

УДК 523.985.3-14:52-73/74

ФАЗЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МНОГОВОЛНОВОГО АНАЛИЗА ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ Х3.2-КЛАССА 14 МАЯ 2013 ГОДА

© 2026 И. Н. Шарыкин^{1*}, И. В. Зимовец¹, Н. С. Мешалкина²¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, 117997 Россия²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, 664033 Россия

Поступила в редакцию 21 мая 2025 года; после доработки 15 августа 2025 года; принята к публикации 29 августа 2025 года

Работа посвящена исследованию предвспышечных процессов перед эруптивной солнечной вспышкой класса Х3.2, произошедшей 14 мая 2013 г. Данное событие было выбрано из-за удачного расположения возле лимба Солнца, ярко выраженной предвспышечной фазы и наличия качественных наблюдательных данных Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly (SDO/AIA), Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI), Nobeyama Radio Heliograph (NoRH) и Siberian Solar Radio Telescope (SSRT). Основной целью является поиск триггеров эрупции и детальное многоволновое исследование свойств предвспышечного энерговыделения. В этом исследовании мы рассматриваем предвспышечный интервал времени длительностью около полутора часов. Предвспышечная фаза для выбранного события с точки зрения временной динамики состоит из двух стадий. В первой стадии наблюдается квазистационарный компактный источник рентгеновского излучения в диапазоне 5–25 кэВ. При этом радиоисточники также достаточно стабильны и их центры совпадают с рентгеновским центром яркости. Затем происходит резкий всплеск (зафиксировано нетепловое излучение вплоть до 100 кэВ) и последующий рост интенсивности излучения в широком спектре. Наблюдаемые источники являются нестационарными. Вторая стадия после всплеска длится около одного часа. При этом источники расширяются и мы видим рост системы корональных петель. Затем происходит эрупция и вспышка. Стоит отметить, что триггерный всплеск (ТВ) между первой и второй предвспышечными стадиями был связан с очень компактным рентгеновским источником и сильным уярчением во всех доступных каналах ультрафиолетового (ЭУФ, УФ) диапазона. Для определения структуры магнитного поля на уровне фотосферы используются векторные магнитограммы, полученные инструментом Helioseismic Magnetic Imager/Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO) показал, что предвспышечное энерговыделение и ТВ были локализованы вблизи нейтральной линии. Также были проведены оценки термодинамических параметров вспышечной плазмы, энергии ускоренных электронов, тепловой энергии предвспышечной плазмы по результатам анализа микроволновых и рентгеновских спектров. Полученные микроволновые спектры хорошо объясняются гиросихротронным спектром протяженного источника, связанного с высокими петлями и температурой плазмы $T \approx 5-7$ МК, компактным источником в нижних петлях ($T \approx 10-20$ МК) и тормозным излучением на частотах 17–34 ГГц. В целом рентгеновские данные по компактному источнику хорошо согласуются с наблюдаемым радиоизлучением.

Ключевые слова: Солнце: активность — Солнце: вспышки — Солнце: корональные выбросы массы (СМЕ) — Солнце: корона — Солнце: радиоизлучение — Солнце: рентгеновские лучи, гамма-лучи — Солнце: УФ-излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск предвестников (или прекурсоров) различных масштабных природных явлений является универсальной парадигмой их прогнозирования и, соответственно, детектирования очага будущего энерговыделения и, при возможности — оценки

его мощности. Самый яркий пример — это поиск предвестников землетрясений и извержений вулканов. Аналогичные задачи ставятся и в физике Солнца применительно к самым масштабным явлениям солнечной активности, влияющим на космическую погоду. Речь идет о поиске предвестников солнечных вспышек и корональных выбросов массы (КВМ). В особенности важно понять, ка-

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

кие типы предвестников характерны для наиболее геоэффективных солнечных вспышек, сопровождающихся протонными возрастаниями и мощными КВМ.

Далее мы приведем достаточно обширный обзор литературы в разделах 1.2–1.3, а также опишем цели и задачи нашего исследования. Мы считаем, что большое введение для данной исследовательской статьи необходимо, поскольку на сегодняшний день существует негласное мнение о том, что предвспышечные процессы достаточно неплохо изучены. Дальнейшим повествованием мы хотим обозначить белые пятна в этой теме, а также указать на проблемы, возникающие при изучении предвспышечного энерговыделения, которые побудили нас взяться за данное исследование.

1.1. Понятие предвестников солнечных вспышек и их возможные особенности в некоторых моделях вспышек

Прежде чем начать обзор литературы по теме, следует дать определение предвестников. В действительности, перед вспышкой энерговыделение в активной области (АО) может быть как причинно связанным с будущей вспышкой, так и просто фоновым процессом. «Предвестниками» (также будем использовать более общий термин — «предвспышечное энерговыделение») солнечных вспышек мы называем комплекс явлений в АО, наблюдаемых до начала вспышки, свидетельствующих о формировании предвспышечной нестабильной конфигурации магнитных структур в атмосфере Солнца, которые в будущем в результате некоторой неустойчивости инициируют солнечную вспышку. Другими словами, предвестники указывают на формирование на ранних стадиях (до начала потери устойчивости) некоторой нестабильной ситуации в замагниченной атмосфере Солнца с избытком магнитной энергии. Стоит отметить, что предвспышечное энерговыделение и соответствующие предвестники могут рассматриваться на разных интервалах времени (доступных наблюдениям), предшествующих солнечной вспышке, а также на разных пространственных масштабах при разумном ограничении размерами родительской АО (в этой работе мы не рассматриваем более специфические ситуации, такие как симпатические вспышечные события, которые могут происходить в разных АО).

С точки зрения физики разумно предположить, что энерговыделение предвестников, как и солнечных вспышек, прежде всего связано с динамикой магнитного поля в солнечной атмосфере. Особенности динамики магнитного поля также можно рассматривать как предвестники будущих солнечных вспышек. Однако мы в данной работе

будем понимать под предвестниками особенности динамики различных типов излучений в конкретной АО, отражающие энерговыделение перед солнечными вспышками. Особенности предвспышечного энерговыделения в контексте предвестников должны определяться топологией магнитного поля и механизмами, ответственными за формирование неустойчивых конфигураций магнитного поля. На сегодняшний день существует множество моделей солнечных вспышек (см. например, Aschwanden, 2005). Приведем несколько примеров, на базе которых обсудим предвспышечное энерговыделение (предвестники) и его проявление в наблюдениях.

Согласно стандартной модели (СМ) эруптивной двухленточной солнечной вспышки (Hirayama, 1974; Magara et al., 1996; Tsuneta, 1997) начало энерговыделения связывают с потерей устойчивости скрученного магнитного жгута, вытянутого вдоль нейтральной линии (НЛ). В результате взаимодействия выбрасываемого жгута с внешним магнитным полем происходит формирование квазивертикального токового слоя (ТС в формирующейся X-точке) под жгутом в каспе, где за счет магнитного пересоединения инициируется вспышечное энерговыделение. В рамках СМ предвестники представляют собой проявления развития нестабильности магнитного жгута на фазе медленного подъема перед эрупцией, что часто наблюдается перед эруптивными вспышками (например, Mitra and Joshi, 2019).

Другой известной физической моделью с касповой геометрией является модель солнечной вспышки с турбулентным сверхгорячим ТС (Somov and Kosugi, 1997). Внутри ТС рассматривается сверхгорячая турбулентная плазма (выше стандартных 10–20 МК и вплоть до около 100 МК). Причем формирование горячего ТС может происходить перед вспышкой, например, в результате взаимодействие двух магнитных потоков. В рамках такой модели прекурсорами могут быть эпизоды энерговыделения внутри рассматриваемого ТС. Кроме того, измерения рентгеновских спектров должны показывать наличие очень высоких температур и больших нетепловых уширений горячих УФ-линий (по аналогии с Jeffrey et al., 2018).

Развитие понимания механизмов солнечной вспышки было связано с созданием трехмерных моделей. В частности, существуют обобщения выше представленных двумерных моделей на трехмерное пространство (например, Janvier, 2017). Мы не будем подробно обсуждать такие модификации моделей, так как прекурсоры должны возникать примерно одинаковым образом в двумерном и трехмерном случаях. Однако мы обсудим одну из популярных трехмерных моделей эруптивной солнечной вспышки, связанной со взаимодействием магнитных петель с большим широм

и магнитным скрученным жгутом, вытянутым вдоль НЛ.

Одним из возможных сценариев трехмерного магнитного пересоединения на Солнце, ответственного за вспышечное энерговыделение, является пересоединение в скрученных магнитных жгутах, вытянутых вдоль НЛ. Перестройка магнитного поля происходит в токовых слоях, в которых магнитное поле заведомо не является нулевым. Такой механизм обсуждался в работах Gordovskyy and Browning (2011), Pinto et al. (2016). В рамках данной модели токовые слои формируются фрагментарно во всем объеме магнитного жгута. Поэтому предвестники должны выглядеть в виде уярчений и филаментации вдоль магнитного жгута. Возможно, явным образом обнаружить в наблюдениях такое поведение прекурсоров будет непросто из-за сложной неоднородной структуры магнитных жгутов и особенностей движений в фотосфере, запутывающих магнитное поле в короне. Скорее всего, в скрученных магнитных жгутах пересоединение инициируется между отдельными взаимодействующими скрещенными магнитными трубками с большим широм. Такая ситуация, например, наблюдается в виде взаимодействия магнитных трубок около НЛ, формирующих сигмоид, часто видимый в горячих экстремальных ультрафиолетовых (ЭУФ) каналах и мягком рентгеновском излучении. В рамках такой геометрии рассматривается магнитное пересоединение, которое называют в литературе *tether-cutting magnetic reconnection* (TCMR) (Moore et al., 2001).

В рамках TCMR токовый слой формируется в области некоторой сепаратрисной поверхности (вблизи области взаимодействия различных групп магнитных петель), вдоль которой существует тангенциальный разрыв магнитного поля. Именно в данной области может начать развиваться магнитное пересоединение в условиях ненулевого магнитного поля. В результате TCMR происходит формирование силовых линий магнитного поля, вытянутых вдоль НЛ, которые взаимодействуют с вышележащей аркадой магнитного поля. Если процесс пересоединения достаточно медленный, то в результате TCMR может происходить постепенное формирование скрученного магнитного жгута и его видимый подъем (что можно рассматривать как предвестник), который в некоторый момент может стать эруптивным и инициировать солнечную вспышку в рамках СМ. Если пересоединение носит взрывной характер, то вспышка инициируется без продолжительной фазы подготовки эруптивного жгута (Liu et al., 2013; Sharykin et al., 2017). В указанных случаях предвестники должны быть связаны с активным взаимодействием двух систем скрещенных магнитных петель и формированием ТС в области их контакта над НЛ, результатом чего

будет либо формирование неустойчивого жгута, либо взрывной сброс магнитной энергии в виде нагрева плазмы и ускорения частиц без развития эрупции.

В данной работе на примере отдельного события (выбранного согласно определенным критериям, перечисленным ниже) мы будем исследовать потоки предвспышечного излучения и его источники в АО в разных диапазонах электромагнитного (ЭМ) спектра. Предвестники можно пытаться классифицировать по спектральному диапазону и физическому механизму формирования излучения. Мы упомянем в следующем разделе отдельные предвспышечные явления в тех диапазонах длин волн, которые будут использоваться в нашей работе, а именно: в УФ, рентгеновском и микроволновом диапазонах.

1.2. Предвестники в разных диапазонах электромагнитного спектра

Отметим общее свойство всего предвспышечного энерговыделения, следующего из структуры замагниченной солнечной атмосферы. Предвестники, как источники излучения, могут быть связаны с двумя условными областями в солнечной атмосфере, в которых могут быть локализованы разные магнитоплазменные структуры: корона (например, корональные петли) и нижние слои атмосферы (фотосфера—хромосфера—переходная зона), в которых находятся основания магнитных петель. Излучение в нижних слоях может быть связано с потоками энергии из короны (например, тепловые потоки, ускоренные электроны, МГД волны). Поэтому очень важно при анализе многоволновых наблюдений принимать во внимание структуру магнитного поля, чтобы оценить направление потоков энергии в виде ускоренных частиц, течения вещества и тепловых потоков из короны вниз (или наоборот) с целью локализации места предвспышечного энерговыделения и эруптивной магнитной структуры. Далее мы опишем основные проявления предвспышечной активности в АО, наблюдаемой в УФ, рентгеновском и микроволновом диапазонах.

УФ-излучение в большей степени является тепловым и связано с нагревом плазмы. Часто УФ-всплески наблюдаются в виде небольших солнечных вспышек (от слабых вспышек класса С до совсем небольших актов энерговыделения), коррелируя с мягким рентгеновским излучением горячей тепловой плазмы. В некоторых работах показано, что перед вспышками наблюдаются достаточно яркие уярчения в окрестности будущего места энерговыделения (например, Chifor et al., 2006, 2007; Joshi et al., 2011; Vamba et al., 2017). В работе Chifor et al. (2006) было сделано предположение, что уярчение — есть локальное

магнитное пересоединение, которое дестабилизирует эруптивный магнитный жгут (хотя почему не наоборот?). Также уярчения могут являться множеством актов магнитного пересоединения (Chifor et al., 2007) в рамках модели *tether-cutting* (Moore et al., 2001), при постепенном формировании эруптивного магнитного жгута. Joshi et al. (2011) нашли связь между всплытием магнитного потока и наблюдавшимися уярчениями. Возможно, взаимодействие данного потока с фоновым магнитным полем являлось триггером цепи мелкомасштабных магнитных пересоединений. Для рентгеновского (например, Tappin, 1991; Fárnik and Savy, 1998; Chifor et al., 2006; Zimovets et al., 2022; Shohin et al., 2024) и микроволнового (Kai et al., 1983; Vakunina et al., 2020a,b; Abramov-Maximov and Vakunina, 2022) диапазонов также было показано, что отдельные предвспышечные источники излучения могут быть расположены в области будущего места энерговыделения.

Кроме относительно локализованных и быстротечных уярчений наблюдаются квазистационарные горячие источники в виде так называемых горячих каналов (например, Cheng et al., 2014; Hernandez-Perez et al., 2019; Sharykin et al., 2020). В работе Nindos et al. (2015) статистически подтверждено что в половине эруптивных солнечных вспышек к моменту инициации выброса появлялся горячий канал по данным AIA 131 Å. Установлено, что данный тип источников УФ-излучения связан с эруптивным магнитным жгутом (Cheng et al., 2014). Наличие горячего канала, вытянутого вдоль НЛ, было продемонстрировано Sharykin et al. (2020) в предвспышечной фазе (за час до вспышки) для замкнутой вспышки класса M1.2 15 марта 2015 г. В работе, по результатам нелинейной бесспиновой экстраполяции магнитного поля, было показано, что горячий канал связан с низкой (менее 4 Мм над фотосферой) магнитной структурой с очень большим широм. Обсуждалось, что сильный нагрев в канале может возникнуть в результате медленного магнитного пересоединения в рамках геометрии TCMR.

Спектроскопия различных УФ-линий выявляет их нетепловые уширения и доплеровские смещения, которые могут быть связаны с активизацией турбулентных течений в предвспышечных магнитных структурах. Baker et al. (2012) нашли усиление течений плазмы ($13\text{--}20\text{ км с}^{-1}$) перед КВМ по данным Hinode EIS¹⁾ в горячих линиях железа. В работе Baker et al. (2012) обсуждаются восходящие течения плазмы с разной температурой со скоростями около 100 км с^{-1} (по данным EIS и IRIS²⁾)

в ярких локальных источниках вблизи НЛ перед солнечной вспышкой X-класса. Данные выбросы плазмы, скорее всего, связаны с формированием джетов в результате локального магнитного пересоединения, связанного со всплытием магнитного потока вблизи НЛ. Также сильные течения горячей плазмы в УФ-линиях в прекурсорах отмечались в ряде работ (Wallace et al., 2010; Dudík et al., 2016; Zhou et al., 2016; Woods et al., 2017; Huang et al., 2019). В последней статье обсуждались наблюдения очень интенсивных, локальных и транзитных течений со скоростями вплоть до 200 км с^{-1} , которые опять же могут быть связаны с магнитным пересоединением.

Как отмечалось выше, признаком подготавливаемой эрупции является медленный подъем эруптивного филамента в АО (например, Ohyama and Shibata, 1997; Zhang et al., 2012, 2015; Wu et al., 2016; Mitra and Joshi, 2019). Данные движения часто регистрируются визуально на временной последовательности изображения путем построения диаграмм «время—расстояние» и видны обычно на временных масштабах от нескольких минут до нескольких десятков минут. Отдельно хочется отметить работу Wu et al. (2016), в которой предвспышечный рост эруптивного филамента сопровождался течениями горячей плазмы, косвенно свидетельствующими о магнитном пересоединении накануне вспышки.

Обобщая имеющиеся результаты по прекурам солнечных вспышек, можно сформулировать следующие общие моменты поведения предвспышечного энерговыделения. Течения плазмы над фотосферой в предвспышечной фазе можно разделить на два вида (граница достаточно условна): низкоскоростные ($10\text{--}50\text{ км с}^{-1}$) и высокоскоростные (более 50 км с^{-1}). Первый тип течений может быть связан с медленным движением магнитных структур (например, подъемом филамента из-за его роста или в случае потери устойчивости) или же хромосферным испарением, инициированным вялотекущим нагревом плазмы. Нагрев может быть связан с потоком энергии (тепловые потоки или слабые потоки ускоренных электронов с энергиями обычно до нескольких десятков кэВ, редко до величины примерно 100 кэВ и выше (Zimovets et al., 2009), согласно данным наблюдений жесткого рентгеновского излучения) из области будущего первоначального энерговыделения солнечной вспышки. Плазма может нагреваться также и за счет турбулентности или диссипации электрических токов. Высокоскоростные течения в прекурсорах могут быть результатом формирования джетов при магнитном пересоединении либо могут возникать при взрывном хромосферном испарении за счет мощных потоков ускоренных электронов, высыпающихся в хромосферу. Вообще

¹⁾Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer

²⁾Interface Region Imaging Spectrograph

говоря, чтобы ответить, какой именно механизм реализуется, необходимо проводить моделирование энерговыделения в прекурсорах, а также более детальные наблюдательные исследования отдельных событий.

Косвенным образом факт предвспышечного магнитного пересоединения подтверждается наблюдением теплового рентгеновского излучения. Спектральный анализ рентгеновского излучения отдельных прекурсоров—всплесков (Asai et al., 2006; Chifor et al., 2006, 2007; Joshi et al., 2011; Awasthi et al., 2014; Tan et al., 2016; Awasthi et al., 2018a,b; Hernandez-Perez et al., 2019; Liu et al., 2022) показал появление горячей плазмы с температурой более 10 МК. Статистический анализ изображений источников предвестников впервые был сделан по данным телескопов мягкого рентгеновского излучения HXIS/SMM³⁾ (Tappin, 1991) и SXT/Yohkoh⁴⁾ (Fárník and Savy, 1998). Было установлено, что локализация источников мягкого рентгеновского излучения предвестников пространственно совпадала в пределах нескольких угловых секунд с месторасположением рентгеновских источников последующих солнечных вспышек. В результате такого сравнения была проведена классификация прекурсоров: совпадающие, частично перекрывающиеся и полностью несовпадающие.

