел 5): прямая модуляция излучения МГД-колебаниями всех известных типов; периодическая модуляция эффективности процессов энерговыделения, например магнитного пересоединения (и связанного с ним ускорения), МГД-колебаниями; и квазипериодические режимы самого пересоединения, не связанные непосредственно с МГД-колебаниями. Понимание конкретных механизмов, ответственных за появление КПП, в сочетании с их наблюдаемыми параметрами позволяет проводить диагностику вспышечных областей и может существенно улучшить прогнозирование вспышек.

Для дальнейшего прогресса в исследовании КПП представляются необходимыми следующие шаги. В первую очередь, по аналогии с геомагнитными пульсациями, необходимо провести четкую классификацию наблюдаемых КПП. Классификация должна быть основана, прежде всего, на использовании характерного временного масштаба и характерного временного профиля наблюдаемого сигнала в сочетании с информацией о пространственной структуре его источника. В частности, КПП синусоидальной и симметричной треугольной форм явно должны отвечать различным механизмам, так же как и КПП с характерными периодами в несколько десятков минут и несколько секунд. Данная классификация позволит осуществлять поиск различных статистических закономерностей внутри конкретного класса КПП. Необходимо продолжать поиск корреляции параметров КПП с наблюдаемыми параметрами вспышечных активных областей. Крайне интересным представляется изучение эволюции параметров КПП с развитием вспышки и корреляции этой эволюции с изменением параметров как вспышечной области, так и самой вспышки. Это позволит использовать несомненное преимущество наблюдения вспышек на Солнце — возможность получения информации о пространственной структуре источника КПП и его эволюции. Данный подход может обеспечить нас уникальной информацией для распознавания механизма, отвечающего за конкретные КПП. Весьма многообещающим представляется детектирование и анализ КПП различных классов в одной и той же вспышке, что, возможно, позволит существенно сократить число оцениваемых по КПП свободных параметров вспышечной области.

В теоретическом моделировании необходимо сосредоточиться на установлении специфических признаков конкретных механизмов, приводящих к КПП, и на их проявлениях при наблюдениях в различных диапазонах. Особенно ценными являются одновременные наблюдения в разных диапазонах. Интересной представляется разработка автоколебательных сценариев развития вспышки. Например, если считать, что в наиболее мощных, двухленточных вспышках скорость распространения энерговыделения вдоль нейтральной линии определяется групповой скоростью ММЗ-волн, то можно оценить дли-

тельность самой вспышки и, следовательно, ее максимальную мощность, что крайне важно для предсказания космической погоды. Часто наблюдаемая глубокая модуляция вспышечного сигнала КПП указывает на необходимость учета эффектов конечной амплитуды и разработки теории нелинейных КПП и позволяет использовать амплитуду КПП как дополнительный наблюдаемый параметр.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов № 17-52-10001-Ко_а, № 17-52-80064-БРИКС_а, № 18-29-21016-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуревич С.И. Еще раз о влиянии геомагнитных штормов на работу релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 2 (23). С. 19–21.
- Зайцев В.В., Степанов А.В. О природе пульсаций солнечного радиоизлучения IV типа // Иссл. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1975. № 37. С. 3.
- Зайцев В.В., Степанов А.В. О происхождении пульсаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Письма в АЖ. 1982. Т. 8. С. 248–252.
- Зайцев В.В., Степанов А.В. Корональные магнитные арки // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 11. С. 1165–1204.
- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).
- Сомов Б.В. Магнитное пересоединение в солнечных вспышках // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. С. 997–1000.
- Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н. и др. Радиотелескоп РАТАН-600 // Изв. Главной астрономической обсерватории в Пулковке. 1972. Т. 188. С. 3–12.
- Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., et al. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS Wind spacecraft // Space Sci. Rev. 1995. V. 71, iss. 1–4. P. 265–272. DOI: [10.1007/BF00751332](https://doi.org/10.1007/BF00751332).
- Armstrong D.J., Pugh C.E., Broomhall et al. The host stars of Kepler's habitable exoplanets: superflares, rotation and activity // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 2016. V. 455. P. 3110–3125. DOI: [10.1093/mnras/stv2419](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2419).
- Artemyev A., Zimovets I. Stability of current sheets in the solar corona // Solar Phys. 2012. V. 277, iss. 2. P. 283–298. DOI: [10.1007/s11207-011-9908-1](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9908-1).
- Aulanier G., Démoulin P., Schrijver C. J., Janvier M., Parriat E., Schmieder B. The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy // Astron. Astrophys. 2013. V. 549, id. A66. 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201220406](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220406).
- Aulanier G., Janvier M., Schmieder B. The standard flare model in three dimensions. I. Strong-to-weak shear transition in post-flare loops // Astron. Astrophys. 2012. V. 543, id. A110. 14 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201219311](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219311).
- Balona L.A., Broomhall A.-M., Kosovichev A., et al. Oscillations in stellar superflares // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2015. V. 450, iss. 1. P. 956–966. DOI: [10.1093/mnras/stv661](https://doi.org/10.1093/mnras/stv661).
- Barta M., Buchner J., Karlicky M., Skala J. Spontaneous current-layer fragmentation and cascading reconnection in solar flares. I. Model and analysis // The Astrophys. J. 2011. V. 737, id. 24. 11 p. DOI: [10.1088/0004-637X/737/1/24](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/24).
- Battaglia M., Motorina G., Kontar E.P. Multithermal representation of the kappa-distribution of solar flare electrons and application to simultaneous X-ray and EUV observations // The Astrophys. J. 2015. V. 815, id. 73. 8 p. DOI: [10.1088/0004-637X/815/1/73](https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/1/73).
- Benz A.O. Flare observations // Liv. Rev. Solar Phys. 2017. V. 14, iss. 1, id. 2. 59 p. DOI: [10.12942/lrsp-2008-1](https://doi.org/10.12942/lrsp-2008-1).