Микроволновое радиоизлучение является магнитотормозным излучением умеренно релятивистских электронов с энергией более 100 кэВ. Kai et al. (1983) показали, что для половины событий на частоте 17 ГГц с пиковым потоком более 500 единиц солнечного потока наблюдается наличие прекурсоров. Wang et al. (2017) исследовали предвспышечную фазу солнечной вспышки М-класса 22 июня 2015 г. в оптическом диапазоне $H\alpha$ и радиоизлучении в диапазоне частот 1–18 ГГц, по данным eOVSA⁵⁾. Наблюдалось два микроволновых радиовсплеска на динамических спектрах. Для объяснения наблюдаемых тепловых гиротронных спектров необходимо рассматривать магнитные поля 500–1000 Гс в однородном радиоисточнике, которые характерны для низко лежащих магнитных структур. При этом показано, что максимальное значение магнитного поля было в начале всплеска. Затем источник перемещался в более слабое магнитное поле (подъем вверх).

Другим видом предвестников в микроволновом диапазоне являются так называемые радиоисточники над НЛ фотосферного магнитного поля (РиНЛ, англ. NLS — Neutral Line Source), или

пекулярные источники (например, Uralov et al., 2008; Abramov-Maximov et al., 2015; Bakunina et al., 2015). Такие источники наблюдаются между пятнами и характеризуются высокими яркостными температурами от нескольких МК до примерно 10 МК. Поток радиоизлучения РиНЛ имеет максимум в диапазоне 5–7 ГГц и резко снижается на высоких частотах. Время жизни РиНЛ может достигать нескольких дней, и поэтому его можно отнести к квазистационарным объектам. Показано, что РиНЛ часто появляется в активных областях перед мощными солнечными вспышками и его появление связано с динамикой магнитного поля (Abramov-Maximov et al., 2015). Поэтому наблюдение РиНЛ может использоваться в предсказании мощных солнечных вспышек. На сегодняшний день окончательного понимания природы формирования РиНЛ и механизма его излучения нет. Одним из наиболее вероятных объяснений особенностей излучения РиНЛ является тепловое гирорезонансное излучение горячей плазмы (до 10 МК) в сильном магнитном поле (около 1 кГс). Нетепловое гиротронное радиоизлучение также может объяснить особенности РиНЛ, но в этом случае необходим достаточно долгоживущий ускоритель электронов. Наиболее популярный сценарий появления РиНЛ предполагает наличие скрученного магнитного жгута у НЛ, взаимодействующего с охватывающим его внешним магнитным полем.

1.3. Актуальность, мотивация, цели и задачи данной работы

Предвспышечные процессы достаточно активно исследуются в силу наличия большого количества наблюдательных данных в различных диапазонах ЭМ-спектра. При исследовании предвспышечного энерговыделения приходится иметь дело с относительно малыми интенсивностями различных излучений (по сравнению со вспышками). При этом часто необходимо рассматривать продолжительный (порядка нескольких часов) промежуток времени до вспышки, так как АО может накапливать энергию для большой солнечной вспышки достаточно долго. По этим причинам научное сообщество все-таки больше предпочитает исследования самих солнечных вспышек и их эффектов в силу их большой мощности, крупномасштабности и скоротечности (обрабатывается меньше данных). Поэтому при относительном рассмотрении, количество работ, посвященных предвестникам солнечных вспышек, не так велико по сравнению с исследованиями самих вспышек и эруптивных явлений. В связи с этим необходимо дальше развивать методы анализа предвспышечных явлений, верифицировать и уточнять ранее полученные результаты (часто единичные исследования), разрабатывать модели

³⁾Hard X-ray Imaging Spectrometer/Solar Maximum Mission

⁴⁾Yohkoh Soft X-ray Telescope

⁵⁾expanded Owen Valley Solar Array

предвспышечного накопления энергии и применять их для интерпретации наблюдений и создании новых моделей прогноза.

В разделе 1.2 мы описали различные типы предвспышечного энерговыделения. На сегодняшний день мы хорошо понимаем, как АО ведет себя перед солнечными вспышками в отдельных диапазонах ЭМ-спектра. Однако тенденции в исследованиях предвестников оставались и продолжают оставаться в рассмотрении малых периодов времени перед началом вспышки. Часто, выбранные для анализа предвспышечные промежутки времени ограничиваются всего лишь несколькими минутами или могут быть порядка 10–20 минут. Также для многих работ характерно определение предвестника как отдельного всплеска (или группы всплесков, фактически, небольших вспышек), наблюдающегося перед вспышкой. Комплексных исследований непрерывного развития предвспышечного энерговыделения в АО, наблюдаемого одновременно в разных диапазонах ЭМ-спектра на длительных промежутках времени (более и равное одному часу) перед вспышкой проводилось очень мало. Обычно, такие редкие исследования связаны с отдельными диапазонами ЭМ-спектра (в основном, УФ-излучение) и динамикой магнитного поля. В частности, нам не известны работы с описанием предвспышечного энерговыделения на временных масштабах более и равное одному часу, наблюдаемого одновременно в рентгеновском, микроволновом и УФ-диапазонах длин волн. При этом данный набор диапазонов длин волн обладает наилучшим потенциалом для диагностики энерговыделения. Отдельно хочется отметить следующие проблемы, связанные с исследованием предвспышечной активности в отдельных диапазонах длин волн.

На сегодняшний день практически нет попыток создания методик прогноза солнечных вспышек на базе предвестников. Сегодня происходит развитие эмпирических моделей прогноза посредством машинного обучения, основанного на использовании фотосферных магнитограмм (реже используются другие типы данных), по которым рассчитываются различные прогностические параметры и критерии. Например, в работе *Vobra and Couvidat (2015)* по прогностической ценности ранжируются разные параметры, определенные по векторным магнитограммам НМІ. Пример использования информации об УФ-уярчениях в АО для прогноза вспышек представлен в работе *Nishizuka et al. (2017)*, где показано, что суммарная площадь таких уярчений является важным параметром для прогноза. Однако данные по излучению никак не привязаны к магнитному полю и его структуре. Таким образом, необходимо продолжение исследований особенностей пространственного распределения источников

излучения перед вспышками и разрабатывать физически обоснованные методы прогноза.

В отдельных диапазонах ЭМ-спектра есть недостаток информации с точки зрения сравнительного анализа с другими диапазонами ЭМ-спектра. Например, анализ предвспышечной активности с точки зрения микроволнового радиоизлучения (в совокупности с другими многоволновыми данными) очень слабо представлен в предыдущих работах (в эпоху SDO). На сегодняшний день, требуется более детальный анализ радиоизлучения предвестников (что также позволяет судить и о магнитном поле) в силу наличия мощного инструмента моделирования микроволнового теплового и нетеплового радиоизлучения с помощью пакета программ *GX Simulator* и возможности моделирования переноса ускоренных электронов в магнитной петле.

В данной работе мы представляем комплексное исследование предвспышечного энерговыделения перед мощной эруптивной солнечной вспышкой X-класса. Причем мы отобрали такое событие, в котором наблюдалась ярко выраженная предвспышечная фаза со значительным возрастанием потоков теплового рентгеновского излучения (более подробно, что мы подразумеваем под «ярко выраженной» предвспышечной фазой, см. раздел 2). В рамках данной работы мы выделяем следующие задачи:

1. Анализ морфологии и динамики источников предвспышечного энерговыделения, одновременно видимых в основных (на наш взгляд) диапазонах ЭМ-спектра (рентгеновском, УФ и микроволновом). Нас интересуют длительные наблюдения (более или равные одному часу).
2. Построение кумулятивных карт предвспышечной активности в разных диапазонах ЭМ-спектра. Здесь речь идет о попытке построения некоторой методики измерения уровня предвспышечной активности на длительных периодах времени, которая потом, возможно, может использоваться в прогнозах солнечных вспышек.
3. Исследование рентгеновских и микроволновых спектров. Получение количественной информации о нагреве плазмы, течениях плазмы и ускорении электронов в предвспышечной фазе. Поиск возможных проявлений предвспышечного магнитного пересоединения.

В разделе 2 мы обсудим анализируемое событие, причины его выбора и особенности энерговыделения предвспышечной фазы и основной вспышки, видимые по временным профилям рентгеновского излучения.

2. ВЫБОР СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Критерии выбора солнечной вспышки

Для того, чтобы найти солнечную вспышку для анализа ее предвестников мы пользовались следующими основными критериями:

- Солнечная вспышка должна быть эруптивной и наблюдаться как можно ближе к лимбу. Это необходимо для детального исследования вертикальной структуры источников предвспышечного энерговыделения и их динамики.
- Начало предвспышечной фазы не должно приходиться на хвост предыдущего события. То есть событие должно быть достаточно изолированным.
- Наличие ускоренных электронов по данным наблюдений жесткого рентгеновского излучения и микроволнового излучения. Обязательно наличие данных наблюдений микроволнового радиоизлучения (NoRP⁶), NoRH, RSTN⁷) и желательно SSRT)
- Событие должно быть достаточно мощным (X-класса). Поскольку крупные вспышки более важны для космической погоды, то мы хотим провести подробный комплексный анализ именно крупного события;
- В различных диапазонах (прежде всего по данным GOES) должен наблюдаться рост потоков излучения до импульсной фазы (речь идет о «ярко выраженной» предвспышечной фазе).

В итоге была выбрана солнечная вспышка, произошедшая 14 мая 2013 г. (около 00:00–10:00 UT), имевшая GOES класс X3.2 и локализованная в NOAA AO 11748 (гелиографические координаты S15E65, гелиопроекции координаты [–849'', –199'']). В каталоге SOHO LASCO KBM для данной вспышки был классифицирован как гало-KBM и имел высокую характерную линейную скорость 2600 км с⁻¹. В данной АО произошел целый ряд сильных вспышек M- и X-класса (две вспышки X-класса в течение 13 мая 2013 г.). Именно выбранная вспышка лучше всего удовлетворяет указанным выше критериям.

Стоит отметить, что за начало вспышки (00:57 UT) выбран момент времени резкого нарастания потока мягкого рентгеновского излучения по данным GOES. Однако по временным профилям GOES (рис. 1a) видно, что импульсная фаза вспышки начинается в 01:05 UT, когда мы начинаем регистрировать жесткое рентгеновское излучение (рис. 1c, d). Рост вспышечного мягкого

рентгеновского излучения начинается примерно в 00:57 UT. Исходя из представленных временных профилей на рис. 1, мы выделяем следующие фазы (стадии) предвспышечного энерговыделения: до 00:02 UT — фаза предвспышечного энерговыделения №1 (ПФ1); примерно 00:02–00:04 UT — триггерный всплеск (ТВ), после которого началась наиболее активная предвспышечная фаза под №2 (ПФ2), которая длилась до начала вспышки по данным GOES 00:57 UT.

Длительность ПФ2 составляет около часа. Длительность ПФ1 условна и в нашем случае данная фаза начинается примерно в 23:30 UT, поскольку наш ряд качественных микроволновых изображений NoRH начинается в окрестности данного момента времени, а также примерно в 23:45 UT кончается ночь для RHESSI. Также следует заметить, что если ряд данных продолжать сильно раньше по времени, то мы пересечемся с другими мощными солнечными вспышками. Поэтому анализ данных наблюдений с временной отметки 23:30 UT нам кажется оптимальным. Отметим, что, в среднем, потоки мягкого рентгеновского излучения по данным GOES во время ПФ2 больше примерно в 2–4 раза для 1–8 Å и в 10–20 раз для 0.5–4.0 Å, чем в случае ПФ1.

На рис. 1b показаны временные профили рентгеновского излучения до 50 кэВ по данным RHESSI (Lin et al., 2002). Данный телескоп-спектрометр хорошо пронаблюдал конец ПФ1, полностью ТВ и примерно половину ПФ2. Этого достаточно, чтобы понять, что происходило с плазмой при переходе по времени через все указанные фазы. В диапазоне энергий 25–50 кэВ мы регистрируем сигнал только во время ТВ, что указывает на наличие ускоренных электронов. Данный факт еще лучше подтверждается на рис. 1c, где показаны данные наблюдений инструмента GBM⁸) (Meegan et al., 2009) на борту космического аппарата Fermi⁹). Данный инструмент уверенно зафиксировал нетепловое рентгеновское излучение в виде всплеска в диапазоне энергий 50–100 кэВ (красный треугольник с вертикально линией на рис. 1c указывают на этот момент времени). В разделе 5 мы обсудим аппроксимации рентгеновских спектров RHESSI и докажем наличие ускоренных электронов во время ТВ.

По данным Wind/Konus (Aptekar et al., 1995) эта вспышка наблюдалась во всех трех каналах энергий до 1200 кэВ (см. рис. 1d). Начало события согласно каталогу KONUS 01:05:20 UT. Далее приведем краткое описание инструментов и их

⁶Nobeyama Radio Polarimeter

⁷Radio Solar Telescope Network

⁸Gamma Burst Monitor

⁹Fermi Gamma-ray Space Telescope

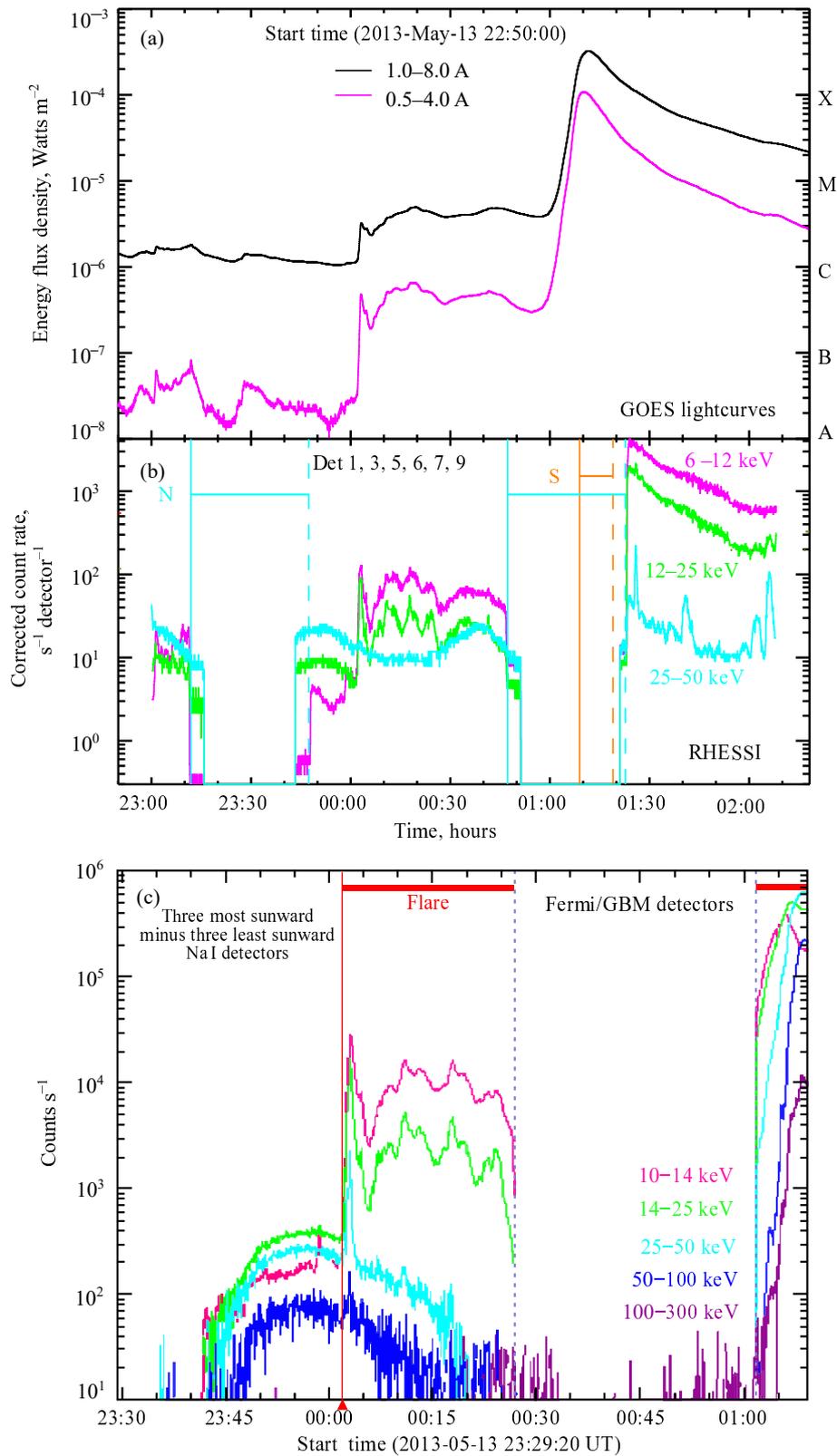


Рис. 1. Показаны временные профили рентгеновского излучения солнечной вспышки (предвспышечный период времени и сама вспышка) в разных диапазонах энергий (указаны на панелях): 0.5–4.0 Å и 1–8 Å GOES/XRS (a); RHESSI (b); Fermi/GBM (c); Wind/Konus (d).

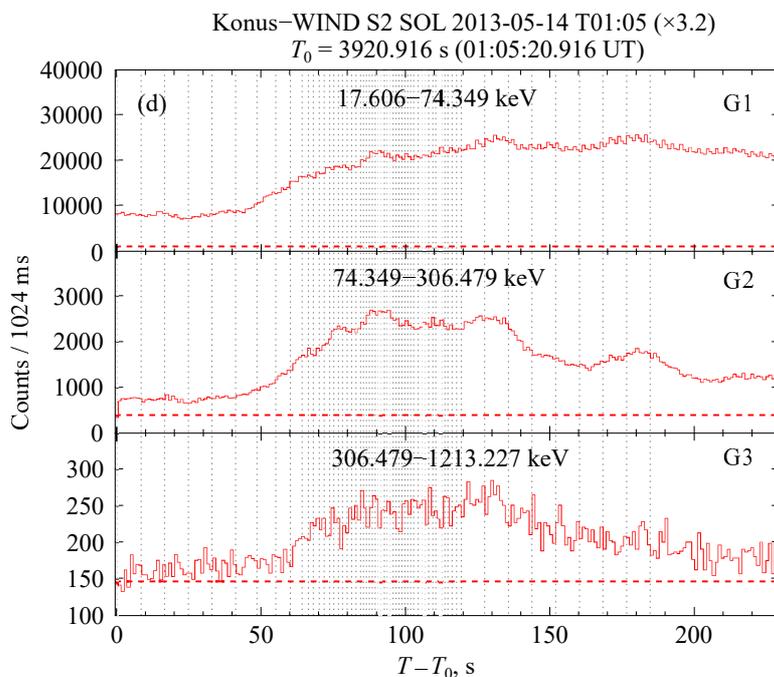


Рис. 1. Продолжение.

данных наблюдений, используемых для анализа в представленной работе.

2.2. Используемые инструменты

Анализ тепловой плазмы выполнен по ЭУФ-, УФ-изображениям телескопов (AIA, Lemen et al., 2012) на борту SDO. Мы используем данные в четырех каналах: 94 (Fe XVIII, 7.2 Мк), 131 (Fe VIII и XXI, 0.5 Мк), 304 (He II, 0.08 Мк) и 1600 Å (хромосферный канал в континууме около C IV). Временное разрешение УФ-изображений в канале 1600 Å составляет 24 с. Временное разрешение ЭУФ-изображений (94, 131 и 304 Å) составляет 12 с и пространственное разрешение 1''2 (размер пикселя 0''6).

Для определения структуры магнитного поля на уровне фотосферы используются векторные магнитограммы, полученные инструментом (HMI, Scherrer et al., 2012) на борту SDO. Так как вспышка около лимба, то мы не будем перепроецировать в сферическую систему координат компоненты магнитного поля, так как мы не имеем надежного устранения неопределенности в 180° азимута магнитного поля. В работе мы рассмотрим наиболее надежные данные: карты модуля магнитного поля и наклона магнитного поля у луча зрения. Временное разрешение используемых магнитограмм 720 с.

Исследование микроволнового предвспышечного радиоизлучения проводится по данным радиобсерватории Nobeyama и RSTN. Микроволновые

волны могут быть как тепловой, так и нетепловой природы. Радиобсерватория Nobeyama включала (в 2014 г.) в себя два комплекса инструментов: радиогелиограф NoRH (Nakajima et al., 1994), наблюдавший на частотах 17 и 34 ГГц (на 17 ГГц наблюдается также поляризация), и радио поляриметр NoRP. Также для выбранной вспышки имеются данные наблюдений SSRT (Grechnev et al., 2003) на частоте 5.7 ГГц (кадры во время ПФ2: в 00:26, 00:44, 00:47, 00:51 и 00:57 UT). Мы анализируем микроволновые композитные спектры, составленные по данным всех доступных радиобсерваторий: NoRH (17 и 34 ГГц), NoRP (2, 3.75, 9.4 и 17 ГГц), RSTN (2.69, 5, 8.8 и 15.4 ГГц).

Анализ рентгеновских изображений и спектров осуществляется по данным обсерватории RHESSI (Lin et al., 2002) в диапазоне энергий до около 100 кэВ. В данном диапазоне длин волны мы будем исследовать нагрев плазмы до десятков Мк и особенности динамики ускоренных электронов в предвспышечной фазе. Также мы дополнительно будем использовать временные профили потоков мягкого рентгеновского излучения по данным GOES (0.5–4.0 Å и 1–8 Å), поскольку RHESSI наблюдал не всю предвспышечную фазу.

Следующий раздел посвящен анализу морфологии источников предвспышечного излучения по данным выше упомянутых изображающих инструментов.

3. МОРФОЛОГИЯ ИСТОЧНИКОВ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

В данном разделе мы рассматриваем изображения, построенные в УФ, микроволновом и рентгеновском диапазонах. Обсуждаются морфологические особенности пространственной структуры источников излучения в АО. Для анализа выбраны отдельные характерные промежутки времени внутри фаз ПФ1, ТВ и ПФ2.

На рис. 2 показана временная последовательность ЭУФ-изображений в логарифмической шкале интенсивности в каналах 131 Å (с номерами 1) и 304 Å (номера 2) для шести моментов времени предвспышечной фазы: панели (a)–(b) (ПФ1), с (ТВ) и (d)–(f) (ПФ2). Черными контурами показаны изолинии одинаковой яркости с целью более наглядной визуализации пространственной структуры. Белые и голубые контуры на панелях соответственно показывают уровни магнитного поля для 1 и 2 кГс: для компоненты магнитного поля в картинной плоскости и для компоненты магнитного поля по лучу зрения, вычисленные по картам модуля магнитного поля и его наклона к лучу зрения (векторные магнитограммы НМ1). Область между пятнами (контур магнитного поля в плоскости изображения) с большими значениями магнитного поля по лучу зрения, вероятнее всего, соответствует окрестности НЛ.

В фазе ПФ1 по данным «горячего» канала 131 Å мы наблюдаем три подсистемы источников на ЭУФ-картах (условно показано на панели (a1) рис. 2): компактный петлеобразный источник, диффузный с нерегулярной структурой и относительно резкой границей, система высоких ЭУФ-петель малой интенсивности. Заметим, что компактный источник с линейными размерами около 15'' имеет квазипетлеобразную форму и опирается основаниями в область между крупнейшими пятнами, где магнитное поле преимущественно направлено по лучу зрения (горизонтальная компонента относительно фотосферы). Вероятно, мы видим горячую компактную магнитную петлю с большими широм над НЛ. В силу эффекта проекции и отсутствия надежных измерений азимута магнитного поля точное относительное положение НЛ и ЭУФ-источников нам неизвестно. По данным 304 Å также угадывается петлеобразная морфология, но источник более сильно структурирован. Скорее всего, за счет эффекта проекции его видимая структура усложняется излучением плазмы, расположенной вдоль луча зрения вне области предвспышечного энерговыделения. Рассматривая всю группу пятен, мы выделяем область диффузного ЭУФ-излучения с характерными размерами 40'' × 80''. Скорее всего,

данные источники излучения связаны с более крупными магнитными петлями в данной АО. Наиболее высокие и менее яркие петли имеют высоту равную примерно 70''. Вершины этих петель на рисунках примерно расположены около –1000'' по оси X.

Во время ТВ (рис. 2с) мы наблюдаем компактные уярчения в полутенях пятен (область пересечения белых и голубых контуров компонент магнитного поля): одно уярчение для 131 Å и два — для 304 Å. Всплески очень яркие, в результате чего соответствующие пиксели ПЗС матрицы А1А перенасыщаются и мы видим дифракционную картину (особенно яркая для канала 304 Å, см. панель (с2)) расходящуюся из источников. Сравнивая положение яркой петли (наблюдавшейся во время ПФ1) с уярчениями ТВ, мы можем предположить, что яркие ТВ являются подножиями компактной горячей петли с большим широм. Причем более яркий всплеск (южный) соответствует более сильному магнитному полю в области полутени пятна.

Дальнейшее развитие предвспышечного энерговыделения затрагивает период времени ПФ2 (см. панели (d)–(f) на рис. 2). Аналогично, можно выделить три подсистемы в пространственном распределении излучения для изучаемых каналов А1А. Однако компактные источники менее контрастны. Например, на панели (d) мы наблюдаем несколько уярчений. Вероятно, геометрия энерговыделения в данный момент времени соответствует взаимодействию двух или нескольких магнитных петель. Также из последовательности трех изображений для данного периода времени очевидно, что система магнитных петель, опирающаяся на пятна АО, растет со временем (примерно в два раза, если сравнивать (d1) и (f1)).

В канале 304 Å наблюдается формирование областей в короне с холодной плазмой во время ПФ2 (панели (d2)–(f2)). Вероятно, мы видим процесс роста эруптивного филамента. На «горячей» ЭУФ-карте 131 Å (панель (e1)) мы отобрали синими контурами положение холодного вещества эруптивного филамента (контур построен по карте на панели (e2)). По кадру (e2) можно выделить три петлеобразные структуры, взаимное расположение которых возможно свидетельствует о небольшой закрутке. Заметим, что высокие и менее яркие ЭУФ-петли также растут со временем. По панелям (e2) и (f2) мы можем оценить характерные толщины холодных петель: 2''–5''.

Далее мы рассмотрим наблюдения источников излучения в ЭУФ, рентгеновском и микроволновом диапазонах, представленные на рис. 3 и 4 для четырех моментов времени: панели (a1)–(c1) — ПФ1, панели (a2)–(c2) — ТВ и рис. 4 — ПФ2. На данных

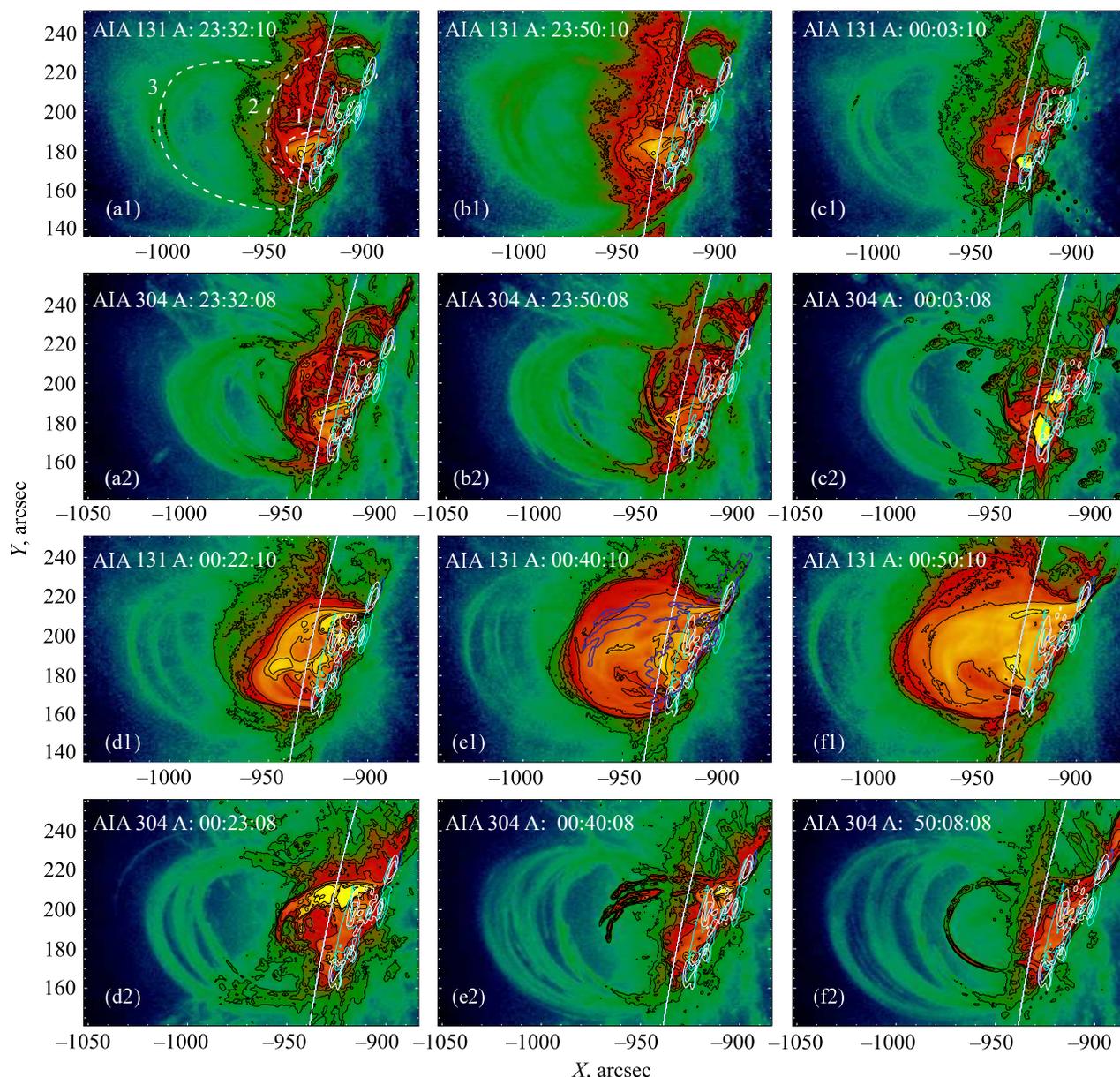


Рис. 2. УФ-изображения SDO/AIA для предвспышечной фазы в двух каналах: «горячем» канале 131 Å (панели, обозначенные цифрами 1) и «холодном» канале 304 Å (панели с цифрами 2). Карты построены для шести моментов времени (шесть пар панелей (a)–(f): 131 Å над 304 Å). На (a1) условно показаны три подсистемы системы петель. Белые и голубые контуры на панелях показывают уровни магнитного поля 1 и 2 кГс для двух разных компонент вектора. Белые контуры для компоненты магнитного поля в картинной плоскости, голубые контуры соответствуют компоненте магнитного поля по лучу зрения. На (e1) с УФ-картой 131 Å синими контурами показано положение холодной плазмы эруптивного филамента по данным 304 Å (с панели (e2)).

рисунках мы анализируем следующие изображения: ЭУФ-карты в канале 94 Å по данным AIA (подложка на всех панелях), изображения на 17 и 34 ГГц по NoRH (панели (b)), 5.7 ГГц по данным SSRT (панели (c)), RHESSI 6–25 кэВ (панели (c)), распределение фотосферного магнитного поля (a). На панелях (a) представлены рисунки, аналогичные по содержанию рис. 2.

Для фазы ПФ1 мы наблюдаем компактный горячий петлеобразный ЭУФ-источник (рис. 3a1), которому соответствуют максимальные значения яркостной температуры на частотах 17, 34 ГГц (рис. 3b1) и 5.7 ГГц (рис. 3c1). Отметим, что позиционирование источников на 5.7 ГГц не является идеальным и поэтому нам достаточно того факта, что 90% контур приблизительно совпал с другими

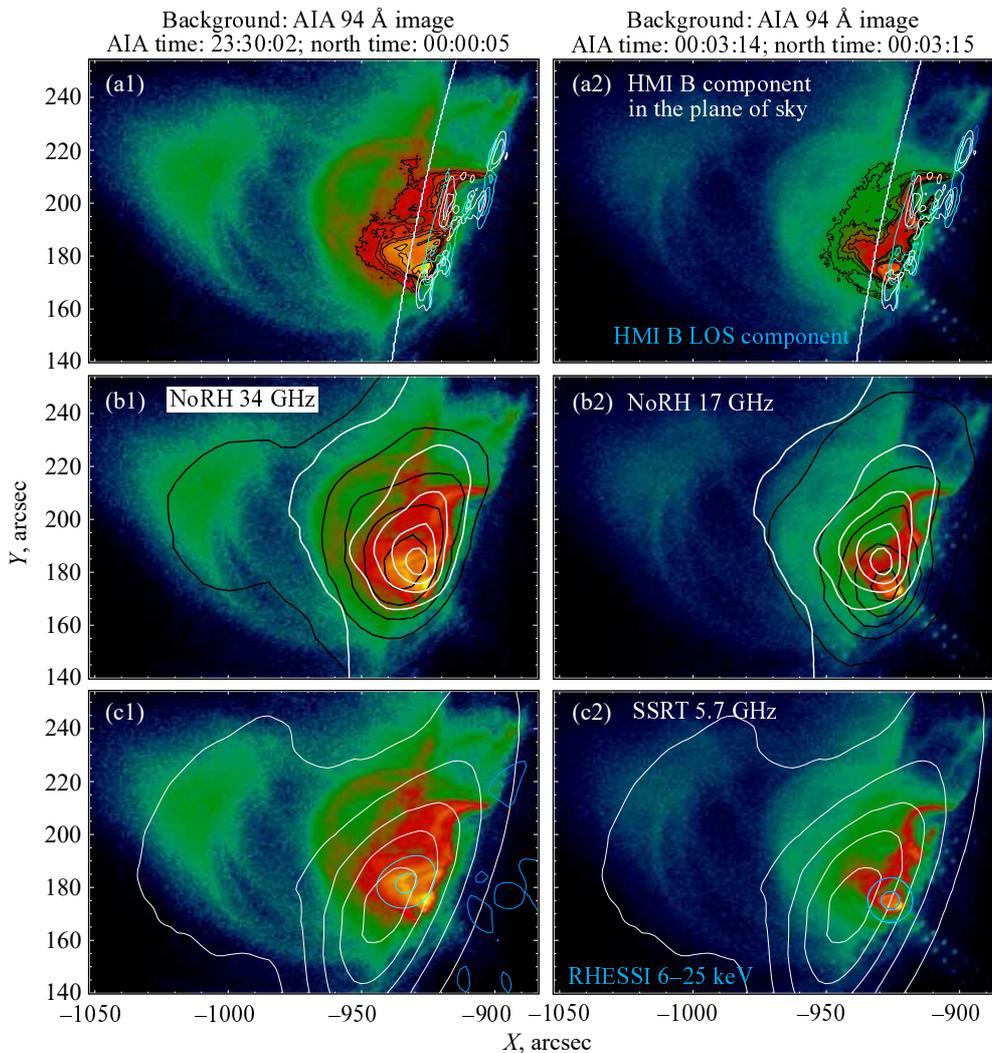


Рис. 3. Изображения в различных диапазонах электромагнитного спектра для двух моментов времени: до всплеска в 00:02 UT (панели с номерами 1) и во время данного всплеска (панели с номерами 2). На (a1) и (a2) показаны ЭУФ-изображения в канале AIA 94 Å. Контуры на (a1) и (a2) показывают уровни магнитного поля 1 и 2 кГс. Белые контуры для компоненты магнитного поля в картинной плоскости, циановые контуры соответствуют компоненте магнитного поля по лучу зрения. На (b1) и (b2) показаны источники микроволнового излучения 17 и 34 ГГц (соответственно белые и черные контуры: 10%, 30%, 50%, 70% и 90% от максимума яркостной температуры) по данным NoRH. На (c1) и (c2) показан источник микроволнового излучения 5.7 ГГц по данным SSRT (белые контуры: 10%, 30%, 50%, 70% и 90%) и источник теплового рентгеновского излучения по данным RHESSI в диапазоне энергий 6–25 кэВ (циановые контуры: 50% и 70%).

источниками. На частоте 34 ГГц максимальная яркость достигалась вблизи вершины ЭУФ-петли. В морфологии микроволновых источников излучения также прослеживается три компоненты: суперпозиция компактного источника (вблизи ЭУФ-петли) плавно переходящего в протяженный источник, примерно соответствующий ярким областям на ЭУФ-карте, а также слабое свечение в микроволновом диапазоне, соответствующее высоким ЭУФ-петлям (на панели (b1) отдельный черный контур 34 ГГц выходит сильно за лимб). Диффузное излучение вероятно связано с тепловым тормозным механизмом, поскольку магнитное поле на таких высотах обычно достаточно слабое

и вклад гиротронной компоненты будет незначительным. По данным RHESSI компактный рентгеновский источник 6–25 кэВ (изображение построено алгоритмом CLEAN) располагался вблизи вершины низкой ЭУФ-петли.