- Benz A.O., Brajša R., Magdalenic J. Are there radio-quiet solar flares? // *Solar Phys.* 2007. V. 240, iss. 2. P. 63–270. DOI: [10.1007/s11207-007-0365-9](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0365-9).
- Bogachev S.A., Somov B.V., Kosugi T., Sakao T. The motions of the hard X-ray sources in solar flares: images and statistics // *The Astrophys. J.* 2005. V. 630, iss. 1. P. 561–572. DOI: [10.1086/431918](https://doi.org/10.1086/431918).
- Broomhall A.-M., Davenport J., Hayes L., et al. A blueprint of state-of-the-art techniques for detecting quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares // *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2019. V. 244, iss. 2, id. 44, 37 p. DOI: [10.3847/1538-4365/ab40b3](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab40b3).
- Carrington R.C. Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1859. V. 20. P. 13–15. DOI: [10.1093/mnras/20.1.13](https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.13).
- Caspi A., Lin R.P. RHESSI line and continuum observations of super-hot flare plasma // *The Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 725. P. L161–L166. DOI: [10.1088/2041-8205/725/2/L161](https://doi.org/10.1088/2041-8205/725/2/L161).
- Chen P.F., Priest E.R. Transition-region explosive events: reconnection modulated by p-mode waves // *Solar Phys.* 2006. V. 238, iss. 2. P. 313–327. DOI: [10.1007/s11207-006-0215-1](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0215-1).
- Cho I.-H., Cho K.-S., Nakariakov V.M., et al. Comparison of damped oscillations in solar and stellar X-ray flares // *The Astrophys. J.* 2016. V. 830, iss. 2, id. 110. 12 p. DOI: [10.3847/0004-637X/830/2/110](https://doi.org/10.3847/0004-637X/830/2/110).
- Davenport J.R.A., Hawley S.L., Hebb L., et al. Kepler flares. II. The temporal morphology of white-light flares on GJ 1243 // *The Astrophys. J.* 2014. V. 797, iss. 2, id. 122. 11 p. DOI: [10.1088/0004-637X/797/2/122](https://doi.org/10.1088/0004-637X/797/2/122).
- Dolla L., Marqué C., Seaton D.B., et al. Time delays in quasi-periodic pulsations observed during the X2.2 solar flare on 2011 February 15 // *The Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 749, iss. 1, id. L16. 7 p. DOI: [10.1088/2041-8205/749/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/749/1/L16).
- Dominique M., Zhukov A.N., Dolla L. et al. Detection of quasi-periodic pulsations in solar EUV time series // *Solar Phys.* 2018. V. 293, iss. 4, id. 61. 24 p. DOI: [10.1007/s11207-018-1281-x](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1281-x).
- Doyle J.G., Shetye J., Antonova A.E., et al. Stellar flare oscillations: evidence for oscillatory reconnection and evolution of MHD modes // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 475, iss. 2. P. 2842–2851. DOI: [10.1093/mnras/sty032](https://doi.org/10.1093/mnras/sty032).
- Dubinov A.E., Kolotkov D.Y. Above the weak nonlinearity: super-nonlinear waves in astrophysical and laboratory plasmas // *Rev. Modern Plasma Phys.* 2018. V. 2, id. 2. 46 p. DOI: [10.1007/s41614-018-0014-9](https://doi.org/10.1007/s41614-018-0014-9).
- Dudík J., Dzifčáková E., Karlický M., Kulinová A. The bound-bound and free-free radiative losses for the nonthermal distribution in solar and stellar coronae // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 529, id. A103. 14 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201016329](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016329).
- Dulk G.A., Marsh K.A. Simplified expressions for the gyro-synchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons // *The Astrophys. J.* 1982. V. 259. P. 350–358. DOI: [10.1086/160171](https://doi.org/10.1086/160171).
- Edwin P.M., Roberts B. Wave propagation in a magnetic cylinder // *Solar Phys.* 1983. V. 88, iss. 1–2. P. 179–191. DOI: [10.1007/BF00196186](https://doi.org/10.1007/BF00196186).
- Erkaev N.V., Semenov V.S., Biernat H.K. Magnetic double-gradient instability and flapping waves in a current sheet // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99, iss. 23, id. 235003. DOI: [10.1103/PhysRevLett.99.235003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.235003).
- Field G.B. Thermal Instability // *The Astrophys. J.* 1965. V. 142. P. 531. DOI: [10.1086/148317](https://doi.org/10.1086/148317).
- Fleishman G.D., Kontar E.P. Sub-THz radiation mechanisms in solar flares // *The Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 709, iss. 2. P. L127–L132. DOI: [10.1088/2041-8205/709/2/L127](https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/2/L127).
- Fleishman G.D., Kontar E.P., Nita G.M., Gary D.E. A cold, tenuous solar flare: acceleration without heating // *The Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 731, iss. 1, id. L19. 6 p. DOI: [10.1088/2041-8205/731/1/L19](https://doi.org/10.1088/2041-8205/731/1/L19).
- Frissell N.A., Vega J.S., Markowitz E., et al. High-frequency communications response to solar activity in September 2017 as observed by amateur radio networks // *Space Weather.* 2019. V. 17. P. 118–132. DOI: [10.1029/2018SW002008](https://doi.org/10.1029/2018SW002008).
- Gershberg R.E. *Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars.* Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 496 p. DOI: [10.1007/3-540-28243-2](https://doi.org/10.1007/3-540-28243-2).
- Goddard C.R., Nisticò G., Nakariakov V.M., Zimovets I.V. A statistical study of decaying kink oscillations detected using SDO/AIA // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 585, id. A137. 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201527341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527341).
- Golub L., Deluca E., Austin G., Bookbinder J., et al. The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission // *Solar Phys.* 2007. V. 243, iss. 1. P. 63–86. DOI: [10.1007/s11207-007-0182-1](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0182-1).
- Gryciuk M., Siarkowski M., Sylwester J., et al. Flare characteristics from X-ray light curves // *Solar Phys.* 2017. V. 292, iss. 6, id. 77. 19 p. DOI: [10.1007/s11207-017-1101-8](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1101-8).
- Guo M.-Z., Chen S.-X., Li B., et al. Inferring flare loop parameters with measurements of standing sausage modes // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 3. P. 877–896. DOI: [10.1007/s11207-016-0868-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0868-3).
- Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R., et al. Quasi-periodic pulsations during the impulsive and decay phases of an X-class flare // *The Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 827, iss. 2, id. L30. 6 p. DOI: [10.3847/2041-8205/827/2/L30](https://doi.org/10.3847/2041-8205/827/2/L30).
- Hayes L.A., Gallagher P.T., McCauley J., et al. Pulsations in the Earth's lower ionosphere synchronized with solar flare emission // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, iss. 10. P. 9841–9847. DOI: [10.1002/2017JA024647](https://doi.org/10.1002/2017JA024647).
- Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R., et al. Persistent Quasi-periodic pulsations during a large X-class solar flare // *The Astrophys. J.* 2019. V. 875, iss. 1. Id. 33. 11 p. DOI: [10.3847/1538-4357/ab0ca3](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0ca3).
- Heinzel P., Avrett E.H. Optical-to-radio continua in solar flares // *Solar Phys.* 2012. V. 277, iss. 1. P. 31–44. DOI: [10.1007/s11207-011-9823-5](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9823-5).
- Heinzel P., Kleint L. Hydrogen Balmer continuum in solar flares detected by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) // *The Astrophys. J. Lett.* 2014. V. 794, iss. 2, id. L23. 6 p. DOI: [10.1088/2041-8205/794/2/L23](https://doi.org/10.1088/2041-8205/794/2/L23).
- Heinzel P., Shibata K. Can flare loops contribute to the white-light emission of stellar superflares? // *The Astrophys. J.* 2018. V. 859, iss. 2, id. 143. 7 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aabe78](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabe78).
- Hnat B., Kolotkov D.Y., O'Connell D., et al. Nonlinear waves in the terrestrial quasiparallel foreshock // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117, id. 235102. DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.235102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.235102).
- Holman G.D., Sui L., Schwartz R.A., Emslie A.G. Electron bremsstrahlung hard X-ray spectra, electron distributions, and energetics // *The Astrophys. J.* 2003. V. 595, iss. 2. P. L97–L101. DOI: [10.1086/378488](https://doi.org/10.1086/378488).
- Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert—Huang transform: Method and its applications to geophysical studies // *Rev. Geophys.* 2008. V. 46, iss. 2, id. RG2006. DOI: [10.1029/2007RG000228](https://doi.org/10.1029/2007RG000228).
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Ro. Soc. London Proc. Ser. A.* 1998. V. 454, iss. 1971. P. 903–998. DOI: [10.1098/rspa.1998.0193](https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193).
- Hudson H.S. Chasing white-light flares // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 5. P. 1273–1322. DOI: [10.1007/s11207-016-0904-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0904-3).
- Hudson H.S., Canfield R.C., Kane S.R. Indirect estimation of energy deposition by non-thermal electrons in solar flares // *Solar Phys.* 1978. V. 60. P. 137–142. DOI: [10.1007/BF00152338](https://doi.org/10.1007/BF00152338).