В случае периода времени ТВ (панели (a2), (b2), (c2) на рис. 3) мы видим очень компактное уярчение в полутени пятна, которому соответствует рентгеновский источник 6–25 кэВ и максимальная яркость на 34 ГГц (по 90% контуру). Заметим, что центр яркости на 17 ГГц расположен немного в стороне, но, скорее всего, центроиды на обоих частотах соответствуют одной и той же магнит-

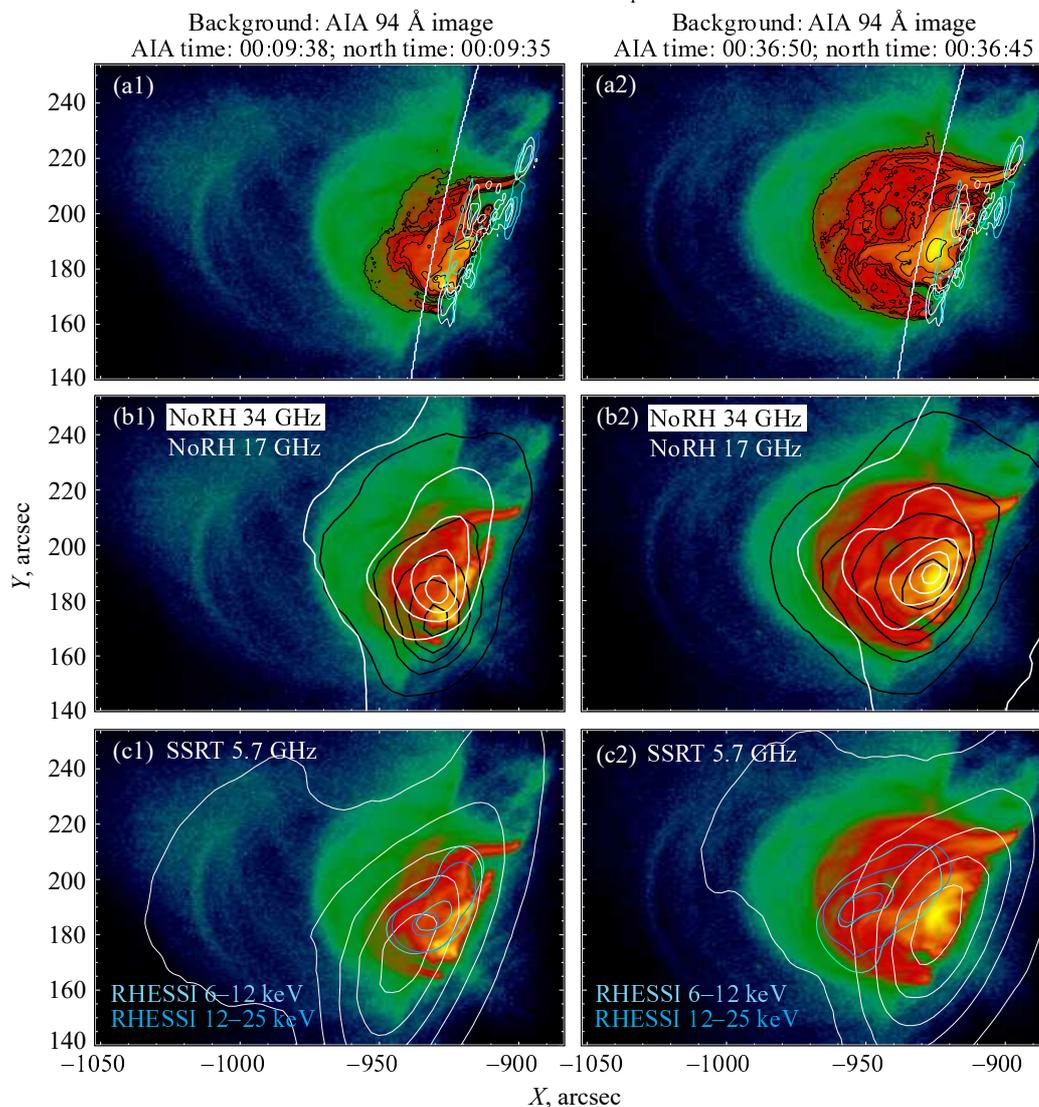


Рис. 4. Изображения в различных диапазонах электромагнитного спектра для двух моментов времени после ТВ в 00:02 UT. Содержимое данного рисунка аналогично рис. 3.

ной структуре. Небольшое различие в положении источников может быть связано с разными механизмами излучения (тепловой тормозной, тепловой или нетепловой гиротронный). Мы также, как и на предыдущем временном интервале, наблюдаем диффузную компоненту микроволновых радиоисточников, накрывающих яркие ЭУФ-петли во вспышечной области.

На рис. 4 показана фаза ПФ2, во время которой наблюдался рост ЭУФ-петель в АО. Вместе с увеличением высоты петель мы видим расширение микроволнового источника на 34 ГГц (по самому нижнему контуру), а также подъем протяженного рентгеновского источника, вытянутого вдоль системы петель. В этой фазе, по сравнению с ПФ1 и ТВ, размеры рентгеновского источникакратно увеличились и составляют несколько размеров функции рассеяния источника (PSF — Point Spread

Function). Центры яркости микроволновых источников примерно совпадают с наиболее яркой областью, видимой в ЭУФ-диапазоне. Рентгеновские источники расположены чуть выше на панели (с2). Учитывая, что рентгеновский источник (излучение очень горячей плазмы) не совпадает с микроволновыми и ЭУФ-структурами, можно предположить, что мы наблюдаем энерговыделение в токовых слоях и соответственно видим наиболее разогретую плазму за счет магнитного пересоединения. Также заметим, что гиротронное микроволновое излучение сильно зависит от магнитного поля и поэтому его источники имеют тенденцию локализоваться на более низких высотах, где магнитное поле имеет большую величину.

Мы рассмотрели изображения предвспышечной АО для отдельных моментов времени. Энерговыделение носило достаточно нестационарный

характер: источники сложны (суперпозиция компактных и протяженных), они меняли яркость и перемещались (в разных фазах по-разному). Имеет смысл рассмотреть некоторую статистическую карту предвспышечных источников на некоторых интервалах времени в разных диапазонах электромагнитных волн. На рис. 5 показаны карты, суммирующие предвспышечную активность в исследуемых диапазонах длин волн на выбранных интервалах времени. Данные карты строятся следующим образом. Для временной последовательности УФ-изображений в выбранном канале АІА мы вычисляем попиксельно значения производной по времени интенсивности излучения. Затем, мы суммируем значения временной производной в каждом пикселе за выбранный интервал времени и делим на количество кадров, используемых для построения данной карты. При этом мы суммируем только положительные значения производных, тогда как отрицательные значения зануляем. Таким образом, полученная суммарная карта УФ-активности характеризует только кумулятивное «положительное» энерговыделение в АО. Далее мы будем называть данные карты кумулятивными УФ-картами предвспышечной активности. Отметим, что такой подход лучше, чем просто усреднить изображения, поскольку более контрастно показывает области активного энерговыделения. В случае микроволнового и рентгеновского диапазонов мы будем использовать обычное усреднение за выбранный интервал времени, поскольку пространственное разрешение таких изображений гораздо хуже (на порядок) и позиционирование не идеально. Например, рентгеновское изображение размывается функцией рассеяния точки, а микроволновое изображение диаграммой направленности (зачастую несимметричной). Также качество изображений зависит от особенностей метода их реконструкции и то, каким образом производится привязка к координатам солнечного диска в картинной плоскости.

На рис. 5 кумулятивные УФ-карты предвспышечной активности показаны для трех диапазонов времени цветными изображениями: ПФ1 (панели (a1), (a2), (d1)) и два временных интервала для ПФ2 (панели (b1), (b2), (d2), (c1), (c2), (d3)). Данные карты построены для трех каналов АІА: 131 Гц (панели (a1), (b1), (c1)), 94 Гц (панели (a2), (b2), (c2)) и 1700 Å (панели (d1)–(d3)). На рассматриваемые кумулятивные УФ-карты наложены усредненные карты в микроволновом 17 Гц (построены алгоритмом *koshix*) и рентгеновском диапазоне 6–12 кэВ (белые и синие контуры).

Кумулятивные и усредненные карты в соответствующих диапазонах длин волн для ПФ1 наглядно демонстрируют компактное квазистационарное энерговыделение в нижней петлевой структуре.

Причем мы видим два основания и вершину петли на ЭУФ-картах (особенно хорошо для 131 Å на (a1)). С вершиной петли четко совпадают области максимальных яркостей в рентгеновском и микроволновом диапазонах. Заметим, что на кумулятивных УФ-картах мы не видим энерговыделения в очень высоких петлях, ранее обсуждавшихся на примере обычных изображений. Компактные хромосферные уярчения отлично видны на УФ кумулятивной карте в канале АІА 1700 Å (панель (d1) на рис. 5).

Для ПФ2 кумулятивные УФ-карты показывают наличие ярко выраженной диффузной области предвспышечного энерговыделения (зеленый цвет на цветной подложке) и систему ярких компактных петель (вероятно, составляющих аркаду вдоль НЛ; на рисунке отмечено красно-желтыми цветами), которым соответствуют наиболее яркие области усредненного микроволнового источника. Заметим, что размеры и форма микроволнового источника примерно соответствует форме диффузной области предвспышечного энерговыделения. Это указывает на то, что одна и та же плазма излучает в обоих диапазонах. Разница в распределении яркости в нижних петлях может быть связана с возможным вкладом гиросинхротронного механизма: вблизи пятна мы имеем более яркий источник микроволнового излучения. Тогда как все остальное излучение из более высоких областей короны генерируется тормозным механизмом, не зависящим от магнитного поля. Чтобы более точно ответить на вопрос о механизмах микроволнового излучения, необходимо производить моделирование спектров по распределению магнитного поля и плазмы.

В ПФ2 усредненный рентгеновский источник 6–12 кэВ в среднем расположен выше наиболее ярких областей кумулятивных УФ-карт (соответствует низким петлям). Большая часть рентгеновского источника погружена в зеленую диффузную область предвспышечного энерговыделения в ЭУФ-диапазоне. Для третьего рассматриваемого интервала времени (панели (c1), (c2), (d3) на рис. 5) рентгеновский источник имеет протяженную форму с максимумом яркости вблизи вершин ЭУФ-петель. В целом, данный источник уходит в более высокие области короны, имея длину равную примерно 50". Вероятно, мы наблюдаем области с горячей плазмой вблизи предвспышечного токового слоя, сформированного в результате взаимодействия магнитных петель около НЛ. На УФ кумулятивных картах (см. панели (d2), (d3)) мы наблюдаем расширение области вариаций интенсивности в 1700 Å. Заметим, что в хромосферном канале АІА наблюдается свечение из короны. Вероятно, мы наблюдаем основания эруптивного

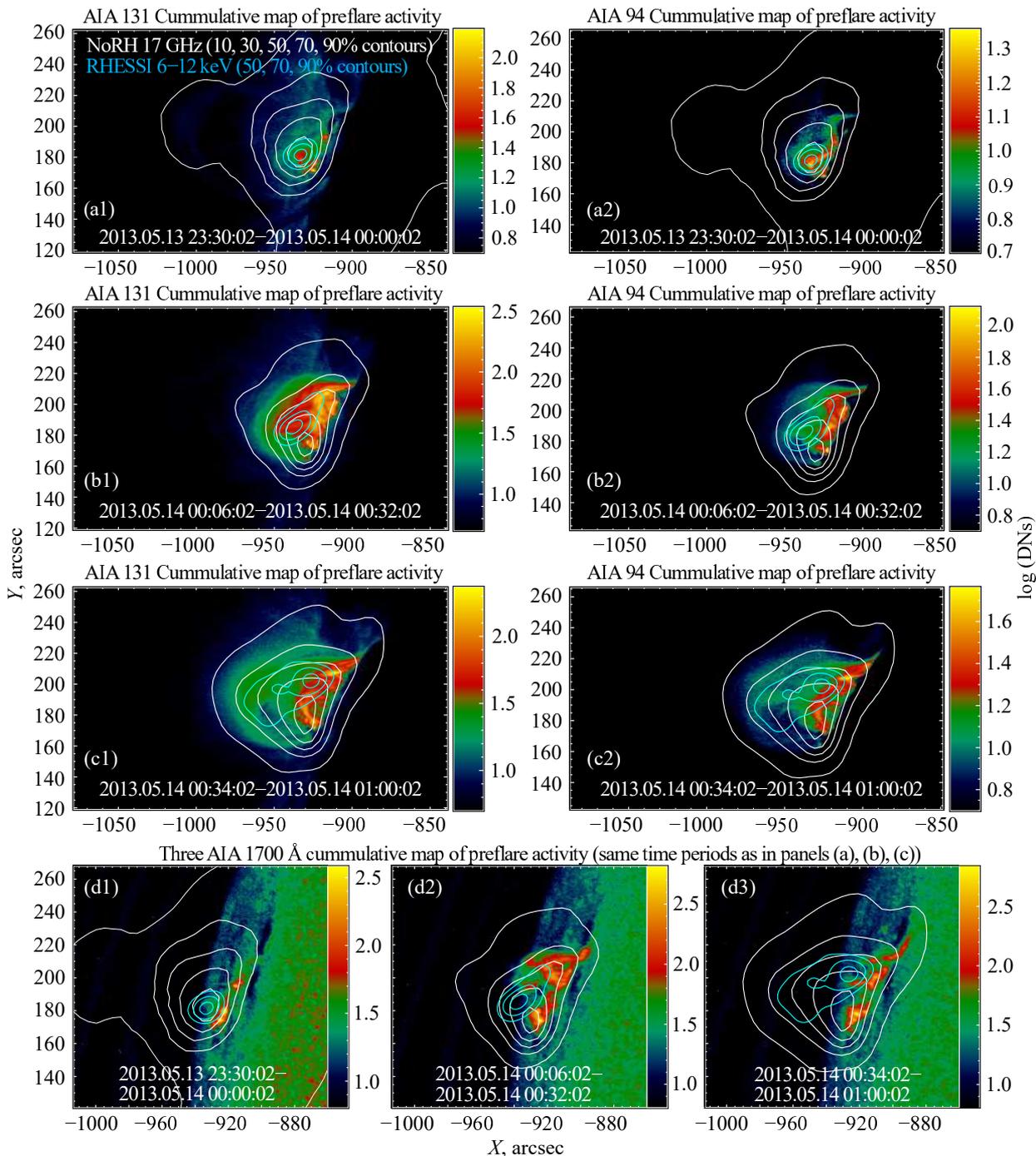


Рис. 5. Кумулятивные карты (цветное фоновое изображение) предвспышечного энерговыделения для трех интервалов времени. Номера интервалов времени обозначены цифрами 1–3 и указаны на панелях. На каждой панели контурами показаны усредненные карты для 17 ГГц по данным NoRH (белые контуры: 10%, 30%, 50%, 70% и 90%) и для рентгеновского диапазона 6–12 кэВ по данным RHESSI (голубые контуры: 50%, 70% и 90%). Кумулятивные карты сделаны для трех каналов AIA: 131 ГГц (панели (a1), (b1), (c1)), 94 ГГц (панели (a2), (b2), (c2)), и 1700 Å (панели (d1)–(d3)).

филамента (протуберанца) в виде холодного вещества, формирующегося за счет тепловой неустойчивости. Вообще говоря, мы не можем установить (с высокой точностью) геометрию магнитного поля в предвспышечной области из-за эффекта проек-

ции и отсутствия возможности провести надежную экстраполяцию бессилового магнитного поля для окололимитового участка векторной магнитограммы НМ1.

Подведем итоги анализа изображений, куму-

лятивных и усредненных карт предвспышечного энерговыделения, видимого в разных диапазонах длин волн:

- Фаза ПФ1 (более или около 30 минут) характеризовалась наиболее компактным рентгеновским источником, связанным с небольшой ЭУФ-петлей, укорененной в сильном магнитном поле полутеней пятен, предположительно ориентированной вдоль НЛ. Наиболее яркие участки изображений во всех используемых диапазонах ЭМ-спектра связаны с данной компактной ЭУФ-петлей. Сравнение с ТВ и ПФ2 показывает, что динамика всех наблюдаемых источников фазы ПФ1 минимальна.
- Наиболее горячая плазма в фазе ТВ (около двух минут) возникла в окрестности полутени пятна, где изначально укоренялась ЭУФ-петля из ПФ1.
- В фазе ПФ2 (около 50 минут) мы видим наибольшую нестационарность источников в различных диапазонах длин волн. Общий размер излучающей области в данной фазе растет по мере приближения к началу основной вспышки. Рентгеновский источник в отдельные моменты времени наблюдается выше ярких областей, видимых в микроволновом диапазоне. Возможно, в рентгеновском диапазоне мы наблюдаем область вблизи ТС, сформированного в результате взаимодействия магнитных петель, вытянутых вдоль НЛ.

4. АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

В этом разделе мы рассмотрим динамику потоков излучения в различных диапазонах электромагнитного спектра и параметров, определенных из данных потоков и временной последовательности изображений в том или ином диапазоне длин волн. Мы будем рассматривать временные профили для ТВ и ПФ2, поскольку для указанных интервалов времени есть данные RHESSI и микроволновых наблюдений.

На рис. 6а показаны потоки рентгеновского излучения в диапазонах 6–12 кэВ и 12–25 кэВ, соответствующих преимущественно излучению тепловой плазмы. На остальных панелях указаны потоки микроволнового излучения на разных частотах по данным NoRH (панели (с)–(d) на рис. 6), NoRP (панели (с), (е)–(g)) и RSTN (панели (b), (е)–(g)). Поток на 17 ГГц по данным NoRH построен по изображениям для временной последовательности карт интенсивности I (панели (с), (d)) и радиокарт V (с). Заметим, что для RSTN 8.8 и 15.4 ГГц мы вычитаем фон двояким способом: стационарный

фон с уровнем, стандартно оцененным по временному интервалу перед началом рассматриваемого диапазона времени на рисунке; линейно возрастающий фон от нулевого момента времени до условного послевспышечного. Последний способ был использован для того, чтобы хоть как-то учесть нестационарный фон на данных двух частотах. В реальности данная неопределенность фона может рассматриваться как некоторая погрешность оценки потока радиоизлучения, связанного с предвспышечным энерговыделением: приблизительно 5 и 20 sfu (если оценивать максимальные значения ближе к концу рассматриваемого интервала). Погрешности на других частотах определяются как дисперсия сигнала в шумовой дорожке перед началом выбранного временного диапазона для анализа.

Сравнение всех представленных временных профилей на рис. 6 показывает, что микроволновые данные не имеют ярко выраженных всплесков по сравнению с рентгеновским тепловым излучением. Мы видим только один ТВ (примерно 00:02–00:05 UT), представленный на всех временных профилях кроме 15.4 ГГц по RSTN и 17 ГГц по NoRP, что скорее всего связано с относительно малой чувствительностью. При этом NoRH регистрирует ТВ на 17 ГГц. Несмотря на близость частот 15.4 и 17 ГГц мы видим, что поток резко падает. Данный факт указывает на гиросинхротронный завал спектра (Dulk, 1985). Равенство потоков радиоизлучения на 17 и 34 ГГц по данным NoRH указывает на плоский тормозной тепловой спектр. В ПФ2 постепенный характер микроволновых потоков указывает на тепловую природу механизма радиоизлучения. Причем температура внутри микроволнового источника скорее всего ниже, чем в случае плазмы, излучающей мягкое рентгеновское излучение, поскольку более изрезанный профиль 6–25 кэВ связан с менее инерционной, с точки зрения охлаждения, плазмой. И заметим, что серия рентгеновских всплесков соответствует постепенному возрастанию потока в микроволновом диапазоне. Таким образом, на рис. 6 мы видим в ПФ2 два субинтервала времени: фазу нестационарного энерговыделения (НПФ2) — в течение примерно 30 минут от начала ТВ, проявляющуюся в рентгеновском диапазоне, и фазу квазистационарного энерговыделения (КПФ2) — около 30 минут до начала вспышки. В разделе 5 мы рассмотрим пример микроволнового спектра и его аппроксимацию модельными спектрами.