- Inglis A.R., Nakariakov V.M. A multi-periodic oscillatory event in a solar flare // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 493, iss. 1. P. 259–266. DOI: [10.1051/0004-6361:200810473](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810473).
- Inglis A.R., van Doorselaere T., Brady C.S., Nakariakov V.M. Characteristics of magnetoacoustic sausage modes // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 503, iss. 2. P. 569–575. DOI: [10.1051/0004-6361/200912088](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912088).
- Inglis A.R., Ireland J., Dennis B.R., et al. A large-scale search for evidence of quasi-periodic pulsations in solar flares // *The Astrophys. J.* 2016. V. 833, iss. 2, id. 284. 16 p. DOI: [10.3847/1538-4357/833/2/284](https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/284).
- Jakimiec J., Tomczak M. Investigation of quasi-periodic variations in hard X-rays of solar flares. II. Further investigation of oscillating magnetic traps // *Solar Phys.* 2012. V. 278. P. 393–410. DOI: [10.1007/s11207-012-9934-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-9934-7).
- Jelínek P., Karlický M., Van Doorselaere T., Bárta M. Oscillations excited by plasmoids formed during magnetic reconnection in a vertical gravitationally stratified current sheet // *The Astrophys. J.* 2017. V. 847, iss. 2, id. 98. 15 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aa88a6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa88a6).
- Jenkins A. Self-oscillation // *Phys. Rep.* 2013. V. 525. P. 167–222. DOI: [10.1016/j.physrep.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.10.007).
- Kane S.R., Kai K., Kosugi T., Enome S., et al. Acceleration and confinement of energetic particles in the 1980 June 7 solar flare // *The Astrophys. J.* 1983. V. 271. P. 376–387. DOI: [10.1086/161203](https://doi.org/10.1086/161203).
- Kashapova L.K., Tokhchukova S.K., Rudenko G.V., et al. On the possible mechanisms of energy release in a C-class flare // *Cen. Europ. Astrophys. Bull.* 2013. V. 37. P. 573–583.
- Katsova M.M., Kitchatinov L.L., Livshits M.A., et al. Can superflares occur on the Sun? A view from dynamo theory // *Astron. Rep.* 2018. V. 62, iss. 1. P. 72–80. DOI: [10.1134/S106377291801002X](https://doi.org/10.1134/S106377291801002X).
- Kaufmann P., Correa E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A.M. A synchrotron inverse Compton interpretation of a solar burst producing fast pulses at lambda less than 3 mm and hard X-rays // *Astron. Astrophys.* 1986. V. 157. P. 11–18.
- Kim S., Nakariakov V.M., Shibasaki K. Slow magnetoacoustic oscillations in the microwave emission of solar flares // *The Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 756, iss. 2, id. L36. 5 p. DOI: [10.1088/2041-8205/756/2/L36](https://doi.org/10.1088/2041-8205/756/2/L36).
- Kislyakov A.G., Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S. On the possible connection between photospheric 5-min oscillation and solar flare microwave emission // *Solar Phys.* 2006. V. 233. P. 89–106. DOI: [10.1007/s11207-006-2850-y](https://doi.org/10.1007/s11207-006-2850-y).
- Kitchatinov L.L., Olemskoy S.V. Dynamo model for grand maxima of solar activity: can superflares occur on the Sun? // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 459, iss. 4. P. 4353–4359. DOI: [10.1093/mnras/stw875](https://doi.org/10.1093/mnras/stw875).
- Kliem B., Karlický M., Benz A.O. Solar flare radio pulsations as a signature of dynamic magnetic reconnection // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 360. P. 715–728.
- Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Kupriyanova E.G., et al. Multi-mode quasi-periodic pulsations in a solar flare // *Astron. Astrophys.* 2015. V. 574, id. A53. 6 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201424988](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424988).
- Kolotkov D.Y., Anfinogentov S.A., Nakariakov V.M. Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // *Astron. Astrophys.* 2016a. V. 592, id. A153. 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201628306](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628306).
- Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Rowlands G. Nonlinear oscillations of coalescing magnetic flux ropes // *Phys. Rev. E.* 2016b. V. 93, iss. 5, id. 053205. DOI: [10.1103/PhysRevE.93.053205](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.053205).
- Kolotkov D.Y., Pugh C.E., Broomhall A.-M., Nakariakov V.M. Quasi-periodic pulsations in the most powerful solar flare of cycle 24 // *The Astrophys. J. Lett.* 2018. V. 858, iss. 1, id. L3. 8 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aabde9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aabde9).
- Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., et al. Observation-driven model of the frequency rising sub-THz emission component in solar flares // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 620, id. A95. 6 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201834124](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834124).
- Kopylova Yu.G., Stepanov A.V., Tsap Yu.T. Radial oscillations of coronal loops and microwave radiation from solar flares // *Astron. Lett.* 2002. V. 28, iss. 11. P. 783–791.
- Kopylova Yu.G., Melnikov A.V., Stepanov A.V., et al. Oscillations of coronal loops and second pulsations of solar radio emission // *Astron. Lett.* 2007. V. 33, iss. 10. P. 706–713. DOI: [10.1134/S1063773707100088](https://doi.org/10.1134/S1063773707100088).
- Kotrč P., Procházka O., Heinzl P. New observations of Balmer continuum flux in solar flares: Instrument description and first results // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 3. P. 779–789. DOI: [10.1007/s11207-016-0860-y](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0860-y).
- Kretzschmar M. The Sun as a star: observations of white-light flares // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 530, id. A84. 7 p.
- Kupriyanova E.G., Ratcliffe H. Minute pulsations in microwaves and X-rays during the flare on May 6, 2005 // *Adv. Space Res.* 2016. V. 57, iss. 7. P. 1456–1467. DOI: [10.1016/j.asr.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.012).
- Kupriyanova E.G., Melnikov V.F., Nakariakov V.M., Shibasaki K. Types of microwave quasi-periodic pulsations in single flaring loops // *Solar Phys.* 2010. V. 267. P. 329–342. DOI: [10.1007/s11207-010-9642-0](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9642-0).
- Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Reid H.A.S., Myagkova I.N. Relationship of type III radio bursts with quasi-periodic pulsations in a solar flare // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 11. P. 3427–3438. DOI: [10.1007/s11207-016-0958-2](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0958-2).
- Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Y.V. CORONAS-F satellite: Tasks for study of particle acceleration // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30, iss. 7. P. 1857–1863. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00462-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00462-3).
- 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.* 2016. V. 291, iss. 11. P. 3385–3426. DOI: [10.1007/s11207-016-0981-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0981-3).
- Lin R.P., Hudson H.S. Non-thermal processes in large solar flares // *Solar Phys.* 1976. V. 50. P. 153–178. DOI: [10.1007/BF00206199](https://doi.org/10.1007/BF00206199).
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Phys.* 2002. V. 210, iss. 1. P. 3–32. DOI: [10.1023/A:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870).
- Loukitcheva M., Solanki S.K., Carlsson M., Stein R.F. Millimeter observations and chromospheric dynamics // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 419. P. 747–756. DOI: [10.1051/0004-6361:20034159](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034159).
- Lysenko A.L., Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., et al. Statistics of “cold” early impulsive solar flares in X-Ray and microwave domains // *The Astrophys. J.* 2018. V. 856, iss. 2, id. 111. 29 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aab271](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab271).
- Maehara H., Shibayama T., Notsu S., et al. Superflares on solar-type stars // *Nature.* 2012. V. 485, iss. 7399. P. 478–481. DOI: [10.1038/nature11063](https://doi.org/10.1038/nature11063).
- Maehara H., Shibayama T., Notsu Y., et al. Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data // *Earth, Planets and Space.* 2015. V. 67, id. 59. 10 p. DOI: [10.1186/s40623-015-0217-z](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z).
- Masuda S., Shimojo M., Kawate T., Ishikawa S., Ohno M. Extremely microwave-rich solar flare observed with Nobeyama Radioheliograph // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013. V. 65, N. SP1, id. S1. 6 p. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S1](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S1).
- McLaughlin J.A., Hood A.W., de Moortel I. Review Article: MHD wave propagation near coronal null points of magnetic fields // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 158, iss. 2–4. P. 205–236. DOI: [10.1007/s11214-010-9654-y](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9654-y).
- McLaughlin J.A., Nakariakov V.M., Dominique M., et al. Modelling quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214, id. 45, 54 p. DOI: [10.1007/s11214-018-0478-5](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0478-5).

Mészárosová H., Karlický M., Rybák, J., Jiříčka K. Tadpoles in wavelet spectra of a solar decimetric radio burst // *The Astrophys. J. Lett.* 2009. V. 697, iss. 2. P. L108–L110. DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/L108](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/L108).

Murray M.J., van Driel-Gesztelyi L., Baker D. Simulations of emerging flux in a coronal hole: oscillatory reconnection // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 494, iss. 1. P. 329–337. DOI: [10.1051/0004-6361:200810406](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810406).

Nagovitsyn Yu.A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past // *Astron. Lett.* 1997. V. 23, iss. 6. P. 742–748.

Nakajima H., Sekiguchi H., Aiba S., Shiomi Y., Kuwabara T., Sawa M., et al. A new 17-GHz solar radio interferometer at Nobeyama // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1980. V. 32. P. 639–650.

Nakajima H., Kosugi T., Kai K., Enome S. Successive electron and ion accelerations in impulsive solar flares on 7 and 21 June 1980 // *Nature.* 1983. V. 305. P. 292–294. DOI: [10.1038/305292a0](https://doi.org/10.1038/305292a0).

Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., Kai K., Kawashima S. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama // *Publ. of the Astron. Soc. of Japan.* 1985. V. 37. P. 163–170.

Nakariakov V.M., Melnikov V.F. Quasi-periodic pulsations in solar flares // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149, iss. 1–4. P. 119–151. DOI: [10.1007/s11214-009-9536-3](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9536-3).

Nakariakov V.M., Zimovets I.V. Slow magnetoacoustic waves in two-ribbon flares // *The Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 730, iss. 2, id. L27. 4 p. DOI: [10.1088/2041-8205/730/2/L27](https://doi.org/10.1088/2041-8205/730/2/L27).

Nakariakov V.M., Foullon C., Verwichte E., Young N.P. Quasi-periodic modulation of solar and stellar flaring emission by magnetohydrodynamic oscillations in a nearby loop // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 452, iss. 1. P. 343–346. DOI: [10.1051/0004-6361:20054608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/20054608).

Nakariakov V.M., Foullon C., Myagkova I.N., Inglis A.R. Quasi-periodic pulsations in the gamma-ray emission of a solar flare // *The Astrophys. J. Lett.* 2010a. V. 708. L47–L51. DOI: [10.1088/2041-8205/708/1/L47](https://doi.org/10.1088/2041-8205/708/1/L47).

Nakariakov V.M., Inglis A.R., Zimovets I.V., et al. Oscillatory processes in solar flares // *Plasma Phys. and Controlled Fusion.* 2010b. V. 52, iss. 12, id. 124009. DOI: [10.1088/0741-3335/52/12/124009](https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/12/124009).

Nakariakov V.M., Hornsey C., Melnikov V.F. Sausage oscillations of coronal plasma structures // *The Astrophys. J.* 2012. V. 761, iss. 2, id. 134. 6 p. DOI: [10.1088/0004-637X/761/2/134](https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/2/134).

Nakariakov V.M., Pilipenko V., Heilig B., et al. Magnetohydrodynamic oscillations in the solar corona and Earth's magnetosphere: Towards consolidated understanding // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. P. 75–203. DOI: [10.1007/s11214-015-0233-0](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0233-0).

Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., et al. Non-stationary quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares // *Plasma Phys. and Controlled Fusion.* 2019. V. 61, id. 014024. DOI: [10.1088/1361-6587/aad97c](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad97c).

Neupert W.M. Comparison of Solar X-Ray line emission with microwave emission during flares // *The Astrophys. J.* 1968. V. 153. P. L59. DOI: [10.1086/180220](https://doi.org/10.1086/180220).

Pascoe D.J., Russell A.J.B., Anfinogentov S.A., et al. Seismology of contracting and expanding coronal loops using damping of kink oscillations by mode coupling // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 607, id. A8. 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201730915](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730915).

Penn M., Krucker S., Hudson H., et al. Spectral and imaging observations of a white-light solar flare in the mid-infrared // *The Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 819, iss. 2, Id. L30. 5 p. DOI: [10.3847/2041-8205/819/2/L30](https://doi.org/10.3847/2041-8205/819/2/L30).