Потоки рентгеновского излучения 0.5–4.0 Å и 1–8 Å по GOES сравниваются с параметрами источников микроволнового радиоизлучения на рис. 7. Поскольку GOES наблюдает тепловое

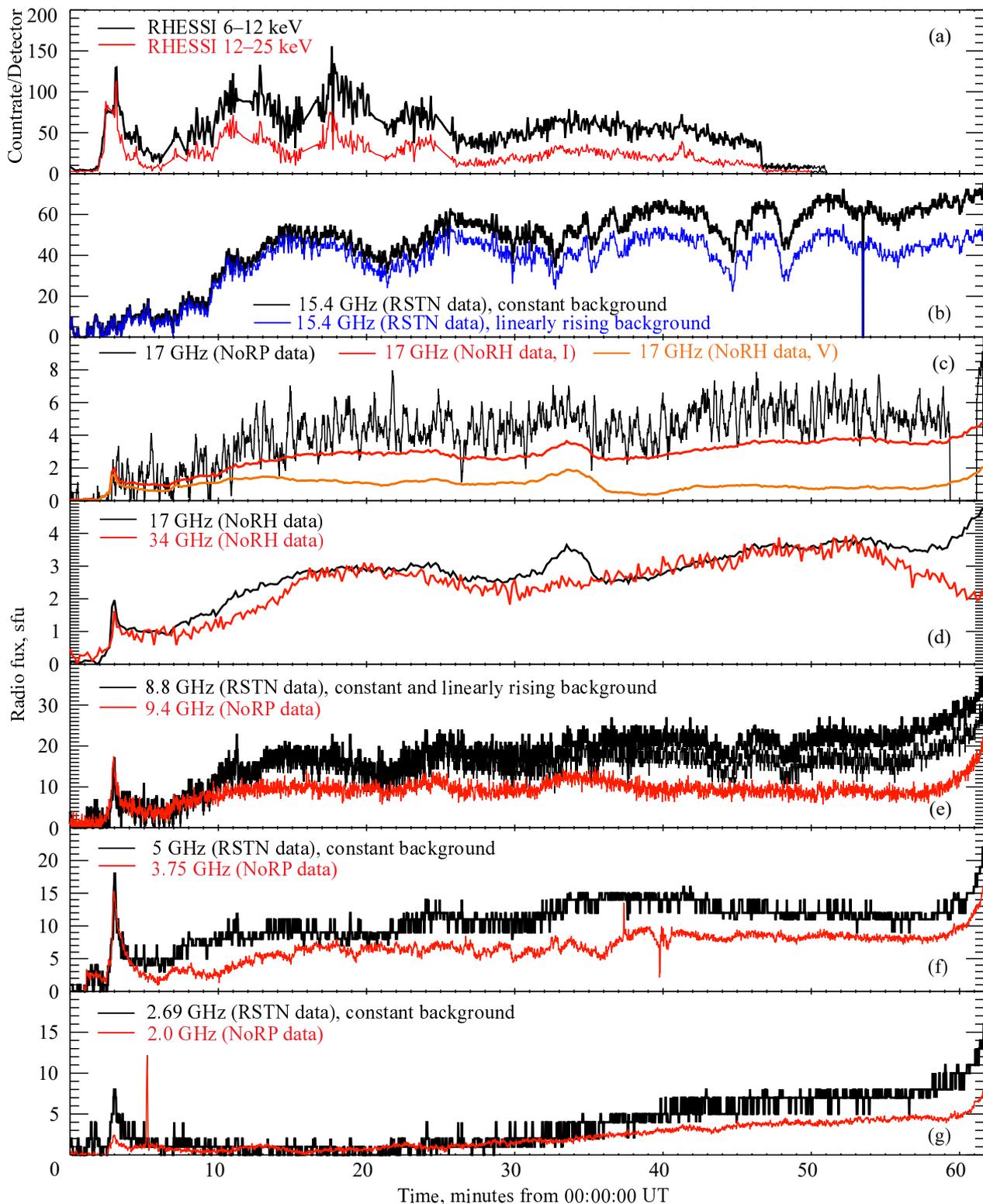


Рис. 6. Временные профили для предвысывочного периода времени: данные RHESSI по рентгеновскому излучению (a); микроволновое излучение по данным RSTN (панели (b), (e)–(g)); микроволновое излучение по данным NoRP (панели (c), (e)–(g)). Потоки микроволнового излучения по данным NoRH показаны на панелях (c) (I и V 17 ГГц в сравнении с NoRP 17 ГГц) и (d) (I : 17 и 34 ГГц). Диапазоны энергий RHESSI и частоты радионаблюдений указаны на панелях. Для RSTN (на частотах 8.8 и 15.4 ГГц) показаны два варианта временных профилей: с вычтенным постоянным фоном и линейно нарастающим со временем фоном (определенным по предыдущему дню).

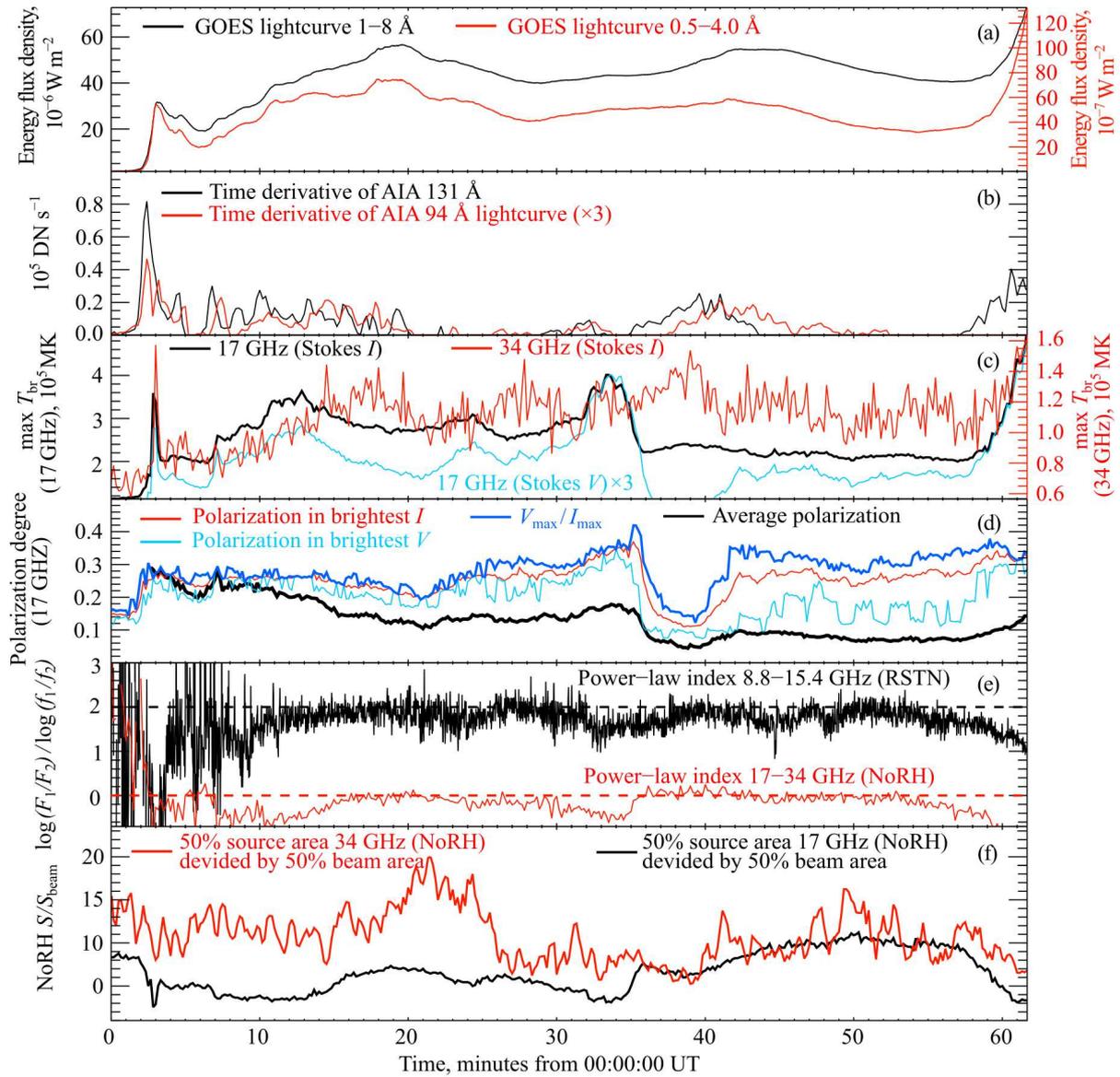


Рис. 7. Временные профили для предвспышечного периода времени: потоки мягкого рентгеновского излучения по данным GOES/XRS в двух каналах 0.5–4.0 Å и 1–8 Å (a); временная производная потоков по AIA 94 и 131 Å (b); на панели (c) показана динамика максимальной яркостной температуры в микроволновом источнике по данным NoRH I (17 и 34 ГГц) и V (17 ГГц, величина температуры умножена на три для улучшения наглядности); степень поляризации V/I по NoRH, рассчитанная для пикселя с максимальной величиной I и V , а также рассчитанная для среднего значения по источнику (d); степенные индексы для двух пар частот по данным RSTN и NoRH (e); размеры источника микроволнового радиоизлучения относительно размера диаграммы направленности (по 50% уровню от максимума яркости на радиоизображениях) по данным NoRH 17 и 34 ГГц. Горизонтальные линии на панели (e) показывают значения степенного индекса 0 (характерный наклон для тормозного микроволнового радиоизлучения) и 2 (наклон теплового спектра в оптически толстом режиме).

рентгеновское излучение (a), то мы можем зафиксировать эпизоды нагрева по временной производной потоков в двух каналах инструмента (b). Заметим, что наряду с ТВ мы также наблюдаем множество всплесков нагрева в НПФ2.

На рис. 7c показана динамика максимальной яркостной температуры (T_{br}) на 17 ГГц (I и V) и 34 ГГц (только I) по данным NoRH. Для 34 ГГц

мы имеем зашумленный временной ряд для максимального значения T_{br} . Так как на данной частоте (самая высокая доступная частота) мы наблюдаем тормозное излучение (см. выше по тексту), то особенности поведения гиротронной компоненты могут проявиться на 17 ГГц. В действительности мы видим скачки значения максимальной T_{br} и поляризации в районе 30–45 минут. Скорее всего, в

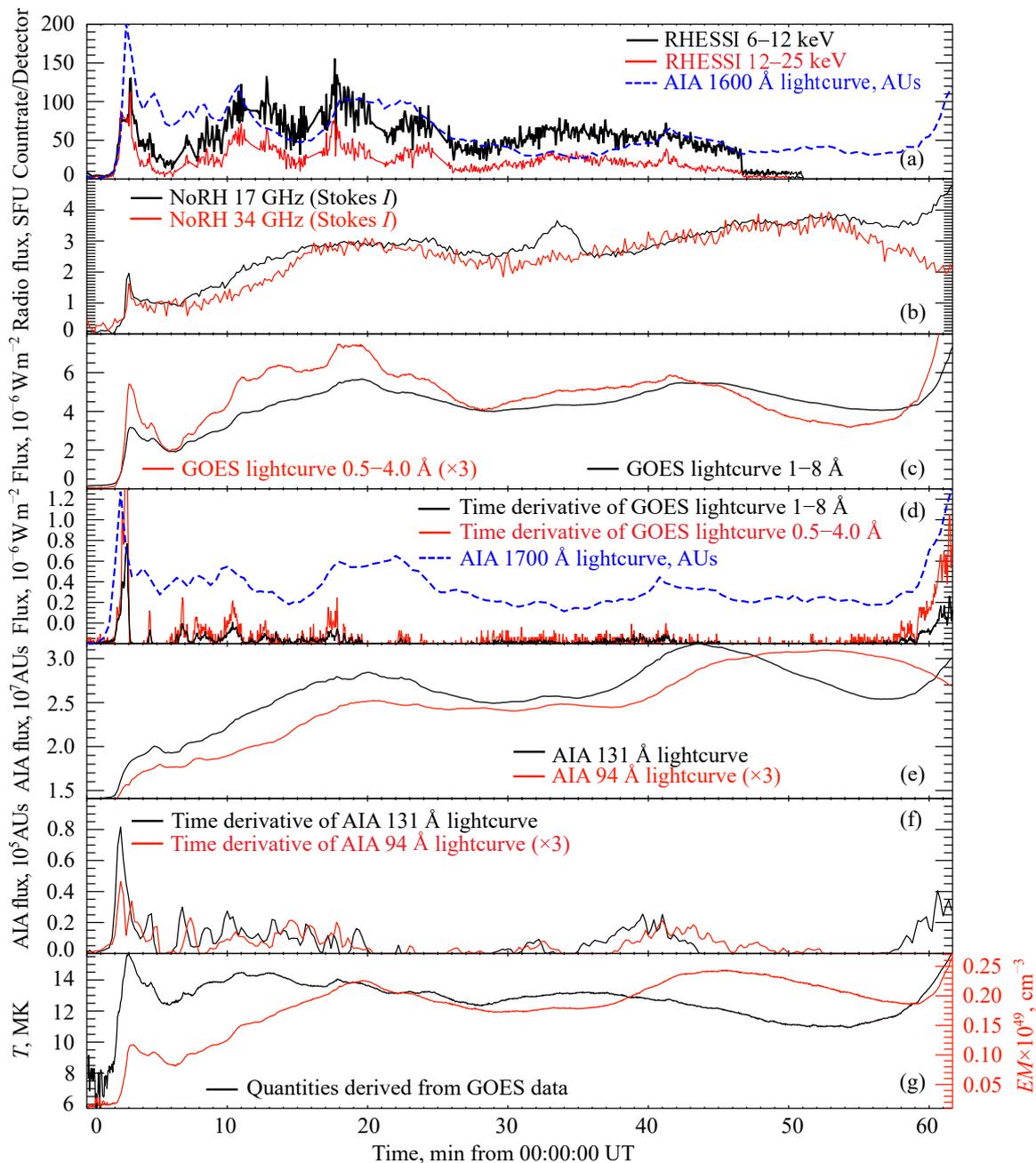


Рис. 8. Временные профили для предвысшыического периода времени: темпы счета по данным наблюдений RHESSI рентгеновского излучения (6–12 кэВ и 12–25 кэВ) и полный поток УФ-излучения в канале 1600 Å (а); потоки радиоизлучения по данным NoRH *I* на частотах 17 и 34 ГГц (б); потоки мягкого рентгеновского излучения по данным GOES в двух каналах 0.5–4.0 Å и 1–8 Å (с); временная производная GOES 0.5–4.0 Å и 1–8 Å и полный поток УФ-излучения в канале 1700 Å (д); полный поток ЭУФ-излучения в «горячих» каналах 94 и 131 Å (е); временная производная полных потоков ЭУФ-излучения в «горячих» каналах, указанных на предыдущей панели (ф); графики меры эмиссии и температуры плазмы, определенные по рентгеновским данным GOES (г).

окрестности данного периода мы наблюдаем смену доминирующего механизма излучения от гиротронного к тормозному (провал в поляризации).

Более детально поведение поляризации показано на рис. 7д, на которой рассматриваются значения усредненной поляризации во всем источнике

(внутри 50% контура), поляризация в ярчайшем пикселе *I* и $|V|$ радиокарт. Заметим, что все значения поляризации в диапазоне 20–30% примерно в интервале времени 0 до 12 минут, считая от 00:00 UT. Затем средняя поляризация уменьшается до 6–15%, тогда как поляризация в ярчайших

пикселях доходит до 30–40%. При этом между 35 и 42 минутой наблюдается резкий провал до 10–20% и почти сравнивается со средней. Вероятнее всего, мы наблюдаем следующую картину развития событий: вначале излучение на 17 ГГц преимущественно гиротронное с примесью тормозного, но затем возникают локальные источники вблизи низких магнитных петель и поляризация еще сильнее возрастает в ярчайших пикселях. При этом за счет расширения всего диффузного источника и сильного усреднения по пространству вклад тормозного механизма понижает среднее значение поляризации. Вариации поляризации в окрестности 35–42 минут возникают из-за появления плазмы с относительно большой мерой эмиссии и тормозной механизм кратковременно становится сильнее гиротронного.

Мы оценили спектральные индексы для двух диапазонов частот: 8.8–15.0 ГГц по RSTN и 17–34 ГГц по NoRH (рис. 7d). Видно, что ниже частоты спектрального пика (верхний предел примерно 15 ГГц) абсолютное значение индекса равно примерно двум, что соответствует тепловому механизму (Dulk, 1985). На высоких частотах индекс равен нулю, что свидетельствует о тормозном излучении электронов. Небольшие отклонения на примере индекса 17–34 ГГц до 15 минуты и в районе 30–35 минут возникают вероятно из-за повышенного вклада гиротронного механизма.

Размеры источников на 17 и 34 ГГц в единицах площади диаграммы направленности NoRH демонстрируются на рис. 7f. Данный график показывает, что в целом источники по 50% контуру ни в какой момент времени не достигают размера диаграммы направленности и не могут рассматриваться как компактные. Относительные изменения (отношение максимальной к минимальной площади) площадей источников держатся в пределах: не более чем в четыре раза для обеих частот.

На рис. 8 отображаются ранее показанные временные профили по данным RHESSI (a), полные потоки NoRH (b) и GOES (c) в сравнении с потоками УФ- и ЭУФ-излучения по данным AIA и их временных производных (панели (a), (d)–(f)). Данные потоки считались суммированием значений пикселей из поля зрения кадра (см. изображения выше). Вариации потока УФ-излучения в каналах 1600 и 1700 Å примерно соответствуют вариациям потока рентгеновского излучения. В течении первых 25 минут (НПФ2) наблюдалось множество всплесков УФ-излучения. Поведение потоков ЭУФ-излучения в каналах 94 и 131 Å примерно соответствует трендам потоков рентгеновского излучения по данным GOES, но ТВ

плохо прописывается в ЭУФ временных профилях. Серия наиболее сильных всплесков положительной производной ЭУФ-потока соответствует временному интервалу аналогичных всплесков в производной потока рентгеновского излучения по GOES (см. панели (d), (f) на рис. 8). Причем данные всплески больше похожи на эпизоды нагрева плазмы, видимой в рентгеновском диапазоне до 25 кэВ. Оценка температуры и меры эмиссии по данным GOES приведена на рис. 8g. Более горячая плазма была примерно в области НПФ2: от 12 до 14 МК при растущей мере эмиссии. Во время ТВ температура в пике достигла 16 МК.

В итоге, анализ временных профилей показал, что в предвспышечной области имеется плазма, испытывающая интенсивные всплесковые эпизоды нагрева, проявляющиеся в фазе НПФ2 после ТВ. Причем нестационарное поведение временного профиля рентгеновского излучения соответствует динамике холодного УФ-излучения, преимущественно связанного с нижней частью солнечной короны. При этом, присутствуют более медленные вариации интенсивности излучения в разных диапазонах электромагнитного спектра, скорее всего, связанные с плазмой меньшей температуры по сравнению с плазмой, излучающей в рентгеновском диапазоне вплоть до 25 кэВ. Заметим, что микроволновый диапазон не проявляет себя в НПФ2, что, скорее всего, связано с доминирующим вкладом низких источников гиротронной природы, которые формируются за счет прогрева короны из области предвспышечного энерговыделения (то есть вторичны по отношению к более горячим рентгеновским источникам). Область вблизи вероятных предвспышечных токовых слоев проявляет себя в нестационарном потоке теплового рентгеновского излучения 6–25 кэВ. Также заметим, что излучения в микроволновом диапазоне проявляет себя достаточно сложно с точки зрения динамики вкладов теплового тормозного и гиротронного механизма на частоте 17 ГГц (на 34 ГГц имеется только тормозной).

Анализ данных в этом разделе не включал спектры излучения, которые несут более подробную информацию о параметрах плазмы в предвспышечной области. В следующем разделе мы исследуем спектры рентгеновского излучения по данным RHESSI и микроволнового радиоизлучения по данным NoRP, NoRH, SSRT и RSTN.

5. АНАЛИЗ РЕНТГЕНОВСКИХ И МИКРОВОЛНОВЫХ СПЕКТРОВ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализ спектров рентгеновского излучения по данным RHESSI осуществляется с помощью пакета программ OSPEX из Solar Software (SSW)

в среде *Interactive Data Language* (IDL). Мы исследуем спектры в диапазоне энергий 5–35 кэВ на 52-минутном отрезке времени, начиная с 23:55:04 UT. Сами спектры не показаны для сокращения объема статьи. На рис. 9 представлены результаты аппроксимации рентгеновских спектров однотемпературной моделью с двумя свободными параметрами: температура T (в МК) и мера эмиссии $EM = n_{\text{th}}^2 V$ (в см^{-3}), где n_{th} — плотность тепловой (максвелловской) плазмы, излучающей рентгеновское излучение, а V — объем рентгеновского источника. На рис. 9d мы приводим временной профиль площади рентгеновского источника, который испытывает резкий скачок в окрестности ТВ.

В целом однотемпературная аппроксимация сработала хорошо ($\chi^2 < 3\sigma$ на большей части временных интервалах), несмотря на простоту модели. Добавление второй температуры улучшает аппроксимацию, что указывает на наличие неоднородного распределения температуры внутри источника. Причем вторая чуть более горячая температура не отличается значительно от первой (поэтому мы не приводим двухтемпературный анализ). Здесь мы ограничиваемся только однотемпературной аппроксимацией, поскольку данной модели достаточно для демонстрации наличия более горячей плазмы в ПФ2 16–20 МК по сравнению с оценкой температуры по GOES (рис. 8g). Также мы видим, что плазма, излучающая рентгеновское излучение 5–35 кэВ, обладает на порядок меньшей мерой эмиссии по сравнению с оценкой по GOES, что также указывает на меньший (или менее плотный) и более горячий источник в области основного предвспышечного энерговыделения. Рентгеновский источник был наиболее компактным в ПФ1, затем, резко расширившись во время ТВ, продолжил увеличение размеров в ПФ2 с 4×10^{18} до 7.5×10^{18} см^2 . Схожую динамику показывает мера эмиссии (рис. 8a), что указывает на ее связь с динамикой площади (в картинной плоскости), а значит объема плазмы. Данные результаты подтверждают наше предположение о горячей плазме в области предвспышечного энерговыделения.

Заметим, что в окрестности ТВ результаты аппроксимации рентгеновских спектров однотемпературной моделью наихудшие (наибольшее значение χ^2). Дело в том, что здесь рентгеновское излучение надежно регистрируется вплоть до 35 кэВ (рис. 10a) и не может объясняться только лишь тепловой моделью с одной температурой. Необходимо добавлять спектральные компоненты в рентгеновский спектр, чтобы объяснить более интенсивное излучение на высоких энергиях выше 20 кэВ. На панелях (b)–(d) рис. 10 мы показываем три простейших подхода объяснения полного

спектра ТВ (анализируемый интервал времени выделен серой полосой на панели (a)): однотемпературная и модель толстой мишени (Brown, 1971) (b); однотемпературная и модель тонкой мишени (Aschwanden, 2005) (c); двухтемпературная модель (d). Наилучшие результаты соответствуют нетепловым моделям толстой и тонкой мишени. Заметим, что в рассматриваемом спектре надежно фиксируется значение низконергетической границы $E_{\text{low}} = 14\text{--}16$ кэВ, проявляющейся в виде излома недалеко от места, где тепловые и нетепловые компоненты сравниваются между собой. Для данных видов аппроксимации мы получаем температуру плазмы 22–25 МК, что ниже, чем в случае однотемпературной модели (примерно 32 МК) и соответствует температурам в НПФ2. В итоге, во время ТВ мы наблюдаем явное ускорение электронов и с этого момента времени начинается активная подготовка АО к основной вспышке X-класса в виде роста предвспышечных источников излучения и соответствующих магнитных структур.

Для ПФ2 мы рассмотрели усредненные микроволновые спектры (рис. 11) для двух моментов времени (00:02:46–00:03:13 UT для ТВ и 00:41:39–00:58:41 UT для ПФ2), составленных по данным NoRP, NoRH, RSTN и SSRT. Временные интервалы выбраны достаточно условно, чтобы отобразить момент времени импульсного ТВ энерговыделения в предвспышечной фазе и период времени относительно постепенного энерговыделения перед основной вспышкой. Измерения разных радиоинструментов согласуются друг с другом в рамках оцененных погрешностей. Различия между NoRP и RSTN (красный спектр) есть для частот 9.4 и 8.8 ГГц (возможно мы не совсем точно оцениваем фон). Несмотря на небольшие различия, мы считаем, что полученные композитные спектры отражают особенности механизмов излучения и позволяют провести оценки параметров излучающей среды в рамках ряда предположений (см. далее) в дополнении к анализу рентгеновских спектров.

Сравнение данных спектров показывает наличие более яркой высокочастотной компоненты для ПФ2 (см. обсуждение ниже). Чтобы объяснить спектр мы подобрали комбинацию тепловых гиротронных микроволновых спектров однородных источников, посчитанных быстрыми гиротронными кодами (Fleishman and Kuznetsov, 2010). Так как микроволновый спектр достаточно широкий, то его структуру необходимо описывать комбинацией простых спектров, моделирующих (простейшим образом) неоднородное распределение параметров источников в предвспышечной области. Использовалась двухкомпонентная модель: горячая и более горячая. Горячая модель

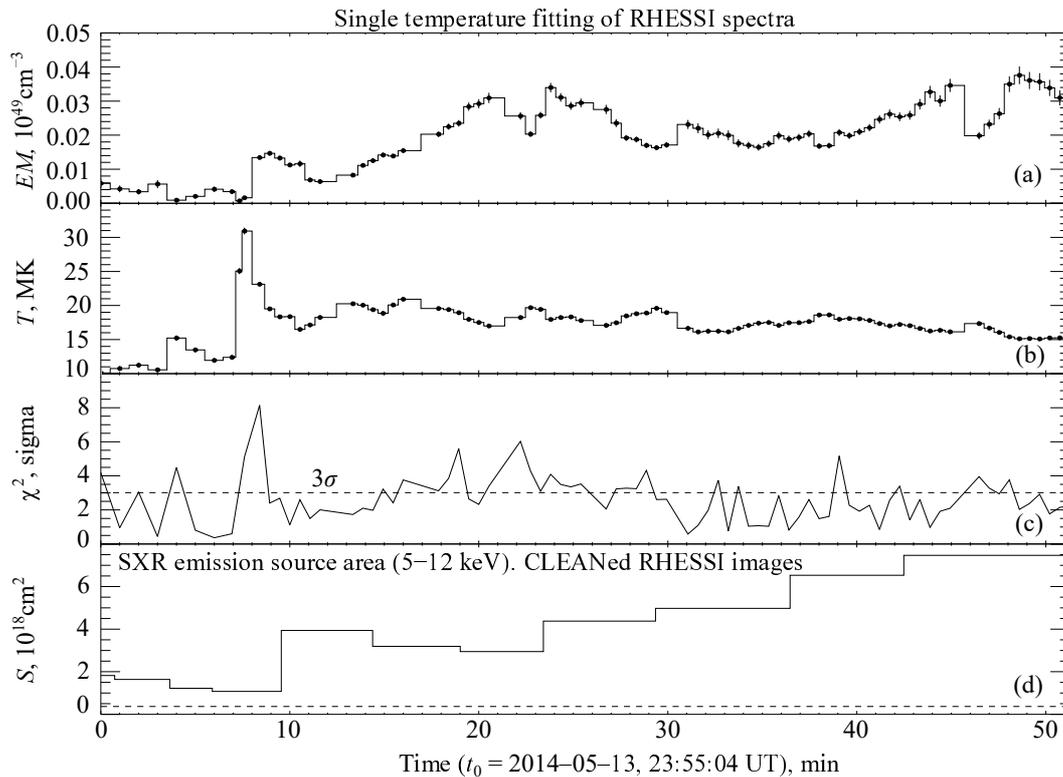


Рис. 9. Результаты аппроксимации рентгеновских предвспышечных спектров в рамках однотемпературной модели тормозного излучения максвелловской плазмы: мера эмиссии (a); температура (b) и нормированный χ^2 (c). На панели (d) показан временной профиль площади рентгеновского источника, определенный по 50%-контур.

соответствует температуре 13 МК, измеренной по GOES, а более горячая плазма имеет температуру по RHESSI 20 МК. Величина магнитного поля для данных двух моделей соответствует 400 и 900 Гс, соответственно (физически это соответствует разным местам в пространстве). Остальные параметры также указаны на рис. 11. Заметим, что значения угла между лучом зрения и вектором магнитного поля для обеих компонент специально выбрано равным 80° , поскольку мы, скорее всего, наблюдаем магнитные силовые линии в области источника, ориентированные вблизи картинной плоскости из-за окололимбового положения АО. Более горячая компонента объясняет спектральный пик и сильный высокочастотный завал, характерный для теплового гиротронного излучения. Заметим, что в данных присутствует свидетельство тормозного высокочастотного излучения на 35 ГГц, для которого характерен плоский спектр (см. черную сплошную линию на рис. 11 выше 10 ГГц). Приведенная полуколичественная спектральная модель микроволнового излучения неплохо согласуется с морфологией предвспышечного энерговыделения (см. выше в тексте): более горячие компактные источники микроволнового излучения (здесь более плотные), возможно связанные с областью предвспышечных токовых слоев; горячая плазма,

которая, скорее всего, нагревается за счет потоков энергии из области первичного предвспышечного энерговыделения.

В конце данного раздела отметим, что спектральный анализ рентгеновского излучения и динамика размеров рентгеновского источника четко показывает особенности фаз предвспышечного энерговыделения: компактное энерговыделение в ПФ1, затем ТВ с появлением ускоренных частиц и резким расширением области энерговыделения и наконец рост размеров области предвспышечного энерговыделения перед основной вспышкой. Микроволновые спектры показывают неоднородность предвспышечного источника, что может быть объяснено излучением разных популяций нагретой плазмы — одна более горячая в области первичного предвспышечного энерговыделения, другая менее горячая область в большем объеме АО (например, прогретая плазма за счет потоков энергии из более горячей области). Для лучшей интерпретации микроволновых наблюдений нам явно не хватает изображений на разных частотах. Напомним, что мы рассматривали только изображения на 17, 34 ГГц и сильно усредненные на 5.7 ГГц (большие размеры диаграммы направленности SSRT).

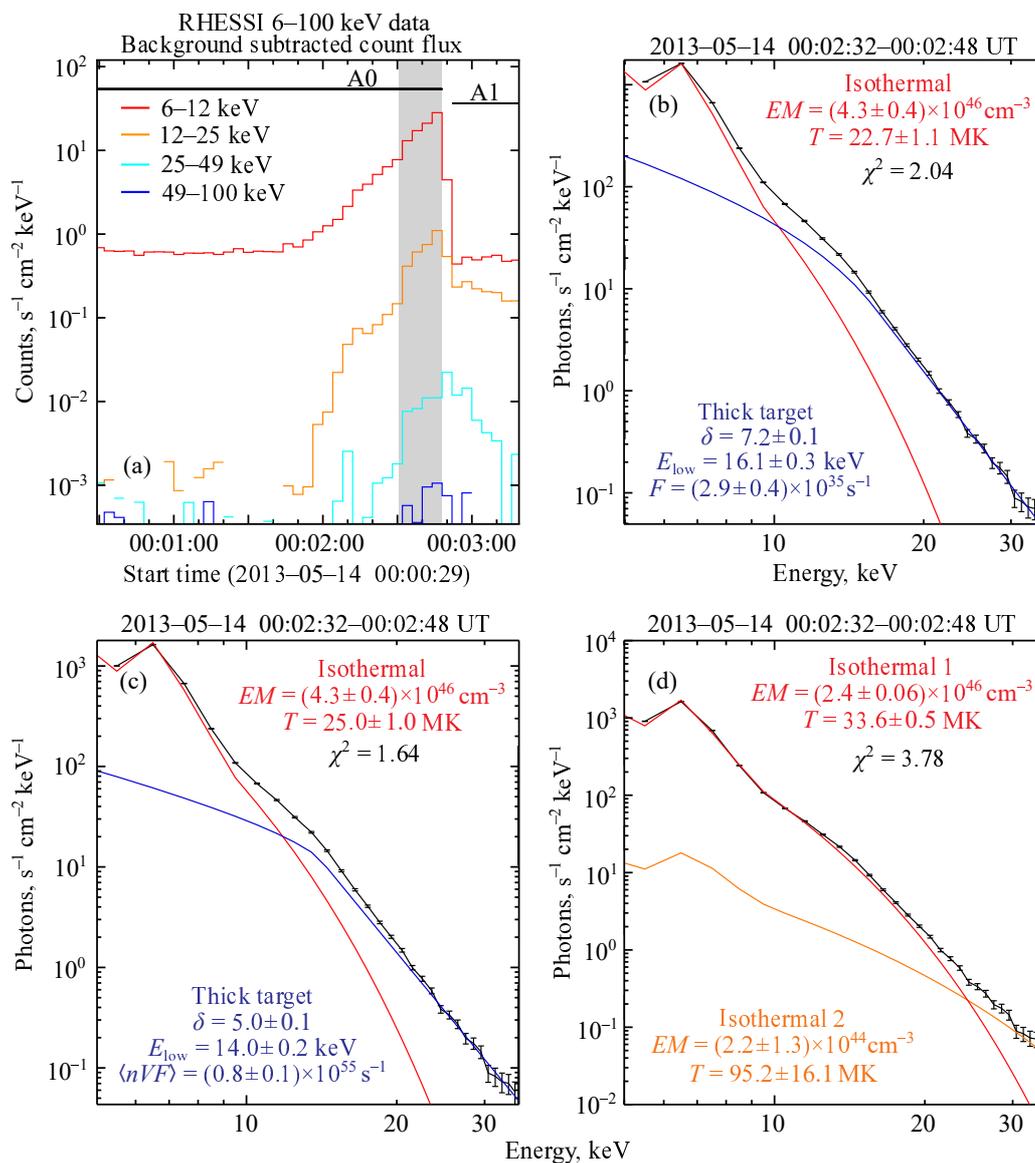


Рис. 10. Результаты аппроксимации предвспышечного рентгеновского спектра ТВ в 00:02 UT в пике рентгеновского излучения 25–50 кэВ по данным RHESSI (см. серую полосу на панели (a)). Панель (a) показывает темпы счета в рентгеновском диапазоне по данным RHESSI в трех энергетических диапазонах (указаны на панели). Черными горизонтальными отрезками сверху показаны состояния аттенуаторов, видно переключение из A0 в A1 в окрестности пика ТВ. На остальных панелях показаны примеры аппроксимации одного и того же рентгеновского спектра в рамках трех разных моделей: однотемпературной плазмы и толстой мишени (b); однотемпературной плазмы и тонкой мишени (c); двухтемпературной плазмы (d). На всех трех панелях указаны результирующие параметры аппроксимации и χ^2 .

6. ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ПРЕДВСПЫШЕЧНОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАНЫМ ДИАГРАММ «ВРЕМЯ–РАССТОЯНИЕ»

Мы в тексте данной статьи уже неоднократно упоминали магнитное пересоединение в предвспышечной фазе. В действительности, ряд наблюдательных фактов (таких как нестационарные горячие рентгеновские источники) указывает на возможное наличие предвспышечных токовых слоев, в которых возможно магнитное пересоединение. В

данном разделе мы рассмотрим течения плазмы и перемещения магнитоплазменных структур в картинной плоскости. Во-первых, течения нагретой плазмы из области ярких рентгеновских, ЭУФ, микроволновых источников могут являться признаком магнитного пересоединения. Во-вторых, движения крупномасштабных магнитоплазменных образований и корональных магнитных петель может являться признаком роста эруптивного жгута в следствие разных причин (в том числе и из-за магнитного пересоединения).

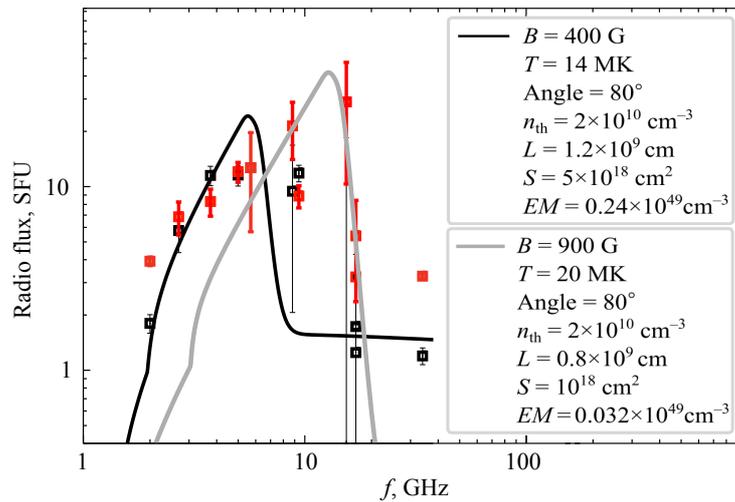


Рис. 11. Результаты моделирования предвспышечного микроволнового спектра в сравнении с наблюдениями. Наблюдаемый спектр (квадраты) составлен из данных RSTN, NoRP, NoRH и SSRT. Наблюдаемые спектры указаны для двух интервалов времени (красный и черный). Модельный микроволновый спектр представлен двумя сплошными линиями, соответствующими спектрам двух однородных источников. Подобранные параметры источников указаны справа (цвет линии соответствует цвету параметра).

На рис. 12 показаны на ЭУФ-изображениях положения срезов (или искусственной наблюдательной щели; см. панели (а)–(с) и (е)), по которым строится диаграмма «время–расстояние» (далее ВР-диаграмма; см. панели (d), (f)–(h)). ВР-диаграммы показываются только для положительных значений разностных изображений в каналах AIA 131 и 304 Å: желтые оттенки обозначают положительную производную интенсивности излучения. Щель установлена в области ярчайших центроидов рентгеновских и микроволновых источников (на всех частотах) для ПФ1, когда мы наблюдали максимально компактный и низкий рентгеновский источник. На полученных ВР-диаграммах для AIA 131 Å (d) мы видим четкий подъем системы корональных магнитных петель во время ПФ2 после ТВ со скоростью 5–10 км с⁻¹. Для канала 304 Å хорошо виден подъем холодной петли (вероятно части эруптивного филамента).