Pugh C.E., Nakariakov V.M., Broomhall A.-M.A. Multi-period oscillation in a stellar superflare // *The Astrophys. J.*

Lett. 2015. V. 813, iss. 1, id. L5. 5 p. DOI: [10.1088/2041-8205/813/1/L5](https://doi.org/10.1088/2041-8205/813/1/L5).

Pugh C.E., Broomhall A.-M., Nakariakov V.M. Significance testing for quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares // *Astron. Astrophys.* 2017a. V. 602, id. A47. 8 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201730595](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730595).

Pugh C.E., Nakariakov V.M., Broomhall A.-M., et al. Properties of quasi-periodic pulsations in solar flares from a single active region // *Astron. Astrophys.* 2017b. V. 608, id. A101. 23 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201731636](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731636).

Ryutov D.A., Ryutova M.P. Sound oscillations in a plasma with «magnetic filaments» // *J. Exper. and Theor. Phys.* 1976. V. 43. P. 491–497.

Reva A., Shestov S., Zimovets I., et al. Wave-like formation of hot loop arcades // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 10. P. 2909–2921. DOI: [10.1007/s11207-015-0769-x](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0769-x).

Reznikova V.E., Shibasaki K. Flare quasi-periodic pulsations with growing periodicity // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 525, id. A112. 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201015600](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015600).

Reznikova V.E., Nakariakov V.M., Melnikov V.F., Shibasaki K. Diagnostics of MHD-oscillation modes of a flaring loop using microwave observations with high spatial resolution // *Proc. 11th European Solar Physics Meeting “The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations” (ESA SP-600).* 11–16 September 2005, Leuven, Belgium. CDROM. id. 140.1. 4 p.

Saint-Hilaire P., Benz A.O., Monstein C. Short-duration radio bursts with apparent extragalactic dispersion // *The Astrophys. J.* 2014. V. 795, iss. 1, id. 19. 6 p. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/19](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/19).

Sakai J.I., Nagasugi Y., Saito S., Kaufmann P. Simulating the emission of electromagnetic waves in the terahertz range by relativistic electron beams // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 457. P. 313–318. DOI: [10.1051/0004-6361/20065368](https://doi.org/10.1051/0004-6361/20065368)

Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275, iss. 1–2. P. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).

Shibasaki K. High-Beta Disruption in the Solar Atmosphere // *The Astrophys. J.* 2001. V. 557. P. 326–331. DOI: [10.1086/321651](https://doi.org/10.1086/321651).

Shibayama T., Maehara H., Notsu S., et al. Superflares on solar-type stars observed with Kepler. I. Statistical properties of superflares // *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2013. V. 209, iss. 1, id. 5. 13 p. DOI: [10.1088/0067-0049/209/1/5](https://doi.org/10.1088/0067-0049/209/1/5).

Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., et al. Evidence that synchrotron emission from nonthermal electrons produces the increasing submillimeter spectral component in solar flares // *Solar Phys.* 2007. V. 245. P. 311–326. DOI: [10.1007/s11207-007-9044-0](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9044-0).

Simões P.J.A., Hudson H.S., Fletcher L. Soft X-ray pulsations in solar flares // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 12. P. 3625–3639. DOI: [10.1007/s11207-015-0691-2](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0691-2).

Stepanov A.V., Kopylova Yu.G., Tsap Yu.T., Kupriyanova E.G. Oscillations of optical emission from flare stars and coronal loop diagnostics // *Astronomy Lett.* 2005. V. 31, iss. 9. P. 612–619. DOI: [10.1134/1.2039972](https://doi.org/10.1134/1.2039972).

Su J.T., Shen Y.D., Liu Y. Extreme-ultraviolet multi-wavelength observations of quasi-periodic pulsations in a solar post-flare cusp-shape loop with SDO/AIA // *The Astrophys. J.* 2012. V. 754, iss. 1, id. 43. 8 p. DOI: [10.1088/0004-637X/754/1/43](https://doi.org/10.1088/0004-637X/754/1/43).

Švestka Z. Optical observations of solar flares // *Space Sci. Rev.* 1966. V. 5, iss. 3. P. 388–418. DOI: [10.1007/BF02653250](https://doi.org/10.1007/BF02653250).

Tajima T., Sakai J., Nakajima H., et al. Current loop coalescence model of solar flares // *The Astrophys. J.* 1987. V. 321. P. 1031–1048. DOI: [10.1086/165694](https://doi.org/10.1086/165694).

Takasao S., Shibata K. Above-the-loop-top oscillation and quasi-periodic coronal wave generation in solar flares // *The Astrophys. J.* 2016. V. 823, iss. 2, id. 150. 11 p. DOI: [10.3847/0004-637X/823/2/150](https://doi.org/10.3847/0004-637X/823/2/150).

Tan B., Yu Z., Huang J., et al. Very long-period pulsations before the onset of solar flares // *The Astrophys. J.* 2016. V. 833, iss. 2, id. 206. 6 p. DOI: [10.3847/1538-4357/833/2/206](https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/206).

Tapping K.F. A torsional wave model for solar radio pulsations // *Solar Phys.* 1983. V. 87, iss. 1. P. 177–186. DOI: [10.1007/BF00151168](https://doi.org/10.1007/BF00151168).

Thurgood J.O. Pontin D.I., McLaughlin J.A. On the periodicity of linear and nonlinear oscillatory reconnection // *Astron. Astrophys.* 2019. V. 621, id. A106. 12 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201834369](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834369).

Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78. DOI: [10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).

Trottet G., Raulin J.-P., Mackinnon A., et al. Origin of the 30 THz emission detected during the solar flare on 2012 March 13 at 17:20 UT // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 10. P. 2809–2826. DOI: [10.1007/s11207-015-0782-0](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0782-0).

Tsap Y.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., et al. Millimeter and X-ray emission from the 5 July 2012 solar flare // *Solar Phys.* 2018. V. 293. P. 15. DOI: [10.1007/s11207-018-1269-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1269-6).

Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kopylova Yu.G., Zhilyaev B.E. Diagnostics of a flare on EQ Peg B from optical pulsations // *Astron. Lett.* 2011. V. 37, iss. 1. P. 49–54. DOI: [10.1134/S1063773710101032](https://doi.org/10.1134/S1063773710101032).

Van Doorsselaere T., Nakariakov V.M., Verwichte E. Detection of waves in the solar corona: kink or Alfvén? // *The Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 676. P. L73–L75. DOI: [10.1086/587029](https://doi.org/10.1086/587029).

Van Doorsselaere T., De Groof A., Zender J., et al. LYRA observations of two oscillation modes in a single flare // *The Astrophys. J.* 2011. V. 740, id. 90. 8 p. DOI: [10.1088/0004-637X/740/2/90](https://doi.org/10.1088/0004-637X/740/2/90).

Van Doorsselaere T., Kupriyanova E.G., Yuan D. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: an overview of recent results (Invited Rev.) // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 11. P. 3143–3164. DOI: [10.1007/s11207-016-0977-z](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0977-z).

Vaughan S. A simple test for periodic signals in red noise // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 431. P. 391–403. DOI: [10.1051/0004-6361:20041453](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041453).

Wang T., Innes D.E., Qiu J. Determination of the coronal magnetic field from hot-loop oscillations observed by SUMER and SXT // *The Astrophys. J.* 2007. V. 656, iss. 1. P. 598–609. DOI: [10.1086/510424](https://doi.org/10.1086/510424).

Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., et al. Solar science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array — a new view of our Sun // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200, iss. 1–4. P. 1–73. DOI: [10.1007/s11214-015-0229-9](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0229-9).

Xu Y., Cao W., Liu C., et al. Near-infrared observations at 1.56 microns of the 2003 October 29 X10 white-light flare // *The Astrophys. J.* 2004. V. 607, iss. 2. P. L131–L134. DOI: [10.1086/422099](https://doi.org/10.1086/422099).

Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V. Rayleigh–Taylor instability and excitation of super-Dreicer electric fields in the solar chromosphere // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 3451–3459. DOI: [10.1007/s11207-016-0983-1](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0983-1).

Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kaufmann P. On the origin of pulsations of sub-THz emission from solar flares // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3017–3032. DOI: [10.1007/s11207-014-0515-9](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0515-9).

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 1. P. 287–294. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).

URL: <https://legacy.helioviewer.org/> (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

URL: <http://sdc.uio.no/sdc/> (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/doc/manuale.pdf> (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

REFERENCES

Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Ilynskii V.N., Mazets E.P., Panov V.N., et al. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS Wind Spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, iss. 1–4, pp. 265–272. DOI: [10.1007/BF00751332](https://doi.org/10.1007/BF00751332).

Armstrong D.J., Pugh C.E., Broomhall A.-M., Brown D.J.A., Lund M.N. Osborn H.P., et al. The host stars of Kepler's habitable exoplanets: superflares, rotation and activity. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016, vol. 455, pp. 3110–3125. DOI: [10.1093/mnras/stv2419](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2419).

Artemyev A., Zimovets I. Stability of current sheets in the solar corona. *Solar Phys.* 2012, vol. 277, iss. 2, pp. 283–298. DOI: [10.1007/s11207-011-9908-1](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9908-1).

Aulanier G., Janvier M., Schmieder B. The standard flare model in three dimensions. I. Strong-to-weak shear transition in post-flare loops. *Astron. and Astrophys.* 2012, vol. 543, id. A110, 14 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201219311](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219311).