Яркой особенностью ВР-диаграммы в канале 304 Å являются наклоненные структуры, показывающие движения плазмы и отдельно показанные на панелях (g)–(h) рис. 12 для интервалов времени в ПФ1 и ПФ2, соответственно. Заметим, что данные структуры наблюдаются как по направлению вниз, так и вверх (см. наклоненные штриховые голубые линии относительной пунктирной кривой). Причем течения вверх (относительно фотосферы) менее выражены чем вниз, которые наблюдаются практически во время всей предвспышечной фазы в выбранном для анализа интервале времени. Данные наблюдения указывают на наличие повторяющихся или рекуррентных выбросов (течений) с

примерной скоростью около 100 км с⁻¹ и примерным квазипериодом 1–2 минуты из области рентгеновского источника. Вероятно, данные выбросы (течения) являются результатами отдельных актов магнитного пересоединения, которые в рамках TCMR могут участвовать в активном формировании эруптивного магнитного жгута. Также, вероятно, что эти рекуррентные эпизоды энерговыделения могут быть одной из потенциальных причин предвспышечных квазипериодических флуктуаций (КПФ) или пульсаций (КПП), обсуждаемых во многих работах (например, Abramov–Maximov and Bakunina, 2022; Zimovets et al., 2022). Так как тема КПП является очень обширной и сложной, то мы не хотим дальше в нее углубляться, поскольку она требует отдельных глубоких работ, как в рамках данного события, так и для других (также касается возможных КПП видимых в рентгеновском излучении).

На рис. 13 с помощью ВР-диаграмм мы показываем для наглядности движения крупномасштабных магнитных корональных петель в картинной плоскости. При этом в отличие от предыдущего рисунка мы выбрали положения срезов–щелей примерно вдоль локального меридиана: для разных высот в канале 131 Å и для одного положения щели в канале 304 Å. В ЭУФ ВР-диаграммах отлично видно расширение корональных петель на разных высотах в ПФ2 после энерговыделения ТВ. В более холодном канале 304 Å заметны горизонтальные движения и в ПФ1. Вертикальные линии на ВР-диаграммах показаны для наглядного сравнения появления расширяющихся систем магнитных петель с появлением пиков производной по

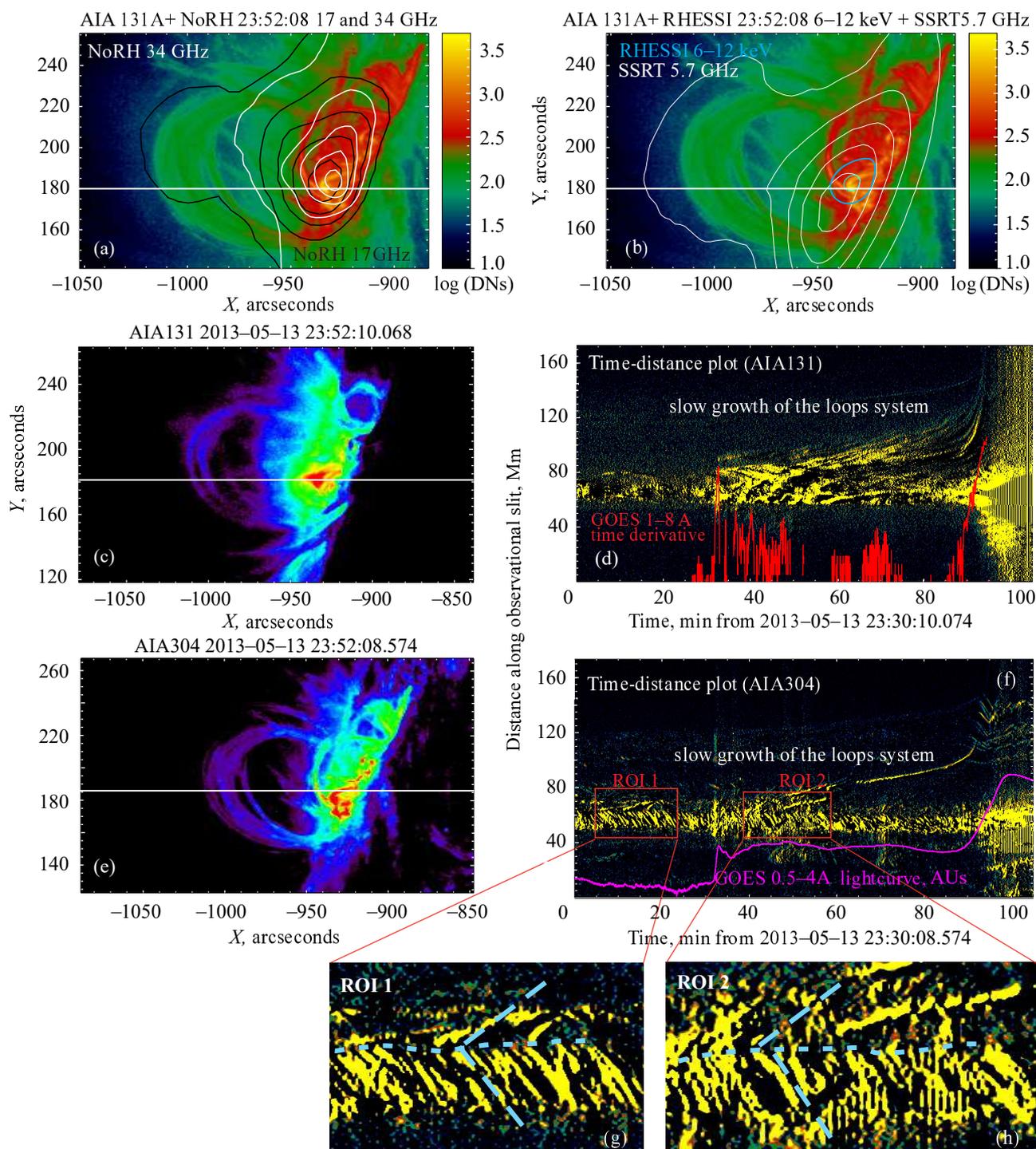


Рис. 12. На панелях (a) и (b) белая линия показывает положение горизонтального среза (по которому строится диаграмма «время–расстояние») на изображениях предвспышечной области в разных диапазонах ЭМ-спектра для одного момента времени. Содержание данных карт аналогично рис. 3b,c. На панелях (c) и (e) показывается положение срезов только на ЭУФ-картах в двух разных каналах AIA: 131 и 304 Å соответственно. Для двух каналов срезы немного смещены друг относительно друга — для лучшей визуализации (подробнее в тексте). На панелях (d) и (f) показаны диаграммы «время–расстояние» для 131 и 304 Å соответственно. На данных двух панелях показаны в условных единицах: красным — временная производная GOES 1–8 Å (d); розовым — поток мягкого рентгеновского излучения по данным GOES 1–8 Å (f). Увеличенные участки ROI1 и ROI2 (прямоугольники на панели (f)) диаграмм «время–расстояние» в канале 304 Å показаны на панелях (g) и (h).

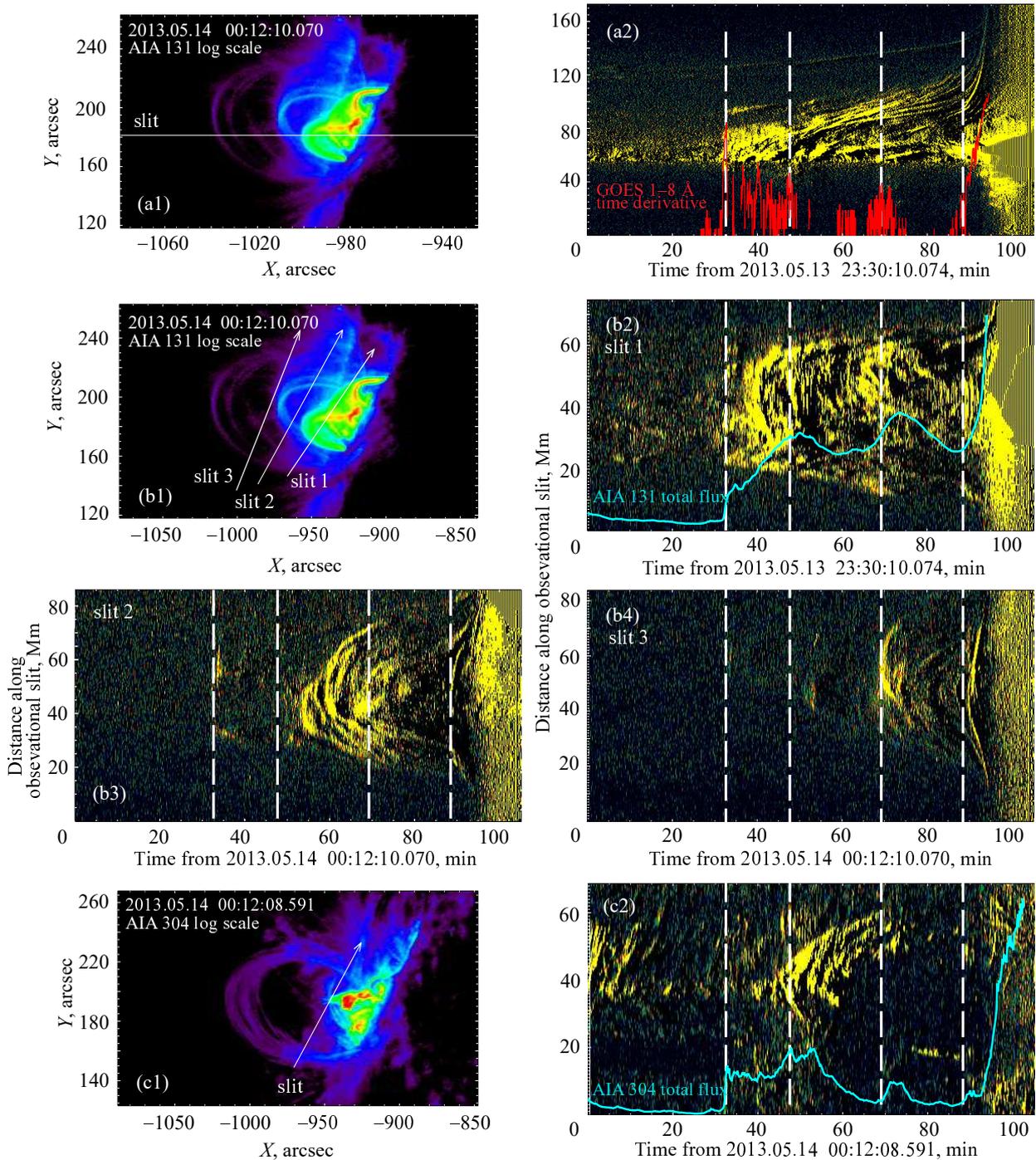


Рис. 13. На панели (a) показано положение среза на ЭУФ-карте 131 Å, по которому делается диаграмма «время–расстояние» (b) в том же диапазоне длин волн. Аналогично на панелях (c) и (g) показано положение срезов на ЭУФ-изображениях в двух каналах AIA: 131 и 304 Å. Заметим, для «горячего» канала 131 Å построено три разных среза на разных высотах в короне и для них построены три диаграммы «время–расстояние» (панели (d)–(f)). Для среза на изображениях в канале 304 Å построена диаграмма «время–расстояние» на панели (h). Также на отдельные диаграммы «время–расстояние» нанесены разные временные профили в условных единицах: временная производная GOES 1–8 Å (b); полные потоки ЭУФ-излучения в каналах AIA 131 Å (f) и 304 Å (h). Четыре вертикальные штрихованные линии показывают характерные моменты времени (чтобы лучше сравнивать временную динамику, показанную на разных панелях). Четвертая (правая) линия примерно соответствует началу импульсной фазы солнечной вспышки. Три остальные вертикальные линии показывают положения отдельных пиков производной по времени GOES 1–8 Å (b).

времени GOES и начала вспышки (см. подпись к рис. 13).

Обобщая анализ ВР-диаграмм, отметим, что течение плазмы и движения корональных структур указывают на то, что энерговыделение происходит в нестационарном режиме практически на протяжении всей рассматриваемой предвспышечной фазы. Вероятно, магнитный жгут формируется за счет непрерывно следующих друг за другом дискретных эпизодов магнитного пересоединения (ТСМР-сценарий). Но в особенности интенсивный рост жгута провоцируется во время ТВ, после которого, кроме течений плазмы и роста петель, мы наблюдаем расширяющиеся предвспышечные рентгеновские источники, что, скорее всего, связано с увеличением областей, вовлеченных в процесс предвспышечного магнитного пересоединения.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При рассмотрении временной динамики энерговыделения солнечных вспышек принято выделять фазы, например (как один из вариантов): предимпульсная, импульсная и постепенная (или фаза спада). Детальных исследований предвспышечного энерговыделения с попыткой выделить отдельные фазы на базе многоволновых наблюдений нам не известно. В данной работе на примере исследуемой эруптивной мощной солнечной вспышки с ярко выраженным предвспышечным энерговыделением мы четко выделяем внутреннюю временную структуру предвспышечной фазы, состоящей минимум из трех этапов (стадий) развития:

- Начальная предвспышечная фаза, в которой наблюдались квазистационарные компактные тепловые источники излучения, видимые в различных диапазонах ЭМ-спектра. Вероятно, что данные источники были связаны со слабым квазистационарным энерговыделением в коротких низколежащих петлях.
- Триггерная малая вспышка (класса C4.3), после которой начался рост системы магнитных петель. Мы интерпретируем эту малую вспышку как яркое проявление формирования будущей эруптивной магнитной структуры. Стоит отметить, что данный ТВ также связан с очень компактной областью энерговыделения в низколежащих магнитных петлях в области полутени пятна. И начальная фаза, и ТВ развивались примерно в одном и том же месте.
- Фаза медленного роста эруптивного магнитного жгута, сопровождающаяся последовательным энерговыделением с увеличением размеров области энерговыделения и ее подъемом по высоте. Наблюдается квазистационарный подъем магнитных петель, который затем сменяется эруптивным процессом и импульсной фазой

основной вспышки. Внутри данной фазы также можно выделить условные субфазы: фаза наиболее нестационарного энерговыделения после ТВ с последовательностью рентгеновских импульсов и фаза сравнительно постепенного энерговыделения.

Заметим, что весь массив обработанных многоволновых данных достаточно четко свидетельствует о взаимосвязи между предвспышечным процессом энерговыделения и самой вспышкой и эрупцией. Мы считаем, что нельзя считать, что указанные разные фазы являются случайными и независимыми процессами. Данная конкретная вспышка не могла бы произойти без данной подготовки АО и наоборот вряд ли описанные процессы энерговыделения в АО могли бы привести к другой вспышке. Перечислим основные результаты анализа многоволновых данных наблюдений, из которых мы смогли выделить вышеуказанные фазы предвспышечного энерговыделения:

- В результате анализа ЭУФ-изображений мы получили, что в начальной предвспышечной фазе наблюдался стабильный петлеобразный горячий ЭУФ-источник, ассоциированный с микроволновым и рентгеновским источником. Затем наблюдалось расширение магнитных петель с горячей плазмой.
- Анализ рентгеновских спектров по данным RHESSI можно было выполнить с приемлемым качеством, используя только одностепенную модель в диапазоне энергий 6–15 кэВ. При добавлении второй тепловой компоненты качество аппроксимации улучшается. Однако рентгеновский спектр ТВ в диапазоне энергий 5–50 кэВ объясняется только при добавлении нетепловой модели со степенным спектром ускоренных электронов.
- Радиоисточник был, по всей видимости, локализован над НЛ и может быть классифицирован как РнЛ. Заметим, что яркостную температуру он имеет типичную для данных источников $1-4 \times 10^5$ К и поляризацию 20–40% на 17 ГГц. На 5.7 ГГц максимальная яркостная температура в среднем составляла 3×10^6 МК (что указывает на еще большую температуру плазмы с учетом плохого пространственного разрешения SSRT) и поляризация была низкой, менее 10%.
- Полученные микроволновые предвспышечные спектры объясняются гиросинхротронным спектром протяженного источника, связанного с высокими петлями ($B \sim 400$ Гс) и температурами около 10 МК, компактным источником в нижних петлях — около 20 МК ($B \sim 900$ Гс) и тормозным излучением на частотах 17–34 ГГц. В целом, рентгеновские данные по компактному источнику можно согласовать с наблюдаемым микроволновым радиоизлучением.

- Анализ диаграмм «время—расстояние» использовался для выявления передвижения УФ-источников излучения и исследования течений плазмы в предвспышечной АО. Показан явный подъем магнитных петель в широком диапазоне высот. Мы интерпретируем, что их рост связан с ростом магнитного жгута (его признаки наблюдаются в виде холодных петель в канале AIA 304 Å). Кроме этого, в холодном канале по диаграммам «время—расстояние» удалось зафиксировать рекуррентные струйные течения в петлях вблизи рентгеновских источников до начала роста и подъема жгута, которые могут быть результатом последовательных эпизодов магнитного пересоединения и энерговыделения.

Наиболее интересный наблюдательный результат заключается в том, что дестабилизация магнитоплазменной структуры в АО начинается с небольшой компактной (триггерной) вспышкой в сильном магнитном поле полутени пятна. Причем в результате этого события мы не имеем мгновенной инициации основной солнечной вспышки и мгновенного развития эрупции, переходящей в КВМ. Мы наблюдаем после этого примерно часовую подготовку, в результате которой создаются условия для крупной вспышки. Пример исследуемого события показывает, что вспышка становится эруптивной в результате относительно активного энерговыделения в предвспышечной области. Имеется в виду то, что отдельные эпизоды энерговыделения, скорее всего, участвуют в формировании эруптивного жгута и в какой-то момент могут спровоцировать потерю его устойчивости и эрупцию. Необходимо подробнее обсудить, что мы имеем в виду под этим тезисом. Приведем небольшие рассуждения о механизмах роста эруптивных жгутов и потери их стабильности в контексте результатов данной работы.

На сегодняшний день рассматривают два типа сценариев, объясняющих появление магнитных жгутов в АО. Во-первых, фотосферные и субфотосферные движения разных классов могут быть причинами закручивания силовых линий магнитного поля с образованием магнитных конфигураций с сильными электрическими токами. Например, всплытие из-под фотосферы предварительно закрученного магнитного потока может быть такой причиной (Manchester et al., 2004). Также возможен вариант создать жгут за счет приповерхностных движений из уже сформированного в короне АО квазипотенциального магнитного поля: сходящиеся/расходящиеся, сдвиговые и скручивающие движения или восходящее/нисходящее движение магнитного потока (например, Hood and Priest, 1981; van Ballegoijen and Martens, 1989; Wang et al., 2018). Также нельзя исключать другие более сложные варианты течений, состоящие из

комбинации вышеперечисленных. В данной работе мы не рассматриваем структуру приповерхностных течений плазмы в силу неудобного месторасположения вспышечной области для такого рода анализа. Но из литературы хорошо известно наличие таких движений во многих вспышечных активных областях (см. ссылки выше по тексту). Вклад и возможность других (второго класса; см. далее по тексту) механизмов формирования жгутов гораздо хуже изучены. Именно на примере исследования предвестников выбранной солнечной вспышки мы и делаем акцент на второй способ создать эруптивный жгут и привести его в неустойчивое состояние.