Aulanier G., Démoulin P., Schrijver C.J., Janvier M., Parat E., Schmieder B. The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy. *Astron. and Astrophys.* 2013, vol. 549, id. A66, 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201220406](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220406).

Balona L.A., Broomhall A.-M., Kosovichev A., Nakariakov V.M., Pugh C.E., Van Doorselaere T. Oscillations in stellar superflares. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015, vol. 450, iss. 1, pp. 956–966. DOI: [10.1093/mnras/stv661](https://doi.org/10.1093/mnras/stv661).

Barta M., Buchner J., Karlicky M., Skala J. Spontaneous current-layer fragmentation and cascading reconnection in solar flares. I. Model and analysis. *The Astrophys. J.* 2011, vol. 737, id. 24. 11 p. DOI: [10.1088/0004-637X/737/1/24](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/24).

Battaglia M., Motorina G., Kontar E.P. Multithermal representation of the kappa-distribution of solar flare electrons and application to simultaneous X-ray and EUV observations. *The Astrophys. J.* 2015, vol. 815, id. 73, 8 p. DOI: [10.1088/0004-637X/815/1/73](https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/1/73).

Benz A.O. Flare observations. *Liv. Rev. Solar Phys.* 2017, vol. 14, iss. 1, id. 2, 59 p. DOI: [10.1007/s41116-016-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3).

Benz A.O., Brajša R., Magdalenić J. Are there radio-quiet solar flares? *Solar Phys.* 2007, vol. 240, iss. 2, pp. 63–270. DOI: [10.1007/s11207-007-0365-9](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0365-9).

Bogachev S.A., Somov B.V., Kosugi T., Sakao T. The motions of the hard X-ray sources in solar flares: Images and statistics. *The Astrophys. J.* 2005, vol. 630, iss. 1, pp. 561–572. DOI: [10.1086/431918](https://doi.org/10.1086/431918).

Broomhall A.-M., Davenport J., Hayes L., Inglis A., Kolotkov D., McLaughlin J., et al. A blueprint of state-of-the-art techniques for detecting quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2019, vol. 244, iss. 2, id. 44, 37 p. DOI: [10.3847/1538-4365/ab40b3](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab40b3).

Carrington R.C. description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* vol. 20, pp.13–15. DOI: [10.1093/mnras/20.1.13](https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.13).

Caspi A., Lin R.P. RHESSI line and continuum observations of super-hot flare plasma. *The Astrophys. J. Lett.* 2010, vol. 725, pp. L161–L166. DOI: [10.1088/2041-8205/725/2/L161](https://doi.org/10.1088/2041-8205/725/2/L161).

Chen P.F., Priest E.R. Transition-region explosive events: Reconnection modulated by p-mode waves. *Solar Phys.* 2006, vol. 238, iss. 2, pp. 313–327. DOI: [10.1007/s11207-006-0215-1](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0215-1).

Cho I.-H., Cho K.-S., Nakariakov V.M., Kim S., Kumar P. Comparison of damped oscillations in solar and stellar X-ray flares. *Astrophys. J.* 2016, vol. 830, iss. 2, id. 110, 12 p. DOI: [10.3847/0004-637X/830/2/110](https://doi.org/10.3847/0004-637X/830/2/110).

Davenport J.R.A., Hawley S.L., Hebb L., Wisniewski J.P., Kowalski A.F., Johnson E.C., et al. Kepler flares. II. The temporal morphology of white-light flares on GJ 1243. *The Astrophys. J.* 2014, vol. 797, iss. 2, id. 122, 11 p. DOI: [10.1088/0004-637X/797/2/122](https://doi.org/10.1088/0004-637X/797/2/122).

Dolla L., Marqué C., Seaton D. B., Van Doorsselaere T., Dominique M., Berghmans D., et al. Time delays in quasi-periodic pulsations observed during the X2.2 solar flare on

2011 February 15. *The Astrophys. J. Lett.* 2012, vol. 749, iss. 1, id. L16, 7 p. DOI: [10.1088/2041-8205/749/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/749/1/L16).

Dominique M., Zhukov A.N., Dolla L. Inglis A., Lapenta G. Detection of quasi-periodic pulsations in solar EUV time series. *Solar Phys.* 2018, vol. 293, iss. 4, id. 61, 24 p. DOI: [10.1007/s11207-018-1281-x](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1281-x).

Doyle J.G., Shetye J., Antonova A.E., Kolotkov D.Y., Srivastava A.K., Stangalini M., et al. Stellar flare oscillations: evidence for oscillatory reconnection and evolution of MHD modes. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2018, vol. 475, iss. 2, pp. 2842–2851. DOI: [2018MNRAS.475.2842D](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1284).

Dubinov A.E., Kolotkov D.Y. Above the weak nonlinearity: super-nonlinear waves in astrophysical and laboratory plasmas. *Rev. Mod. Plasma Phys.* 2018, vol. 2, id. 2, 46 p. DOI: [10.1007/s41614-018-0014-9](https://doi.org/10.1007/s41614-018-0014-9).

Dudík J., Dziřčáková E., Karlický M., Kulinová A. The bound-bound and free-free radiative losses for the nonthermal distribution in solar and stellar coronae. *Astron. and Astrophys.* 2011, vol. 529, id. A103, 14 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201016329](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016329).

Dulk G.A., Marsh K.A. Simplified expressions for the gyrosynchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons. *The Astrophys. J.* 1982, vol. 259, pp. 350–358. DOI: [10.1086/160171](https://doi.org/10.1086/160171).

Edwin P.M., Roberts B. Wave propagation in a magnetic cylinder. *Solar Phys.* 1983, vol. 88, iss. 1–2, pp. 179–191. DOI: [10.1007/BF00196186](https://doi.org/10.1007/BF00196186).

Erkaev N.V., Semenov V.S., Biernat H.K. Magnetic double-gradient instability and flapping waves in a current sheet. *Phys. Rev. Lett.* 2007, vol. 99, iss. 23, id. 235003. DOI: [10.1103/PhysRevLett.99.235003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.235003).

Field G.B. Thermal instability. *The Astrophys. J.* 1965, vol. 142, p. 531. DOI: [10.1086/148317](https://doi.org/10.1086/148317).

Fleishman G.D., Kontar E.P. Sub-THz radiation mechanisms in solar flares. *The Astrophys. J. Lett.* 2010, vol. 709, iss. 2, pp. L127–L132. DOI: [10.1088/2041-8205/709/2/L127](https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/2/L127).

Fleishman G.D., Kontar E.P., Nita G.M., Gary D.E. A cold, tenuous solar flare: Acceleration without heating. *The Astrophys. J. Lett.* 2011, vol. 731, iss. 1, id. L19, 6 p. DOI: [10.1088/2041-8205/731/1/L19](https://doi.org/10.1088/2041-8205/731/1/L19).

Frissell N.A., Vega J.S., Markowitz E., Gerrard A.J., Engelke W.D., Erickson P.J., et al. High-frequency communications response to solar activity in September 2017 as observed by amateur radio networks. *Space Weather.* 2019, vol. 17, pp. 118–132. DOI: [10.1029/2018SW002008](https://doi.org/10.1029/2018SW002008).

Gershberg R.E. *Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, 496 p. DOI: [10.1007/3-540-28243-2](https://doi.org/10.1007/3-540-28243-2).

Goddard C.R., Nisticò G., Nakariakov V.M., Zimovets I.V. A statistical study of decaying kink oscillations detected using SDO/AIA. *Astron. and Astrophys.* 2016, vol. 585, id. A137, 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201527341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527341).

Golub L., Deluca E., Austin G., Bookbinder J., Caldwell D., Cheimets P., et al. The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission. *Solar Phys.* 2007, vol. 243, iss. 1, pp. 63–86. DOI: [10.1007/s11207-007-0182-1](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0182-1).

Gryciuk M., Siarkowski M., Sylwester J., Gburek S., Podgorski P., Kepa A., et al. Flare characteristics from X-ray light curves. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, iss. 6, id. 77, 19 p. DOI: [10.1007/s11207-017-1101-8](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1101-8).

Guo M.-Z., Chen S.-X., Li B., Xia L.-D., Yu H. Inferring flare loop parameters with measurements of standing sausage modes. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 3, pp. 877–896. DOI: [10.1007/s11207-016-0868-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0868-3).

Gurevich S.I. Once more about effect of geomagnetic storms on the relay protection. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya [Relay protection and automation]*. 2016, no. 2 (23), pp. 19–21. (In Russian).

Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R., Ireland J., Inglis A.R., Ryan D.F. Quasi-periodic pulsations during the impulsive and decay phases of an X-class flare. *The Astrophys. J. Lett.* 2016, vol. 827, iss. 2, id. L30, 6 p. DOI: [10.3847/2041-8205/827/2/L30](https://doi.org/10.3847/2041-8205/827/2/L30).

Hayes L.A., Gallagher P.T., McCauley J., Dennis B.R., Ireland J., Inglis A. Pulsations in the Earth's lower ionosphere synchronized with solar flare emission. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, iss. 10, pp. 9841–9847. DOI: [10.1002/2017JA024647](https://doi.org/10.1002/2017JA024647).

Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R., Ireland J., Inglis A., Morosan D.E. Persistent quasi-periodic pulsations during a large X-class solar flare. *The Astrophys. J.* 2019, vol. 875, iss. 1, id. 33, 11 p. DOI: [10.3847/1538-4357/ab0ca3](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0ca3).

Heinzel P., Avrett E.H. Optical-to-radio continua in solar flares. *Solar Phys.* 2012, vol. 277, iss. 1, pp. 31–44. DOI: [10.1007/s11207-011-9823-5](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9823-5).

Heinzel P., Kleint L. Hydrogen Balmer continuum in solar flares detected by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). *The Astrophys. J. Lett.* 2014, vol. 794, iss. 2, id. L23, 6 p. DOI: [10.1088/2041-8205/794/2/L23](https://doi.org/10.1088/2041-8205/794/2/L23).

Heinzel P., Shibata K. Can flare loops contribute to the white-light emission of stellar superflares? *The Astrophys. J.* 2018, vol. 859, iss. 2, id. 143, 7 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aabe78](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabe78).

Hnat B., Kolotkov D.Y., O'Connell D., Nakariakov V.M., Rowlands G. Nonlinear waves in the terrestrial quasiparallel foreshock. *Phys. Rev. Lett.* 2016, vol. 117, id. 235102. DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.235102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.235102).

Holman G.D., Sui L., Schwartz R.A., Emslie A.G. Electron bremsstrahlung hard X-ray spectra, electron distributions, and energetics. *The Astrophys. J.* 2003, vol. 595, iss. 2, pp. L97–L101. DOI: [10.1086/378488](https://doi.org/10.1086/378488).

Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev. Geophys.* 2008, vol. 46, iss. 2, Id. RG2006. DOI: [10.1029/2007RG000228](https://doi.org/10.1029/2007RG000228).

Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Royal Soc. London Proc. Ser. A* 1998, vol. 454, iss. 1971, pp. 903–998. DOI: [10.1098/rspa.1998.0193](https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193).

Hudson H.S. Chasing white-light flares. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 5, pp. 1273–1322. DOI: [10.1007/s11207-016-0904-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0904-3).

Hudson H.S., Canfield R.C., Kane S.R. Indirect estimation of energy deposition by non-thermal electrons in solar flares. *Solar Phys.* 1978, vol. 60, p. 137–142. DOI: [10.1007/BF00152338](https://doi.org/10.1007/BF00152338).

Inglis A.R., Nakariakov V.M. A multi-periodic oscillatory event in a solar flare. *Astron. and Astrophys.* 2009, vol. 493, iss. 1, pp. 259–266. DOI: [10.1051/0004-6361/200810473](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810473).

Inglis A.R., van Doorselaere T., Brady C.S., Nakariakov V.M. Characteristics of magnetoacoustic sausage modes. *Astron. and Astrophys.* 2009, vol. 503, iss. 2, pp. 569–575. DOI: [10.1051/0004-6361/200912088](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912088).

Inglis A.R., Ireland J., Dennis B.R., Hayes L., Gallagher P. A large-scale search for evidence of quasi-periodic pulsations in solar flares. *The Astrophys. J.* 2016, vol. 833, iss. 2, id. 284, 16 p. DOI: [10.3847/1538-4357/833/2/284](https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/284).

Jakimiec J., Tomczak M. Investigation of quasi-periodic variations in hard X-rays of solar flares. II. Further investigation of oscillating magnetic traps. *Solar Phys.* 2012, vol. 278, pp. 393–410. DOI: [10.1007/s11207-012-9934-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-9934-7).

Jelínek P., Karlický M., Van Doorselaere T., Bárta M. Oscillations excited by plasmoids formed during magnetic reconnection in a vertical gravitationally stratified current sheet. *The Astrophys. J.* 2017, vol. 847, iss. 2, id. 98, 15 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aa88a6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa88a6).

Jenkins A. Self-oscillation. *Phys. Rep.* 2013, vol. 525, pp. 167–222. DOI: [10.1016/j.physrep.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.10.007).

- Kane S.R., Kai K., Kosugi T., Enome S., Landecker P.B., McKenzie D.L. Acceleration and confinement of energetic particles in the 1980 June 7 solar flare. *The Astrophys. J.* 1983, vol. 271, pp. 376–387. DOI: [10.1086/161203](https://doi.org/10.1086/161203).
- Kashapova L.K., Tokhchukova S.K., Rudenko G.V., Bogod V.M., Muratov A.A. On the possible mechanisms of energy release in a C-class flare. *Cen. Europ. Astrophys. Bull.* 2013, vol. 37, pp. 573–583.
- Katsova M.M., Kitchatinov L.L., Livshits M.A., Moss D.L., Sokoloff D.D., Usoskin I.G. Can superflares occur on the Sun? A view from dynamo theory. *Astron. Rep.* 2018, vol. 62, iss. 1, pp. 72–80. DOI: [10.1134/S106377291801002X](https://doi.org/10.1134/S106377291801002X).
- Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A.M. A synchrotron/inverse Compton interpretation of a solar burst producing fast pulses at lambda less than 3-mm and hard X-rays. *Astron. and Astrophys.* 1986, vol. 157, pp. 11–18.
- Khaikin S.E., Kaidanovsky N.L., Pariisky Yu.N., Esepina N.A. Radio telescope RATAN-600. *Izvestiya Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove [Bulletin of the Main Astronomical Observatory at Pulkovo]*. 1972, vol. 188, pp. 3–12. (In Russian).
- Kim S., Nakariakov V.M., Shibasaki K. Slow magnetoacoustic oscillations in the microwave emission of solar flares. *The Astrophys. J. Lett.* 2012, vol. 756, iss. 2, id. L36, 5 p. DOI: [10.1088/2041-8205/756/2/L36](https://doi.org/10.1088/2041-8205/756/2/L36).
- Kislyakov A.G., Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S. On the possible connection between photospheric 5-min oscillation and solar flare microwave emission. *Solar Phys.* 2006, vol. 233, pp. 89–106. DOI: [10.1007/s11207-006-2850-y](https://doi.org/10.1007/s11207-006-2850-y).
- Kitchatinov L.L., Olemskoy S.V. Dynamo model for grand maxima of solar activity: can superflares occur on the Sun? *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016, vol. 459, iss. 4, pp. 4353–4359. DOI: [10.1093/mnras/stw875](https://doi.org/10.1093/mnras/stw875).
- Kliem B., Karlický M., Benz A.O. Solar flare radio pulsations as a signature of dynamic magnetic reconnection. *Astron. and Astrophys.* 2000, vol. 360, pp. 715–728.
- Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Kupriyanova E.G., Ratcliffe H., Shibasaki K. Multi-mode quasi-periodic pulsations in a solar flare. *Astron. and Astrophys.* 2015, vol. 574, id. A53, 6 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201424988](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424988).
- Kolotkov D.Y., Anfinogentov S.A., Nakariakov V.M. Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere. *Astron. and Astrophys.* 2016a, vol. 592, id. A153, 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201628306](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628306).
- Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Rowlands G. Nonlinear oscillations of coalescing magnetic flux ropes. *Phys. Rev. E.* 2016b, vol. 93, iss. 5, id. 053205. DOI: [10.1103/PhysRevE.93.053205](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.053205).
- Kolotkov D.Y., Pugh C.E., Broomhall A.-M., Nakariakov V.M. Quasi-periodic pulsations in the most powerful solar flare of cycle 24. *The Astrophys. J. Lett.* 2018, vol. 858, iss. 1, id. L3, 8 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aabde9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aabde9).
- Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., Tsap Y.T., Fleishman G.D., Stepanov A.V. Observation-driven model of the frequency rising sub-THz emission component in solar flares. *Astron. and Astrophys.* 2018, vol. 620, id. A95, 6 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201834124](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834124).
- Kopylova Yu.G., Stepanov A.V., Tsap Yu.T. Radial oscillations of coronal loops and microwave radiation from solar flares. *Astron. Lett.* 2002, vol. 28, iss. 11, pp. 783–791.
- Kopylova Yu.G., Melnikov A.V., Stepanov A.V., Tsap Yu.T., Goldvarg T.B. Oscillations of coronal loops and second pulsations of solar radio emission. *Astron. Lett.* 2007, vol. 33, iss. 10, pp. 706–713. DOI: [10.1134/S1063773707100088](https://doi.org/10.1134/S1063773707100088).
- Kotrč P., Procházka O., Heinzel P. New observations of Balmer continuum flux in solar flares. Instrument description and first results. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 3, pp. 779–789. DOI: [10.1007/s11207-016-0860-y](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0860-y).
- Kretzschmar M. The Sun as a star: observations of white-light flares. *Astron. and Astrophys.* 2011, vol. 530, id. A84, 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201015930](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015930).
- Kupriyanova E.G., Ratcliffe H. Minute pulsations in microwaves and X-rays during the flare on May 6, 2005. *Adv. Space Res.* 2016, vol. 57, iss. 7, pp. 1456–1467. DOI: [10.1016/j.asr.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.012).
- Kupriyanova E.G., Melnikov V.F., Nakariakov V.M., Shibasaki K. Types of microwave quasi-periodic pulsations in single flaring loops. *Solar Phys.* 2010, vol. 267, pp. 329–342. DOI: [10.1007/s11207-010-9642-0](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9642-0).
- Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Reid H.A.S., Myagkova I.N. Relationship of type III radio bursts with quasi-periodic pulsations in a solar flare. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 11, pp. 3427–3438. DOI: [10.1007/s11207-016-0958-2](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0958-2).
- Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Y.V. CORONAS-F satellite: Tasks for study of particle acceleration. *Adv. Space Res.* 2002, vol. 30, i. 7, pp. 1857–1863. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00462-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00462-3).
- 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.* 2016, vol. 291, iss. 11, pp. 3385–3426. DOI: [10.1007/s11207-016-0981-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0981-3).
- Lesovoi S., Altyntsev A., Kochanov A., Grechnev V., Gubin A., Zhdanov D., et al. Siberian Radioheliograph: first results. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1, pp. 3–18. DOI: [10.12737/article_58f96ec60fec52.86165286](https://doi.org/10.12737/article_58f96ec60fec52.86165286).
- Lin R.P., Hudson H.S. Non-thermal processes in large solar flares. *Solar Phys.* 1976, vol. 50, pp. 153–178. DOI: [10.1007/BF00206199](https://doi.org/10.1007/BF00206199).
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., Smith D.M., Zehnder A., Harvey P.R., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Solar Phys.* 2002, vol. 210, iss. 1, pp. 3–32. DOI: [10.1023/A:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870).
- Loukitcheva M., Solanki S.K., Carlsson M., Stein R.F. Millimeter observations and chromospheric dynamics. *Astron. and Astrophys.* 2004, vol. 419, pp. 747–756. DOI: [10.1051/0004-6361:20034159](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034159).
- Lysenko A.L., Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Zhdanov D., Fleishman G.D. Statistics of “cold” early impulsive solar flares in X-ray and microwave domains. *The Astrophys. J.* 2018, vol. 856, iss. 2, id. 111, 29 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aab271](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab271).
- Maehara H., Shibayama T., Notsu S., Notsu Y., Nagao T., Kusaba S., et al. Superflares on solar-type stars. *Nature.* 2012, vol. 485, iss. 7399, pp. 478–481. DOI: [10.1038/nature11063](https://doi.org/10.1038/nature11063).
- Maehara H., Shibayama T., Notsu Y., Notsu S., Honda S., Nogami D., et al. Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data. *Earth, Planets and Space.* 2015, vol. 67, id. 59, 10 p. DOI: [10.1186/s40623-015-0217-z](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z).
- Masuda S., Shimojo M., Kawate T., Ishikawa S., Ohno M. Extremely microwave-rich solar flare observed with Nobeyama Radioheliograph. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013, vol. 65, iss. SP1, id. S1, 6 p. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S1](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S1).
- McLaughlin J.A., Hood A.W., de Moortel I. Review article: MHD wave propagation near coronal null points of magnetic fields. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 158, iss. 2–4, pp. 205–236. DOI: [10.1007/s11214-010-9654-y](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9654-y).
- McLaughlin J.A., Nakariakov V.M., Dominique M., Jelínek P., Takasao S. Modelling quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. *Space Sci. Rev.* 2018, vol. 214, id. 45, 54 p. DOI: [10.1007/s11214-018-0478-5](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0478-5).
- Mészárosová H., Karlický M., Rybák J., Jiříčka K. Tadpoles in wavelet spectra of a solar decimetric radio burst. *The Astrophys. J. Lett.* 2009, vol. 697, iss. 2, pp. L108–L110. DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/L108](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/L108).
- Murray M. J., van Driel-Gesztelyi L., Baker D. Simulations of emerging flux in a coronal hole: oscillatory reconnection. *Astron. and Astrophys.* 2009, vol. 494, iss. 1, pp. 329–337. DOI: [10.1051/0004-6361:200810406](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810406).

Nagovitsyn Yu.A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past. *The Astron. Lett.* 1997, vol. 23, iss. 6, pp. 742–748.

Nakajima H., Sekiguchi H., Aiba S., Shiomi Y., Kuwabara T., Sawa M., et al. A new 17-GHz solar radio interferometer at Nobeyama. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1980, vol. 32, pp. 639–650.

Nakajima H., Kosugi T., Kai K., Enome S. Successive electron and ion accelerations in impulsive solar flares on 7 and 21 June 1980. *Nature.* 1983, vol. 305, pp. 292–294, DOI: [10.1038/305292a0](https://doi.org/10.1038/305292a0).

Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., Kai K., Kawashima S. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1985, vol. 37, pp. 163–170.

Nakariakov V.M., Melnikov V.F. Quasi-periodic pulsations in solar flares. *Space Sci. Rev.* 2009, vol. 149, iss. 1–4, pp. 119–151. DOI: [10.1007/s11214-009-9536-3](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9536-3).

Nakariakov V.M., Zimovets I.V. Slow magnetoacoustic waves in two-ribbon flares. *The Astrophys. J. Lett.* 2011, vol. 730, iss. 2, id. L27, 4 p. DOI: [10.1088/2041-8205/730/2/L27](https://doi.org/10.1088/2041-8205/730/2/L27).

Nakariakov V.M., Foullon C., Verwichte E., Young N.P. Quasi-periodic modulation of solar and stellar flaring emission by magnetohydrodynamic oscillations in a nearby loop. *Astron. and Astrophys.* 2006, vol. 452, iss. 1, pp. 343–346. DOI: [10.1051/0004-6361/20054608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/20054608).

Nakariakov V.M., Foullon C., Myagkova I.N., Inglis A.R. Quasi-periodic pulsations in the gamma-ray emission of a solar flare. *The Astrophys. J. Lett.* 2010a, vol. 708, L47–L51. DOI: [10.1088/2041-8205/708/1/L47](https://doi.org/10.1088/2041-8205/708/1/L47).

Nakariakov V.M., Inglis A.R., Zimovets I.V., Foullon C., Verwichte E., Sych R., et al. Oscillatory processes in solar flares. *Plasma Phys. and Controlled Fusion.* 2010b, vol. 52, iss. 12, id. 124009. DOI: [10.1088/0741-3335/52/12/124009](https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/12/124009).

Nakariakov V.M., Hornsey C., Melnikov V.F. Sausage oscillations of coronal plasma structures. *The Astrophys. J.* 2012, vol. 761, iss. 2, id. 134, 6 p. DOI: [10.1088/0004-637X/761/2/134](https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/2/134).

Nakariakov V.M., Pilipenko V., Heilig B., Jelínek P., Karlický M., Klimushkin D.Y., et al. Magnetohydrodynamic oscillations in the solar corona and Earth's magnetosphere: Towards consolidated understanding. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 200, pp. 75–203. DOI: [10.1007/s11214-015-0233-0](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0233-0).

Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., Mehta T., Pugh C.E., Lee D.-H., et al. Non-stationary quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. *Plasma Phys. and Controlled Fusion* 2019, vol. 61, id. 014024. DOI: [10.1088/1361-6587/aad97c](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad97c).

Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *The Astrophys. J.* 1968, vol. 153, p. L59. DOI: [10.1086/180220](https://doi.org/10.1086/180220).

Pascoe D.J., Russell A.J.B., Anfinogentov S.A., Simões P.J.A., Goddard C.R., Nakariakov V.M., et al. Seismology of contracting and expanding coronal loops using damping of kink oscillations by mode coupling. *Astron. and Astrophys.* 2017, vol. 607, id. A8, 9 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201730915](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730915).

Penn M., Krucker S., Hudson H., Jhabvala M., Jennings D., Lunsford A., et al. Spectral and imaging observations of a white-light solar flare in the mid-infrared. *The Astrophys. J. Lett.* 2016, vol. 819, iss. 2, id. L30, 5 p. DOI: [10.3847/2041-8205/819/2/L30](https://doi.org/10.3847/2041-8205/819/2/L30).

Pugh C.E., Nakariakov V.M., Broomhall A.-M. A multi-period oscillation in a stellar superflare. *The Astrophys. J. Lett.* 2015, vol. 813, iss. 1, id. L5, 5 p. DOI: [10.1088/2041-8205/813/1/L5](https://doi.org/10.1088/2041-8205/813/1/L5).

Pugh C.E., Broomhall A.-M., Nakariakov V.M. Significance testing for quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. *Astron. and Astrophys.* 2017a, vol. 602, id. A47, 8 p., DOI: [10.1051/0004-6361/201730595](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730595).

Pugh C.E., Nakariakov V.M., Broomhall A.-M., Bogomolov A.V., Myagkova I.N. Properties of quasi-periodic pulsations in solar flares from a single active region. *Astron. and Astrophys.* 2017b, vol. 608, id. A101, 23 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201731636](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731636).

Reva A., Shestov S., Zimovets I., Bogachev S., Kuzin S. Wave-like formation of hot loop arcades. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 10, pp. 2909–2921. DOI: [10.1007/s11207-015-0769-x](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0769-x).