В действительности, формирование эруптивных жгутов может объясняться не только макроскопическими движениями плазмы в рамках идеальной магнитной гидродинамики (МГД), но и резистивными механизмами, например, магнитным пересоединением перед будущей солнечной вспышкой (например, Longcope and Beveridge, 2007; Priest and Longcope, 2017). Наиболее известный сценарий этого типа — TCMR — мы уже обсуждали в разделе 1. Предполагается наличие взаимодействия между скрещенными магнитными петлями с большим широм вблизи нейтральной линии (Moore et al., 2001), как в случае обсуждаемой вспышки в данной работе. Вероятнее всего, в случае рассматриваемого события, формирование и эрупция жгута могли происходить одновременно с одним и тем же драйвером — процессом TCMR. Можно также предположить одновременную работу резистивного механизма и фотосферных движений. Например, динамика плазмы на фотосфере и под ней может быть ответственна за предварительное закручивание жгута и инициирование вспышечного процесса по типу TCMR, который также приводит к эрупции жгута. Однако как было написано выше, мы не исследуем процессы движения пятен в АО, но пытаемся на основе анализа предвспышечных источников излучения над фотосферой посмотреть, насколько вероятно участие резистивных механизмов в подготовке к эруптивной вспышке.

Вопрос устойчивости сформированного жгута является наиболее важным в понимании того, будет ли вспышка эруптивной или нет. Равновесие магнитоплазменной структуры в АО определяется соотношением стандартных сил, действующих в замагниченной плазме: магнитное давление и натяжение, силы тяжести и градиента давления плазмы. В случае отсутствия баланса сил жгут может потерять устойчивость и привести к эрупции и КВМ. Наиболее популярным триггером эрупции жгутов являются МГД неустойчивости, опять же идеальные, резистивные и их возможные комбинации. Тороидальная неустойчивость (Kliem and Török, 2006; Kliem et al., 2014), изгибная неустойчивость

для параллельных и антипараллельных токовых систем (Kerrens et al., 2014; Török et al., 2014) могут быть причинами эрупции в рамках идеальной МГД. Но в реальных АО возможно взаимодействие магнитных структур разных топологий и соответственно магнитное пересоединение также может являться одним из возможных факторов, приводящих к потере стабильности жгутов. Магнитное пересоединение может быть инициировано «внутренним» образом, за счет некоторого процесса запуска (триггера) пересоединения в токовых слоях, сформировавшихся до эрупции. Здесь стоит отметить, что в соответствии со сценарием идеальной МГД-нестабильности жгута, магнитное пересоединение во время солнечной вспышки (то есть «сама вспышка») инициируется эрупцией (стандартная модель солнечной вспышки) в токовом слое под эруптивным жгутом. Однако в рамках резистивной модели потери устойчивости магнитного жгута субвспышка или множество вспышек различной мощности могут являться движущей силой эрупции и только потом эрупция создает под жгутом вспышечный токовый слой. Здесь мы имеем в виду, что небольшие эпизоды энерговыделения и отдельные небольшие вспышки перед основной вспышкой могут рассматриваться как процессы, вносящие вклад в рост жгута и в какой-то момент времени отдельное событие (даже очень слабое) может привести к потере устойчивости жгута и эрупции. Здесь также стоит вспомнить другой резистивный механизм магнитного прорыва (magnetic breakout), в рамках которого в квадрупольной (или мультипольной) магнитной конфигурации должно произойти магнитное пересоединение в окрестности вершин скрещенных петель с широм или вершины магнитного жгута с вышележащими магнитными трубками (петлями), чтобы невелировать их силу магнитного натяжения (Antiochos et al., 1999).

Собственно говоря, данные наблюдений, анализируемые в работе, показывают то, что в течение рассматриваемого предвспышечного периода мы наблюдаем постоянное энерговыделение в области будущей вспышки. Об этом свидетельствуют прежде всего данные по рентгеновскому и микроволновому излучению. При этом предвспышечное энерговыделение имеет разную интенсивность и разделяется на три упомянутые фазы. В конце третьей фазы возникает окончательная неустойчивость, приводящая к эрупции сформированного магнитного жгута и развитию солнечной вспышки. Природа этой неустойчивости является ключевой проблемой физики жгутов, поскольку она имеет самое прямое отношение к прогнозированию КВМ и последствий для космической погоды. Другими словами, если кто-то способен уловить состояние жгута, непосредственно предшествующее эрупции,

то он сможет с высокой вероятностью предсказать последующие возмущения в межпланетном пространстве. Для отслеживания уровня неустойчивости в АО необходимо наблюдать не только магнитное поле на уровне фотосферы, но и отслеживать энерговыделение в АО и собирать его статистику. Такие наблюдения, вероятно, позволят оценивать участие диссипативных резистивных процессов в солнечной магнитоактивной плазме, чья роль в формировании эруптивного магнитного жгута явно показана в данной работе.

В заключении хочется отметить, что данное исследование не претендует на полную общность описания предвспышечных фаз всех солнечных вспышек. Не обязательно все вспышки имеют деление на три фазы (в том числе, наличие триггерного всплеска). Но, скорее всего, перед всеми крупными событиями происходят процессы магнитного пересоединения в предвспышечных токовых слоях с сопутствующим локальным нагревом плазмы и ее выбросами (и даже возможно ускорения электронов). В будущих работах необходимо производить статистические исследования энерговыделения на разных энергетических масштабах (разный GOES-класс, в том числе и микровспышки) перед разными вспышками и их сериями. Возможно в рамках таких исследований мы выработаем дополнительные критерии прогноза солнечных вспышек, учитывающие текущий и предшествующий статус выделения энергии в потенциально вспышечной АО.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны командам SDO (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>), Nobeyama Radiobservatory (<https://www.nao.ac.jp/en/research/project/nro.html>), SSRT (<https://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>), RHESSI (<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi/>) за открытый доступ к научным данным. Результаты были получены с использованием Уникальной научной установки «Сибирский солнечный радиотелескоп» (<http://ckp-rf.ru/usu/73606/>) и оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. E. Abramov-Maximov and I. A. Bakunina, *Geomagnetism and Aeronomy* **62** (7), 895 (2022). DOI:10.1134/S0016793222070040
2. V. E. Abramov-Maximov, V. N. Borovik, L. V. Opeikina, and A. G. Tlatov, *Solar Physics* **290** (1), 53 (2015). DOI:10.1007/s11207-014-0605-8
3. S. K. Antiochos, C. R. DeVore, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **510** (1), 485 (1999). DOI:10.1086/306563
4. R. L. Aptekar, D. D. Frederiks, S. V. Golenetskii, et al., *Space Sci. Rev.* **71** (1–4), 265 (1995). DOI:10.1007/BF00751332
5. A. Asai, H. Nakajima, M. Shimojo, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **58**, L1 (2006). DOI:10.1093/pasj/58.1.L1
6. M. J. Aschwanden, *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions*, 2nd ed. (Praxis Publishing Ltd., Chichester, 2005). DOI:10.1007/3-540-30766-4
7. A. K. Awasthi, R. Jain, P. D. Gadhiya, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **437** (3), 2249 (2014). DOI:10.1093/mnras/stt2032
8. A. K. Awasthi, R. Liu, H. Wang, et al., *Astrophys. J.* **857** (2), article id. 124 (2018a). DOI:10.3847/1538-4357/aab7fb
9. A. K. Awasthi, P. Rudawy, R. Falewicz, et al., *Astrophys. J.* **858** (2), article id. 98 (2018b). DOI:10.3847/1538-4357/aabd76
10. D. Baker, L. van Driel-Gesztelyi, and L. M. Green, *Solar Physics* **276** (1–2), 219 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9893-4
11. I. A. Bakunina, V. F. Melnikov, and A. S. Morgachev, *Astrophysics* **63** (2), 252 (2020a). DOI:10.1007/s10511-020-09630-7
12. I. A. Bakunina, V. F. Melnikov, and A. S. Morgachev, *Geomagnetism and Aeronomy* **60** (7), 853 (2020b). DOI:10.1134/S001679322007004X
13. I. A. Bakunina, V. F. Melnikov, A. A. Solov'ev, and V. E. Abramov-Maximov, *Solar Physics* **290** (1), 37 (2015). DOI:10.1007/s11207-014-0614-7
14. Y. Bamba, K.-S. Lee, S. Imada, and K. Kusano, *Astrophys. J.* **840** (2), article id. 116 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa6dfe
15. M. G. Bobra and S. Couvidat, *Astrophys. J.* **798** (2), article id. 135 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/798/2/135
16. J. C. Brown, *Solar Physics* **18** (3), 489 (1971). DOI:10.1007/BF00149070
17. X. Cheng, M. D. Ding, J. Zhang, et al., *Astrophys. J.* **789** (2), article id. L35 (2014). DOI:10.1088/2041-8205/789/2/L35
18. C. Chifor, H. E. Mason, D. Tripathi, et al., *Astron. and Astrophys.* **458** (3), 965 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065687
19. C. Chifor, D. Tripathi, H. E. Mason, and B. R. Dennis, *Astron. and Astrophys.* **472** (3), 967 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20077771
20. J. Dudík, V. Polito, M. Janvier, et al., *Astrophys. J.* **823** (1), article id. 41 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/823/1/41
21. G. A. Dulk, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **23**, 169 (1985). DOI:10.1146/annurev.aa.23.090185.001125
22. F. Fárnik and S. K. Savy, *Solar Physics* **183** (2), 339 (1998). DOI:10.1023/A:1005092927592
23. G. D. Fleishman and A. A. Kuznetsov, *Astrophys. J.* **721** (2), 1127 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/721/2/1127
24. M. Gordovskyy and P. K. Browning, *Astrophys. J.* **729** (2), article id. 101 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/729/2/101
25. V. V. Grechnev, S. V. Lesovoi, G. Y. Smolkov, et al., *Solar Physics* **216** (1), 239 (2003). DOI:10.1023/A:1026153410061
26. A. Hernandez-Perez, Y. Su, A. M. Veronig, et al., *Astrophys. J.* **874** (2), article id. 122 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab09ed
27. T. Hirayama, *Solar Physics* **34** (2), 323 (1974). DOI:10.1007/BF00153671
28. A. W. Hood and E. R. Priest, *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics* **17** (1), 297 (1981). DOI:10.1080/03091928108243687
29. N. Huang, Y. Xu, V. M. Sadykov, et al., *Astrophys. J.* **878** (1), article id. L15 (2019). DOI:10.3847/2041-8213/ab2330
30. M. Janvier, *Journal of Plasma Physics* **83** (1), article id. 535830101 (2017). DOI:10.1017/S0022377817000034
31. N. L. S. Jeffrey, L. Fletcher, N. Labrosse, and P. J. A. Simões, *Science Advances* **4** (12), eaav2794 (2018). DOI:10.1126/sciadv.aav2794
32. B. Joshi, A. M. Veronig, J. Lee, et al., *Astrophys. J.* **743** (2), article id. 195 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/743/2/195
33. K. Kai, H. Nakajima, and T. Kosugi, *Publ. Astron. Soc. Japan* **35** (2), 285 (1983).
34. R. Keppens, O. Porth, and C. Xia, *Astrophys. J.* **795** (1), article id. 77 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/795/1/77
35. B. Kliem, J. Lin, T. G. Forbes, et al., *Astrophys. J.* **789** (1), article id. 46 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/789/1/46
36. B. Kliem and T. Török, *Phys. Rev. Letters* **96** (25), id. 255002 (2006). DOI:10.1103/PhysRevLett.96.255002
37. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, et al., *Solar Physics* **275** (1–2), 17 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9776-8
38. R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford, et al., *Solar Physics* **210** (1), 3 (2002). DOI:10.1023/A:1022428818870
39. C. Liu, N. Deng, J. Lee, et al., *Astrophys. J.* **778** (2), article id. L36 (2013). DOI:10.1088/2041-8205/778/2/L36

40. N. Liu, J. Jing, Y. Xu, and H. Wang, *Astrophys. J.* **930** (2), id. 154 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac6425
41. D. W. Longcope and C. Beveridge, *Astrophys. J.* **669** (1), 621 (2007). DOI:10.1086/521521
42. T. Magara, S. Mineshige, T. Yokoyama, and K. Shibata, *Astrophys. J.* **466**, 1054 (1996). DOI:10.1086/177575
43. W. Manchester, IV, T. Gombosi, D. DeZeeuw, and Y. Fan, *Astrophys. J.* **610** (1), 588 (2004). DOI:10.1086/421516
44. C. Meegan, G. Lichti, P. N. Bhat, et al., *Astrophys. J.* **702** (1), 791 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/702/1/791
45. P. K. Mitra and B. Joshi, *Astrophys. J.* **884** (1), article id. 46 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab3a96
46. R. L. Moore, A. C. Sterling, H. S. Hudson, and J. R. Lemen, *Astrophys. J.* **552** (2), 833 (2001). DOI:10.1086/320559
47. H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome, et al., *IEEE Proceedings* **82** (5), 705 (1994). DOI:10.1109/5.284737
48. A. Nindos, S. Patsourakos, A. Vourlidas, and C. Tagikas, *Astrophys. J.* **808** (2), article id. 117 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/808/2/117
49. N. Nishizuka, K. Sugiura, Y. Kubo, et al., *Astrophys. J.* **835** (2), article id. 156 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/835/2/156
50. M. Ohyama and K. Shibata, *Publ. Astron. Soc. Japan* **49**, 249 (1997). DOI:10.1093/pasj/49.2.249
51. R. F. Pinto, M. Gordovskyy, P. K. Browning, and N. Vilmer, *Astron. and Astrophys.* **585**, id. A159 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201526633
52. E. R. Priest and D. W. Longcope, *Solar Physics* **292** (1), article id. 25 (2017). DOI:10.1007/s11207-016-1049-0
53. P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, et al., *Solar Physics* **275** (1–2), 207 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9834-2
54. I. N. Sharykin, V. M. Sadykov, A. G. Kosovichev, et al., *Astrophys. J.* **840** (2), article id. 84 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa6dfd
55. I. N. Sharykin, I. V. Zimovets, and I. I. Myshyakov, *Astrophys. J.* **893** (2), id. 159 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab84ef
56. T. D. Shohin, Y. E. Charikov, and A. N. Shabalin, *Geomagnetism and Aeronomy* **64** (8), 1386 (2024). DOI:10.1134/S0016793224700531
57. B. V. Somov and T. Kosugi, *Astrophys. J.* **485** (2), 859 (1997). DOI:10.1086/304449
58. B. Tan, Z. Yu, J. Huang, et al., *Astrophys. J.* **833** (2), article id. 206 (2016). DOI:10.3847/1538-4357/833/2/206
59. S. J. Tappin, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **87** (2), 277 (1991).
60. T. Török, J. E. Leake, V. S. Titov, et al., *Astrophys. J.* **782** (1), article id. L10 (2014). DOI:10.1088/2041-8205/782/1/L10
61. S. Tsuneta, *Astrophys. J.* **483** (1), 507 (1997). DOI:10.1086/304236
62. A. M. Uralov, V. V. Grechnev, G. V. Rudenko, et al., *Solar Physics* **249** (2), 315 (2008). DOI:10.1007/s11207-008-9183-y
63. A. A. van Ballegooijen and P. C. H. Martens, *Astrophys. J.* **343**, 971 (1989). DOI:10.1086/167766
64. A. J. Wallace, L. K. Harra, L. van Driel-Gesztelyi, et al., *Solar Physics* **267** (2), 361 (2010). DOI:10.1007/s11207-010-9661-x
65. H. Wang, C. Liu, K. Ahn, et al., *Nature Astronomy* **1**, id. 0085 (2017). DOI:10.1038/s41550-017-0085
66. R. Wang, Y. D. Liu, J. T. Hoeksema, et al., *Astrophys. J.* **869** (2), article id. 90 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aaed48
67. M. M. Woods, L. K. Harra, S. A. Matthews, et al., *Solar Physics* **292** (2), article id. 38 (2017). DOI:10.1007/s11207-017-1064-9
68. Z. Wu, Y. Chen, G. Huang, et al., *Astrophys. J.* **820** (2), article id. L29 (2016). DOI:10.3847/2041-8205/820/2/L29
69. J. Zhang, X. Cheng, and M.-D. Ding, *Nature Communications* **3**, id. 747 (2012). DOI:10.1038/ncomms1753
70. Y. Zhang, B. Tan, M. Karlický, et al., *Astrophys. J.* **799** (1), article id. 30 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/799/1/30
71. G. P. Zhou, J. Zhang, and J. X. Wang, *Astrophys. J.* **823** (1), article id. L19 (2016). DOI:10.3847/2041-8205/823/1/L19
72. I. V. Zimovets, M. Gros, and A. B. Struminsky, *Advances in Space Research* **43** (4), 680 (2009). DOI:10.1016/j.asr.2008.09.009
73. I. V. Zimovets, A. B. Nechaeva, I. N. Sharykin, and B. A. Nizamov, *Geomagnetism and Aeronomy* **62** (4), 356 (2022). DOI:10.1134/S0016793222040181

Pre-Flare Energy Release Phases in the Eruptive X3.2 Solar Flare on May 14, 2013

I. N. Sharykin¹, I. V. Zimovets¹, and N. S. Meshalkina²

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

² Institute of Solar-Terrestrial Research, Irkutsk, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 664033 Russia

This study is devoted to the investigation of pre-flare processes preceding the eruptive X3.2-class solar flare that occurred on May 14, 2013. This event was selected because of its favorable position near the solar limb, the presence of a well-pronounced pre-flare phase, and the availability of high-quality observational data from the Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly (SDO/AIA), Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI), Nobeyama Radio Heliograph (NoRH), and Siberian Solar Radio Telescope (SSRT). The main objective of this work is to identify possible eruption triggers and to perform a detailed multiwavelength analysis of the pre-flare energy release properties. In this study, we consider a pre-flare time interval of about one and a half hours. From the point of view of temporal evolution, the pre-flare phase of the selected event consists of two stages. During the first stage, a quasi-stationary compact X-ray source is observed in the 5–25 keV energy range. The radio sources are also relatively stable, and their centroids coincide with the X-ray brightness center. This is followed by a sharp burst (nonthermal emission up to 100 keV is detected) and a subsequent increase in emission intensity over a broad spectral range. The observed sources become nonstationary. The second stage, following the burst, lasts for about one hour. During this period, the sources expand, and the growth of a coronal loop system is observed. Afterward, the eruption and the main flare take place. It is noteworthy that the trigger burst (TB) between the first and second pre-flare stages was associated with a very compact X-ray source and a strong brightening in all available ultraviolet (EUV and UV) channels. To determine the magnetic field structure at the photospheric level, vector magnetograms obtained by the Helioseismic and Magnetic Imager/Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO) were used. These data showed that the pre-flare energy release and the TB were localized near the magnetic neutral line. Estimates of the thermodynamic parameters of the flare plasma, the energy of accelerated electrons, and the thermal energy of the pre-flare plasma were obtained based on the analysis of microwave and X-ray spectra. The observed microwave spectra are well explained by a gyrosynchrotron model consisting of an extended source associated with high coronal loops and plasma temperature $T \approx 5\text{--}7$ MK, a compact source in lower loops ($T \approx 10\text{--}20$ MK), and bremsstrahlung emission at frequencies of 17–34 GHz. In general, the X-ray data from the compact source are in good agreement with the observed radio emission.

Keywords: *Sun: activity; Sun: flares; Sun: coronal mass ejections (CMEs); Sun: radio radiation; Sun: X-rays, gamma-rays Sun: UV radiation*