Reznikova V.E., Shibasaki K. Flare quasi-periodic pulsations with growing periodicity // *Astron. Astrophys.* 2011, vol. 525, id. A112, 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201015600](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015600)

Reznikova V.E., Nakariakov V.M., Melnikov V.F., Shibasaki K. Diagnostics of MHD-oscillation modes of a flaring loop using microwave observations with high spatial resolution. *Proceedings of the 11th European Solar Physics Meeting "The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations" (ESA SP-600). 11–16 September 2005, Leuven, Belgium.* 2005. id. 140.1, 4 p.

Ryutov D.A., Ryutova M.P. Sound oscillations in a plasma with "magnetic filaments". *J. Exper. and Theor. Phys.* 1976, vol. 43, p. 491–497.

Saint-Hilaire P., Benz A.O., Monstein C. Short-duration radio bursts with apparent extragalactic dispersion. *The Astrophys. J.* 2014, vol. 795, iss. 1, id. 19, 6 p. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/19](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/19).

Sakai J.I., Nagasugi Y., Saito S., Kaufmann P. Simulating the emission of electromagnetic waves in the terahertz range by relativistic electron beams. *Astron. and Astrophys.* 2006, vol. 457, pp. 313–318. DOI: [10.1051/0004-6361:20065368](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065368).

Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., Hoeksema J.T., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, iss. 1–2, pp. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).

Shibasaki K. High-Beta disruption in the solar atmosphere. *The Astrophys. J.* 2001, vol. 557, pp. 326–331. DOI: [10.1086/321651](https://doi.org/10.1086/321651).

Shibayama T., Maehara H., Notsu S., Notsu Y., Nagao T., Honda S., et al. Superflares on solar-type stars observed with Kepler. I. Statistical properties of superflares. *The Astrophys. J. Suppl.* 2013, vol. 209, iss. 1, id. 5, 13 p. DOI: [10.1088/0067-0049/209/1/5](https://doi.org/10.1088/0067-0049/209/1/5).

Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., Costa J.E.R., de Castro C.G.G., Raulin J.-P., et al. Evidence that synchrotron emission from nonthermal electrons produces the increasing sub-millimeter spectral component in solar flares. *Solar Phys.* 2007, vol. 245, pp. 311–326. DOI: [10.1007/s11207-007-9044-0](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9044-0).

Simões P.J.A., Hudson H.S., Fletcher L. Soft X-ray pulsations in solar flares. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 12, pp. 3625–3639. DOI: [10.1007/s11207-015-0691-2](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0691-2).

Somov B. V. Magnetic reconnection in solar flares. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in Physical Sciences. Physics-Uspekhi]*, 2010, vol. 180, pp. 997–1000. (In Russian).

Stepanov A.V., Kopylova Yu.G., Tsap Yu.T., Kupriyanova E.G. Oscillations of optical emission from flare stars and coronal loop diagnostics. *Astron. Lett.* 2005, vol. 31, iss. 9, pp. 612–619, DOI: [10.1134/1.2039972](https://doi.org/10.1134/1.2039972).

Su J.T., Shen Y.D., Liu Y. Extreme-ultraviolet multi-wavelength observations of quasi-periodic pulsations in a solar post-flare cusp-shape loop with SDO/AIA. *The Astrophys. J.* 2012, vol. 754, iss. 1, id. 43, 8 p., DOI: [10.1088/0004-637X/754/1/43](https://doi.org/10.1088/0004-637X/754/1/43).

- Švestka Z. Optical observations of solar flares. *Space Sci. Rev.* 1966, vol. 5, iss. 3, pp. 388–418. DOI: [10.1007/BF02653250](https://doi.org/10.1007/BF02653250).
- Tajima T., Sakai J., Nakajima H., Kosugi T., Brunel F., Kundu M.R. Current loop coalescence model of solar flares. *The Astrophys. J.* 1987, vol. 321, pp. 1031–1048. DOI: [10.1086/165694](https://doi.org/10.1086/165694).
- Takasao S., Shibata K. Above-the-loop-top oscillation and quasi-periodic coronal wave generation in solar flares. *The Astrophys. J.* 2016, vol. 823, iss. 2, id. 150, 11 p. DOI: [10.3847/0004-637X/823/2/150](https://doi.org/10.3847/0004-637X/823/2/150).
- Tan B., Yu Z., Huang J., Tan C., Zhang Y. Very long-period pulsations before the onset of solar flares. *The Astrophys. J.* 2016, vol. 833, iss. 2, id. 206, 6 p. DOI: [10.3847/1538-4357/833/2/206](https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/206).
- Tapping K.F. A torsional wave model for solar radio pulsations. *Solar Phys.* 1983, vol. 87, iss. 1, pp. 177–186. DOI: [10.1007/BF00151168](https://doi.org/10.1007/BF00151168).
- Thurgood J.O., Pontin D.I., McLaughlin J.A. On the periodicity of linear and nonlinear oscillatory reconnection. *Astron. and Astrophys.* 2019, vol. 621, id. A106, 12 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201834369](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834369).
- Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998, vol. 79, pp. 61–78. DOI: [10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Trottet G., Raulin J.-P., MacKinnon A., Giménez de Castro G., Simões P.J.A., Cabezas D., et al. Origin of the 30 THz emission detected during the solar flare on 2012 March 13 at 17:20 UT. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 10, pp. 2809–2826. DOI: [10.1007/s11207-015-0782-0](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0782-0).
- Tsap Yu. T., Stepanov A.V., Kopylova Yu.G., Zhilyaev B.E. Diagnostics of a flare on EQ Peg B from optical pulsations. *Astron. Lett.* 2011, vol. 37, iss. 1, pp. 49–54. DOI: [10.1134/S10663773710101032](https://doi.org/10.1134/S10663773710101032).
- Tsap Y.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Nagnibeda V.G., et al. Millimeter and X-ray emission from the 5 July 2012 solar flare. *Solar Phys.* 2018, vol. 293, 15 p. DOI: [10.1007/s11207-018-1269-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1269-6).
- Van Doorselaere T., Nakariakov V.M., Verwichte E. Detection of waves in the solar corona: kink or Alfvén? *The Astrophys. J. Lett.* 2008, vol. 676, pp. L73–L75. DOI: [10.1086/587029](https://doi.org/10.1086/587029).
- Van Doorselaere T., De Groof A., Zender J., Berghmans D., Goossens M. LYRA observations of two oscillation modes in a single flare. *The Astrophys. J.* 2011, vol. 740, id. 90, 8 p. DOI: [10.1088/0004-637X/740/2/90](https://doi.org/10.1088/0004-637X/740/2/90).
- Van Doorselaere T., Kupriyanova E.G., Yuan D. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: an overview of recent results (Invited Review). *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 11, pp. 3143–3164. DOI: [10.1007/s11207-016-0977-z](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0977-z).
- Vaughan S. A simple test for periodic signals in red noise. *Astron. and Astrophys.* 2005, vol. 431, pp. 391–403. DOI: [10.1051/0004-6361:20041453](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041453).
- Wang T., Innes D.E., Qiu J. Determination of the coronal magnetic field from hot-loop oscillations observed by SUMER and SXT. *Astron. and Astrophys. J.* 2007, vol. 656, iss. 1, pp. 598–609. DOI: [10.1086/510424](https://doi.org/10.1086/510424).
- Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., Hudson H., Fleishman G., Loukitcheva M., et al. Solar science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array — a new view of our Sun. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 200, iss. 1–4, pp. 1–73. DOI: [10.1007/s11214-015-0229-9](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0229-9).
- Xu Y., Cao W., Liu C., Yang G., Qiu J., Jing J., et al. Near-infrared observations at 1.56 microns of the 2003 October 29 X10 white-light flare. *The Astrophys. J.* 2004, vol. 607, iss. 2, pp. L131–L134. DOI: [10.1086/422099](https://doi.org/10.1086/422099).
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V. To the nature of the pulsations of the solar type IV radio bursts. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa [Research on geomagnetism, aeronomy and solar physics]*. 1975, no. 37, p. 3. (In Russian).
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V. On the origin of solar hard X-ray pulsations. *Soviet Astronomy Letters*. 1982, vol. 8, p. 132.
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Coronal magnetic loops. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in Physical Sciences. Physics-Uspekhi]*. 2008, vol. 51, no. 11, pp. 1123–1160. DOI: [10.1070/PU2008v051n11ABEH006657](https://doi.org/10.1070/PU2008v051n11ABEH006657). (In Russian).
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kaufmann P. On the origin of pulsations of sub-THz emission from solar flares. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, pp. 3017–3032. DOI: [10.1007/s11207-014-0515-9](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0515-9).
- Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V. Rayleigh–Taylor instability and excitation of super-Dreicer electric fields in the solar chromosphere. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, pp. 3451–3459. DOI: [10.1007/s11207-016-0983-1](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0983-1).
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 1, pp. 287–294. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).
- URL: <https://legacy.helioviewer.org/> (accessed November 11, 2019).
- URL: <http://sdc.uio.no/sdc/> (accessed November 11, 2019).
- URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/doc/manuale.pdf> (accessed November 11, 2019).

Как цитировать эту статью

Куприянова Е.Г., Колотков Д.Ю., Накаряков В.М., Кауфман А.С. Квазипериодические пульсации в солнечных и звездных вспышках. *Обзор. Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 6, № 1. С. 3–29. DOI: [10.12737/szf-61202001](https://doi.org/10.12737/szf-61202001).